

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de lo 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 o titular de los Derechos Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ecología Marina**

**Análisis de la relación entre la tasa de crecimiento de bacterias
marinas y la síntesis de halometanos en la estación Scripps
Pier, La Jolla, California**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Presenta:

Rocio Fernanda Azcatl Delgadillo

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por

Rocio Fernanda Azcatl Delgadillo

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Laura Gómez Consarnau

Directora de tesis

Dra. María Asunción Lago Lestón

Dr. David Alberto Rivas Camargo



Dr. Rafael Cabral Tena

Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Rocio Fernanda Azcatl Delgadillo** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Ecología Marina.

Análisis de la relación entre la tasa de crecimiento de bacterias marinas y la síntesis de halometanos en la estación Scripps Pier, La Jolla, California

Resumen aprobado por:

Dra. Laura Gómez Consarnau
Directora de tesis

Actualmente el planeta se encuentra experimentando diversos cambios, derivado principalmente de las actividades humanas. Una de las causas principales del cambio global es la acumulación de los Gases de Efecto Invernadero. A su vez, las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO), afectan directamente al ozono estratosférico, limitando así su capacidad de filtrar los rayos ultravioletas que inciden en la atmósfera. Los halometanos son SAO de pequeño tamaño que transportan diversos halógenos reactivos (ej. cloro, bromo y yodo) que destruyen la capa de ozono estratosférico. Una fracción considerable de estos compuestos hacia la atmósfera proviene del océano y es producida por diversos organismos, por ejemplo: macroalgas, microalgas, cianobacterias y bacterias. Sin embargo, la función de estos compuestos de origen biogénico para los organismos que los sintetizan aún se desconoce. Recientemente se ha reportado que las bacterias heterótrofas también son capaces de sintetizar halometanos, con tasas de producción que igualan a las tasas de crecimiento de estas bacterias en condiciones de laboratorio. Este proyecto propone validar si la síntesis de halometano es directamente proporcional a las tasas de crecimiento de bacterias marinas en su ambiente marino natural, y de ser así, cuáles son los factores ambientales que promueven dicha síntesis.

Palabras clave: Cambio global, halometanos, bacterias heterótrofas, océano.

Abstract of the thesis presented by **Rocio Fernanda Azcatl Delgadillo** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Analysis of the relationship between the growth rate of marine bacteria and the synthesis of halomethanes at Scripps Pier Station, La Jolla, California

Abstract approved by:

Dra. Laura Gómez Consarnau
Thesis Director

Currently the planet is undergoing various changes, derived mainly from human activities. One of the main causes of global change is the accumulation of Greenhouse Gasses. In turn, the substances that deplete the ozone layer (ODS) directly affect the stratospheric ozone, thus limiting its ability to filter the ultraviolet rays that affect the atmosphere. Halomethanes are small ODS that carry various reactive halogens (e.g., chlorine, bromine and iodine) that destroy the stratospheric ozone layer. A considerable fraction of these compounds into the atmosphere comes from the ocean and is produced by various organisms, for example: macroalgae, microalgae, cyanobacteria and bacteria. However, the role of these biogenic compounds for the organisms that synthesize them is still unknown. Recently it has been reported that heterotrophic bacteria are also capable of synthesizing halomethanes, with production rates equal to the growth rates of these bacteria under laboratory conditions. This project proposes to validate whether the synthesis of halomethane is directly proportional to the growth rates of marine bacteria in their natural marine environment, and if so, which are the environmental factors that promote said synthesis.

Keywords: Global change, halomethanes, heterotrophic bacteria, ocean.

Dedicatoria

Para mi mamá ROSA y papí GONZALO, que me motivaron a siempre creer en mí y que me han apoyado en todas las decisiones que he tomado y me han enseñado que todos los sueños pueden cumplirse, a mis hermanas PILY y SUSY, a mi hermano DIEGO que me ayudaron a forjar mi carácter al compartir una infancia llena de amor y muy bonitos recuerdos juntos, a mis sobrinas MELY, VALE y LÍA que llegaron en el mejor momento de mi vida para llenar de alegría mi mundo, siendo un impulso para querer llegar cada vez más alto.

A mi sobrino SAÚL que siempre me escuchó y apoyo en todo momento, sé que desde donde estés aún tú esencia permanecerá conmigo.

A mis abuelitos, tías, tíos, primas, primos a toda mi familia que siempre me han impulsado a volar muy alto.

Para mis amigos de la UAM que han permanecido a mi lado en este camino lleno de dificultades, agradeciendo el apoyo que durante más de 8 años me han brindado a lo largo de mi desarrollo académico.

A mis amigos de generación, gracias por hacer el posgrado y la estancia en Ensenada muy divertida y llena de anécdotas, los quiero y recuerden que juntos en la distancia, en especial a ALE, JLUIS, OMAR y LUNA

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por brindarme las condiciones para poder completar el programa de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. **No. de becario:** 895412

Dra. Laura Gómez Consarnau, por el apoyo incondicional y la motivación que siempre me ofreció, en los mejores y peores momentos, muchas gracias por ser mi directora de tesis enseñarme y guiarme en el camino de la investigación

A la Dra. Asunción y Dr. David por dedicar tiempo y esfuerzo dando retroalimentación y puntos de vista para mejorar mi trabajo de tesis durante todo este tiempo.

A mis amigos de generación, maestros y comunidad del CICESE, por el ambiente de apoyo y compañerismo en que pude desarrollar este trabajo, especialmente a mi familia en la generación 2019-2021 de la Maestría en Ecología Marina.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xv
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción general.....	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis	4
1.5 Objetivos	4
1.6 Preguntas de investigación	4
Capítulo 2. Metodología.....	5
2.1. Área de estudio.....	5
2.2 Muestreo de agua de mar <i>in situ</i> (grupo de variables ambientales 1)	5
2.2.1 Producción bacteriana	6
2.2.2 Abundancias.....	7
2.2.3 Clorofila <i>a</i>	7
2.3 Muestreo (grupo de variables ambientales 2).....	7
2.4 Concentraciones de halometanos	8
2.5 Diversidad microbiana en el agua.....	9
2.5.1 Extracción de ADN y ARN	9
2.5.2 Secuenciación y análisis de rRNA / rDNA 16S	10
Capítulo 3. Resultados	11
3.1 Variables ambientales 1.....	11
3.2 Variables ambientales 2.....	17
3.3 Halometanos.....	22
3.4 Análisis estadístico	26

3.4.1 Correlaciones.....	26
3.4.2 Correlaciones entre halometanos y variables ambientales.....	27
3.4.2.1 Variables ambientales 1.....	27
3.4.2.2 Variables ambientales 2.....	27
3.4.3 Correlaciones entre halometanos y diversidad microbiana.....	29
3.4.3.1 Diversidad 16S DNA.....	29
3.4.3.2 Diversidad 16 S RNA.....	32
3.4.3.3 Diversidad 18S RNA.....	35
3.4.4 Análisis de componentes principales.....	37
3.4.4.1. Análisis de componentes principales halometanos y variables ambientales 1.....	38
3.4.4.2. Análisis de componentes principales halometanos y variables ambientales 2.....	44
3.4.5 Retraso de 1 semana, correlaciones entre variables ambientales y concentraciones de halometan.....	50
Capítulo 4. Discusión.....	53
Capítulo 5. Conclusiones.....	58
Literatura citada.....	59
Anexos.....	62

Lista de figuras

Figura	Página
1 Área de estudio, muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU. (32 ° 53'N, 117 ° 15'W).....	5
2 Grupo de variables ambientales 1, tomadas <i>in situ</i> en el muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., cada variable posee unidades específicas de medición.....	6
3 Grupo de variables ambientales 2, las bases de datos se tomaron del Programa de acceso a datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP), descargando los datos del muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., cada variable posee unidades específicas de medición.....	8
4 Compuestos halogenados, las bases de datos se obtuvieron del sistema de preconcentración criogénica “Medusa”, los datos corresponden a mediciones tomadas del muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., las unidades medición de halometanos.....	9
5 Diversidad de grupos procariotas y eucariotas, las cuales se obtuvieron a partir de la toma de muestras de agua in situ en el muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., y procesadas posteriormente en laboratorio.	10
6 Datos semanales de la abundancia bacteriana (células/ml-1), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.	12
7 Datos semanales de Clorofila a (ug/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.	12
8 Datos semanales de la abundancia de cianobacterias (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	13
9 Datos semanales de la abundancia pico-clorofitas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	13
10 Datos semanales de la abundancia de ostreococcus – micromonas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	14
11 Datos semanales de temperatura (°C), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	14
12 Datos semanales de la producción bacteriana específica (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	15
13 Datos semanales de la abundancia de nanoflagelados heterótrofos (HNF) (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	15
14 Datos semanales de la abundancia de criptofitas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	16

15	Datos semanales de la abundancia nano-clorofitas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	16
16	Datos semanales de la producción bacteriana ($\mu\text{gC/L/d}$), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	17
17	Datos semanales de clorofila a (mg/m^3), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier..	18
18	Datos semanales de Fosfato (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.....	19
19	Datos semanales de Silicato (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.....	19
20	Datos semanales de amonio (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.....	20
21	Datos semanales de nitrato (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.....	20
22	Datos semanales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.....	21
23	Datos semanales de salinidad, a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.....	21
24	Datos diarios de la concentración de bromuro de metilo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	23
25	Datos diarios de la concentración de cloruro de metilo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	23
26	Datos diarios de la concentración de yoduro de metilo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	24
27	Datos diarios de la concentración de dicloro metano (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	24
28	Datos diarios de la concentración de cloroformo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	25
29	Datos diarios de la concentración de dibromo metano (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	25
30	Datos diarios de la concentración de bromoformo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.....	26
31	Heatmap, se muestran las correlaciones (r de <i>Spearman</i>) entre halometanos y variables ambientales 1 tomadas semanalmente en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y variables ambientales. Gráficos de dispersión donde se presentan los valores de r y p , revisar sección de Anexo A.....	28
32	Heatmap, se muestran las correlaciones (r de <i>Spearman</i>) entre halometanos y variables ambientales 2 de datos de libre acceso de ERDDAP un servidor de datos de la NOAA de la estación Scripps Pier, La Jolla, California, E.U. A en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A.,	

- teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y variables ambientales. Gráficos de dispersión donde se presentan los valores de r y p , revisar sección de Anexo B.....29
- 33 Estructura de la comunidad microbiana de 16S DNA, se calculó a partir de la abundancia de cada grupo, obteniendo la media mensual para determinar el porcentaje correspondiente de cada grupo. Los colores en azul representan una mayor abundancia, colores en blanco representan una disminución en la abundancia y colores en rojo representan valores bajos de abundancia..... 31
- 34 Heatmap, se muestran las correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y diversidad 16S DNA tomadas semanalmente en el de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y grupos microbianos..... 32
- 35 Estructura de la comunidad microbiana de 16S RNA, se calculó a partir de la expresión relativa de cada grupo, obteniendo la media mensual para determinar el porcentaje correspondiente de cada grupo. Los colores en azul representan una mayor expresión relativa, colores en blanco representan una disminución en la expresión relativa y colores en rojo representan valores bajos de expresión relativa.....33
- 36 Heatmap, se muestran las correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y diversidad 16S RNA tomadas semanalmente en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas entre halometanos y grupos microbianos..... 34
- 37 Estructura de la comunidad microbiana de 18S RNA, se calculó a partir de la expresión relativa de cada grupo, obteniendo la media mensual para determinar el porcentaje correspondiente de cada grupo. Los colores en azul representan una mayor expresión relativa, colores en blanco representan una disminución en la expresión relativa y colores en rojo representan valores bajos de expresión relativa..... 35
- 38 Correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y diversidad 18S RNA tomadas semanalmente en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y grupos microbianos (eucariotas)..... 36
- 39 Análisis de Componentes Principales (PCA) de halometanos y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....38

- 40 Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromuro de metilo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C..... 39
- 41 Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloruro de metilo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....40
- 42 Análisis de Componentes Principales (PCA) de yoduro de metilo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C..... 41
- 43 Análisis de Componentes Principales (PCA) de dicloro metano y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....42
- 44 Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloroformo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....42
- 45 Análisis de Componentes Principales (PCA) de dibromo metano y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 1. las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....43
- 46 Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromoformo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....44
- 47 Análisis de Componentes Principales (PCA) de halometanos y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....45
- 48 Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromuro de metilo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2)

para el bromuro de metilo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	46
49 Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloruro de metilo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	47
50 Análisis de Componentes Principales (PCA) de yoduro de metilo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	47
51 Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromoformo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	48
52 Análisis de Componentes Principales (PCA) de dicloro metano y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	49
53 Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloroformo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	49
54 Análisis de Componentes Principales (PCA) de dibromo metano y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.....	50
55 Gráfico de dispersión, correlación entre bromuro de metilo y Clorofila a durante el año 2015....	62
56 Gráfico de dispersión, correlación entre bromuro de metilo y la abundancia de Pico-clorofitas durante el año 2015.....	62
57 Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la producción bacteriana durante el año 2015.....	63
58 Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la producción bacteriana específica durante el año 2015.....	63

59	Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la abundancia de Criptofitas durante el año 2015.....	64
60	Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la abundancia de Pico-clorofitas durante el año 2015.....	64
61	Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la abundancia de Nano-clorofitas durante el año 2015.....	65
62	Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y la producción bacteriana durante el año 2015.....	65
63	Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y la temperatura durante el año 2015.	66
64	Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y la abundancia de Ostreococcus y Micromonas durante el año 2015.....	66
65	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la producción bacteriana durante el año 2015.....	67
66	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la producción bacteriana específica durante el año 2015.....	67
67	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y clorofila a durante el año 2015.....	68
68	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la abundancia de Criptofitas durante el año 2015.....	68
69	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la abundancia de Pico-clorofitas durante el año 2015.....	69
70	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la abundancia de Nano-clorofitas durante el año 2015.....	69
71	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la producción bacteriana durante el año 2015.....	70
72	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la producción bacteriana específica durante el año 2015.....	70
73	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y Clorofila a durante el año 2015.....	71
74	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la abundancia de Criptofitas durante el año 2015.....	71
75	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la abundancia de Pico-Clorofitas durante el año 2015.....	72
76	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la abundancia de Nano-Clorofitas durante el año 2015.....	72

77	Gráfico de dispersión, correlación entre bromoformo y la temperatura durante el año 2015.....	73
78	Gráfico de dispersión, correlación entre bromuro de metilo y silicato durante el año 2015.....	74
79	Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y temperatura durante el año 2015..	74
80	Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y clorofila a durante el año 2015.....	75
81	Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y silicato durante el año 2015.....	75
82	Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y temperatura durante el año 2015..	76
83	Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y nitrato durante el año 2015.....	76
84	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y clorofila a durante el año 2015.....	77
85	Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y silicato durante el año 2015.....	77
86	Gráfico de dispersión, correlación entre dibromo metano y nitrato durante el año 2015.....	78
87	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y clorofila a durante el año 2015.....	78
88	Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y fosfato durante el año 2015.....	79
89	Gráfico de dispersión, correlación entre bromoformo y nitrato durante el año 2015.....	79

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Comparación entre las correlaciones de Spearman que se obtuvieron a partir de la aplicación de un retraso (<i>1 lag</i>) y correlaciones sin retraso (<i>0 lag</i>) entre el grupo de variables ambientales 1 y halometanos.....	51
2 Comparación entra las correlaciones de Spearman que se obtuvieron a partir de la aplicación de un retraso (<i>1 lag</i>) y correlaciones sin retraso (<i>0 lag</i>) entre el grupo de variables ambientales 2 y halometanos.....	52
3 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	80
4 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negrita.....	80
5 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negrita.....	81
6 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	81
7 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	82
8 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	82
9 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	83
10 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	83
11 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.....	84

- 12 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 84
- 13 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 84
- 14 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 85
- 15 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 85
- 16 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 85
- 17 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 86
- 18 Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas..... 86

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción general

El clima del planeta Tierra se encuentra actualmente sufriendo cambios importantes, una de las causas principales es debido al aumento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), estos gases son resultado de las actividades antropogénicas en la mayoría de los casos. Actualmente se presta una atención específica al aumento del dióxido de carbono (CO_2) teniendo como fuente principal de este compuesto, resultado de la quema de combustibles fósiles y por consecuencia se emiten hacia la atmósfera. Otros gases considerados como de efecto invernadero son: el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO), los hidrofluorocarbonos (HFC), entre otros. Estos gases también tienen un efecto en el clima de la Tierra, después de su emisión a la atmósfera, algunos compuestos persisten en el ambiente poco tiempo y hasta décadas. Por lo que también contribuyen significativamente al cambio climático. Sin embargo, algunos de estos gases persisten menor tiempo en la atmósfera en comparación con el CO_2 , por este motivo no se les da o atribuye la importancia que se les debería de dar, ya que el reducir sus emisiones puede ayudar a ganar tiempo contra el cambio climático, ya se actualmente estos cambios comienzan a ser visibles y se presentarán con mayor frecuencia y magnitud en un futuro no muy lejano (Monska et al., 2011).

En el año de 1987, con el principal objetivo de reunir esfuerzos e iniciativas para la reducción de gases de efecto invernadero, se llevó a cabo la firma de un acuerdo internacional el cual se conoce como el Protocolo de Montreal. Este acuerdo se concretó y se llevó a cabo dos años después en el año de 1989, teniendo como objetivo principal la reducción y el control, de la producción y el uso de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). Teniendo como objetivo principal, la reducción del uso de los clorofluorocarbonos (CFC) (Molina & Rowland, 1974; Ball et al., 2018). En la década de 1980, se registraron altos niveles de concentración de estos compuestos en el ambiente y como consecuencia se observaron cambios significativos en el clima del hemisferio sur, derivado de la presencia de compuestos halogenados que destruyen al ozono, provocando así la reducción de la capa de ozono. El Protocolo de Montreal no solo ha contribuido a la protección de la capa de ozono, sino que también se ha encargado de proteger al clima, debido a que las SAO son clasificadas también dentro del grupo de los GEI (Ball et al., 2018).

El cambio climático global conlleva a una gran cantidad de cambios tanto ambientales como ecológicos, los cuales se han ido observando de manera más notable durante las últimas décadas. Estos cambios son el resultado de la consecuente acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Levitus et al., 2000; Sarmiento et al., 2010). El cambio global impacta directamente en el océano a través del aumento de la temperatura, la cual presentara un mayor impacto en la capa superficial del océano, en comparación con zonas profundas, teniendo un aumento de algunos grados durante este siglo (Timmermann et al. 1999; Meehl et al. 2007; Sarmiento et al., 2010), provocando cambios en los regímenes de viento y cambios en la radiación los cuales también afectan directamente al ciclo hidrológico, teniendo como consecuencia la alteraciones en la circulación oceánica y en procesos químicos, físicos y biológicos (Sarmiento et al., 2010). Una de las principales consecuencias del cambio en el agua de mar se verá reflejado en diferentes aspectos tanto de estructura como funcionamiento (ciclos) de los ecosistemas marinos (Sarmiento et al., 2010).

Recientemente se le está prestando una especial atención a los efectos de estos cambios ambientales en los microorganismos marinos (Sarmiento et al., 2010), ya que estos son responsables de la mayoría de los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo en el mar. Tomando en cuenta a las bacterias marinas, siendo microorganismos que poseen la capacidad de procesar cantidades considerables de materia orgánica, así como presentar altas tasas de crecimiento (Bloem & Gilissen 1989; Kirchman et al., 1989; White et al., 1991). Para comprender y proyectar el flujo de nutrientes y carbono en el ecosistema acuático, se requiere del conocimiento de los parámetros ambientales que regulan y estimulan la producción microbiana. Las bacterias heterótrofas, se les considera como base de la red alimentaria, por lo que su actividad metabólica e interacciones dentro de esta red se es regulada principalmente por la temperatura. Además de otros factores, la cual tendrá efectos en las interacciones tróficas viéndose afectadas o beneficiadas en un océano fluctuante (White et al., 1991).

1.2 Antecedentes

Los gases de efecto invernadero no son solo de origen antropogénico, ya que la emisión de algunos de estos gases se origina de fuentes naturales. Los gases biogénicos, especialmente los halometanos (CH_3Cl , CH_3I , CH_3Br), son importantes con respecto a la química atmosférica, ya que el océano es considerado como la mayor fuente de estos compuestos halogenados (Butler et al., 2007; Kurihara et al., 2010). Estos

compuestos son pequeñas moléculas que transportan especies de halógenos hacia la estratósfera y como consecuencia afectan directamente al ozono estratosférico, provocando la reducción de la capa de ozono (Carpenter et al. 2014; Jonson 2015). Una cantidad considerable de halometanos volátiles son emitidos principalmente desde el océano a la atmósfera, siendo el resultado de su producción (síntesis) a partir de organismos marinos: como macroalgas, microalgas, cianobacterias, entre otros (Kurihara et al., 2010). Estos halometanos producidos de fuentes naturales son considerados como vectores importantes de transporte de compuestos halogenados entre la atmósfera y el océano. Aun así, actualmente se desconoce la función de muchos de estos compuestos naturales para los organismos que los producen, así como la presencia de organismos que los consuman y obtengan algún beneficio de la presencia de estos compuestos en el ambiente (Carpenter et al. 2000; Manley, 2002). La mayoría de los halometanos que influyen en el agotamiento del ozono estratosférico pueden ser de origen tanto antropogénicas como de fuentes naturales. Sin embargo, las fuentes, los sumideros y las concentraciones globales de halometanos hasta ahora se les ha prestado poca atención y por lo tanto se han realizado muy pocos estudios (Kurylo & Rodríguez, 1998; Dimer et al., 2001).

1.3 Justificación

En la atmósfera del planeta Tierra existen distintos tipos de gases a diferentes concentraciones, los gases de efecto invernadero (GEI) incluyen el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), cuyas concentraciones atmosféricas han ido en aumento, debido a que sus principales fuentes son antropogénicas. Sin embargo, otros compuestos que se encuentran en menores concentraciones en la atmósfera como son los halometanos, también afectan al clima y provienen tanto de fuentes antropogénicas como de fuentes naturales. El océano es una de las principales fuentes naturales de halometanos a la atmósfera, y son sintetizados por organismos como: macroalgas, microalgas, cianobacterias y bacterias (Kurihara et al., 2010). La mayoría de los estudios se han enfocado en la identificación de grupos fitoplanctónicos como productores importantes de estos gases (Gasol et al., 2000). Sin embargo, recientemente se ha reportado que diversos grupos de bacterias marinas en cultivo producen cantidades significativas de halometanos (Gomez-Consarnau et al. 2021) y que las tasas de síntesis de estos compuestos están directamente correlacionadas con sus tasas de crecimiento. Dado que la temperatura influye directamente en el crecimiento bacteriano, un aumento en la temperatura de los océanos podría tener como consecuencia un aumento en la síntesis de halometanos en el mar. Aun así, se desconoce si el bacterioplancton en su medio natural se comporta de la misma forma que en cultivos,

por lo que se requiere de análisis de muestras *in situ* para conocer si estos procesos también se están llevando a cabo en el océano.

1.4 Hipótesis

1. Las bacterias marinas son una de las principales fuentes naturales de halometanos a la atmósfera. Los niveles de halometanos en el mar son proporcionales a las abundancias y tasas de crecimiento de bacterias marinas en el medio natural.
2. La síntesis de halometanos puede depender de diferentes variables tanto bióticas como abióticas, las cuales pueden estar influyendo en la síntesis de estos compuestos en el ambiente natural.

1.5 Objetivos

1. Validar si la concentración y síntesis de halometanos es directamente proporcional a las abundancias y tasas de crecimiento de bacterias marinas que se encuentran en el medio natural.
2. Determinar qué variables ambientales pueden influir en la síntesis de halometanos.
3. Determinar si existe una relación entre la concentración de halometanos con los grupos microbianos, presentes en el medio natural.

1.6 Preguntas de investigación

1. ¿Existe una relación entre la abundancia y tasa de crecimiento de las bacterias marinas y la síntesis de halometanos en el medio natural?
2. ¿Qué variables ambientales se relacionan con la concentración de halometanos en el medio natural?
3. ¿Cómo influye la estructura de la comunidad microbiana marina en las concentraciones de halometanos en el medio natural?

Capítulo 2. Metodología

2.1. Área de estudio

Entre enero y diciembre de 2015 se realizó la toma de muestras de datos físicos, químicos y biológicos, en el muelle Scripps Pier en La Jolla, California, EE. UU. ($32^{\circ} 53'N$, $117^{\circ} 15'W$), el cual se encuentra influenciado por el sistema adyacente de la corriente de California (Bakun, 1973) (Figura 1).



Figura 1 Área de estudio, muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU. ($32^{\circ} 53'N$, $117^{\circ} 15'W$).

2.2 Muestreo de agua de mar *in situ* (grupo de variables ambientales 1)

Se analizaron datos de 51 muestras de agua de mar superficial (~ 1 m de profundidad) colectadas en la estación del muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A, del 22 de enero al 21 de diciembre del año 2015. Estas muestras contienen datos de variables ambientales físicas, químicas y biológicas, las cuales fueron tomadas semanalmente (dependiendo de las condiciones meteorológicas del área de estudio) ver Figura 2. Para facilitar el análisis de estos datos, se separaron las distintas variables en dos grupos: variables ambientales 1 y variables ambientales 2. Las variables del grupo 1 incluye los datos tomados directamente del agua de mar, mientras que las variables del grupo 2 corresponde a aquellas variables que se tomaron del Programa de acceso a datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP), el cual se describe en la sección 2.3 (Figura 3).

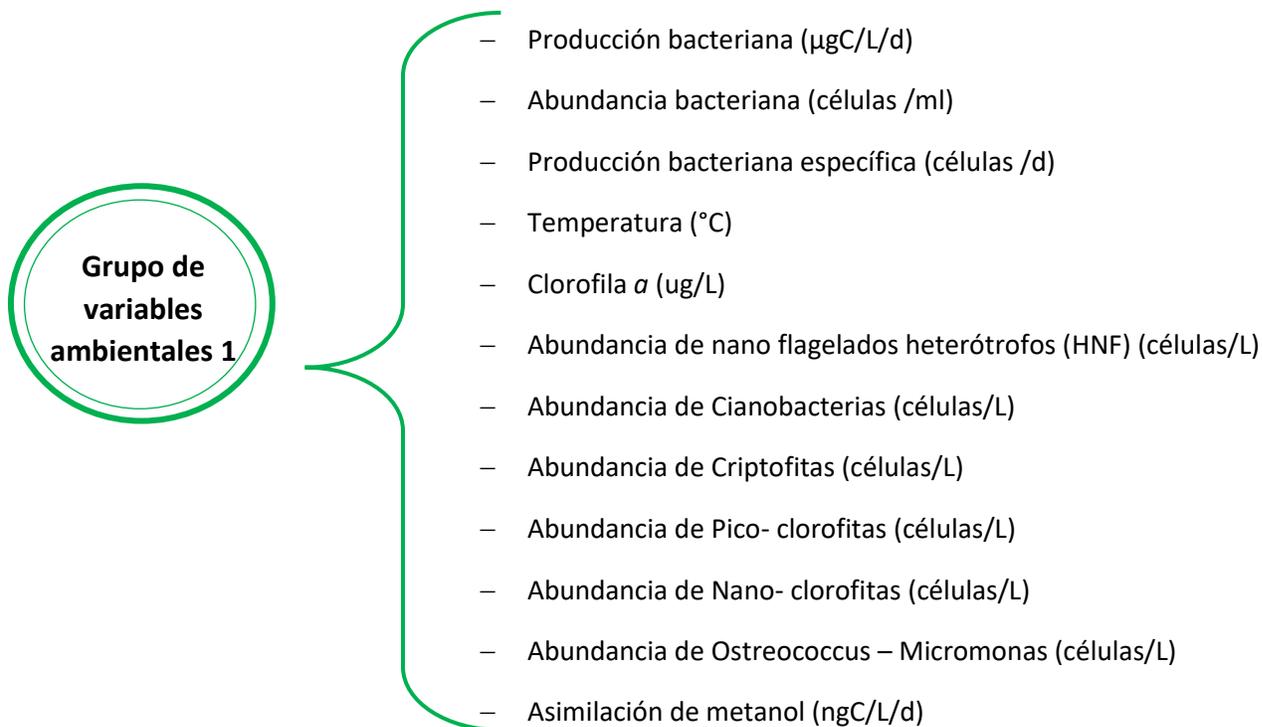


Figura 2. Grupo de variables ambientales 1, tomadas *in situ* en el muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., cada variable posee unidades específicas de medición.

2.2.1 Producción bacteriana

La producción bacteriana permite estimar la actividad de la comunidad bacteriana *in situ*, mediante su capacidad de incorporar el aminoácido Leucina en sus proteínas durante el crecimiento (Kirchman et al. 2009; Ducklow et al. 2012; Piontek et al. 2015; Pionteck, 2021). La producción bacteriana se midió mediante la incorporación de $[\text{H}^3]$ -leucina (Kirchman et al. 1985) usando el protocolo modificado para microcentrifugación (Smith & Azam 1992; Ducklow H. 2000). Se incubaron alícuotas de 1.7 ml por triplicado con $[\text{H}^3]$ -leucina teniendo una concentración final de 20 nM, en tubos de polipropileno estériles de 2.0 ml durante 1 hora a temperatura *in situ*. Seguidamente se añadió ácido tricloroacético (TCA) al 5% a las muestras para parar la reacción. Muestras incubadas desde su inicio con $[\text{H}^3]$ -leucina y TCA sirvieron como blancos. La incorporación de leucina se convirtió en producción de carbono asumiendo $3.1 \text{ kg C (mol de leucina)}^{-1}$ (Simon & Azam, 1989).

2.2.2 Abundancias

Para la obtención de abundancia de células bacterianas heterotróficas, *Synechococcus*, *Prochlorococcus* y picoeucariotas, se colectaron muestras de 1.5 ml de agua de mar por duplicado, y se conservaron con glutaraldehído (concentración final al 1%) a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, las muestras se tiñeron con SYBR® Green I (ThermoFisher Scientific) y se analizaron por citometría de flujo (Accuri, BD Biosciences) como lo describe Gasol & del Giorgio, 2000.

2.2.3 Clorofila α

Para obtener las concentraciones de clorofila α , se filtró agua de mar a través de un filtro de fibra de vidrio (GF/F) de $0.7\text{ }\mu\text{m}$. Posteriormente se realizó la extracción sumergiendo los filtros en 10 ml de acetona al 90% durante 24 horas en oscuridad, para determinar las concentraciones se utilizó un fluorómetro Turner 10 AU calibrado (Wilson et al., 2020)

2.3 Muestreo (grupo de variables ambientales 2)

Se obtuvieron bases de datos de libre acceso del Programa de acceso a datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP), que es un servidor de datos de la Oficina Nacional de Administración Oceánica (NOAA), el cual toma datos oceanográficos (por ejemplo, datos de satélites y boyas), de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A. <https://erddap.scoos.org/erddap/tabledap/HABs-ScrippsPier.html>. En este trabajo, contamos con bases de datos de 32 muestras para cada una de las variables ambientales (físicas, químicas y biológicas), con registro de datos semanales a partir del 26 de enero al 21 de diciembre del año 2015, para esta base de datos el número de muestras se reduce, debido a que en algunos casos los datos no fueron registrados por parte de los sistemas remotos con los que fueron tomados (boyas, satélites) (Figura 3).

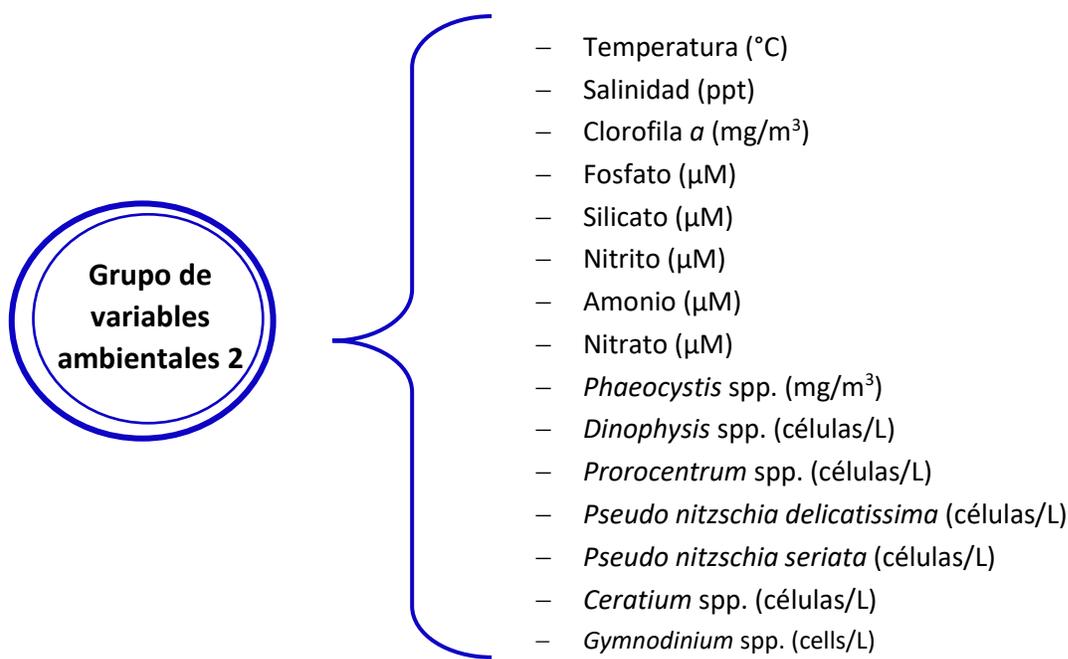


Figura 3 Grupo de variables ambientales 2, las bases de datos se tomaron del Programa de acceso a datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP), descargando los datos del muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., cada variable posee unidades específicas de medición.

2.4 Concentraciones de halometanos

Las concentraciones de halometanos se midieron en el muelle Scripps Pier, donde se encuentra el sistema de preconcentración criogénica conocido como “Medusa” (Prinn et al., 2000; Prinn et al., 2018; Wilson et al., 2020), el cual realiza la medición de una amplia gama de gases en aire, entre ellos los halometanos. Este sistema se encarga de tomar muestras de aire cercano a la interfaz con el mar, para la determinación de las concentraciones de gases mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC-MS), registrando datos diarios cada 2 horas. Para este trabajo, contamos con datos de 7 compuestos halogenados, colectados desde el 01 de enero hasta el 31 de diciembre de 2015, aproximadamente 12 datos por día y un total de ~ 4,000 (CH₃Br, CH₃Cl, CH₃I, CH₂Cl₂, CH₂Br₂, CHCl₃, CHBr₃) (Figura 4).

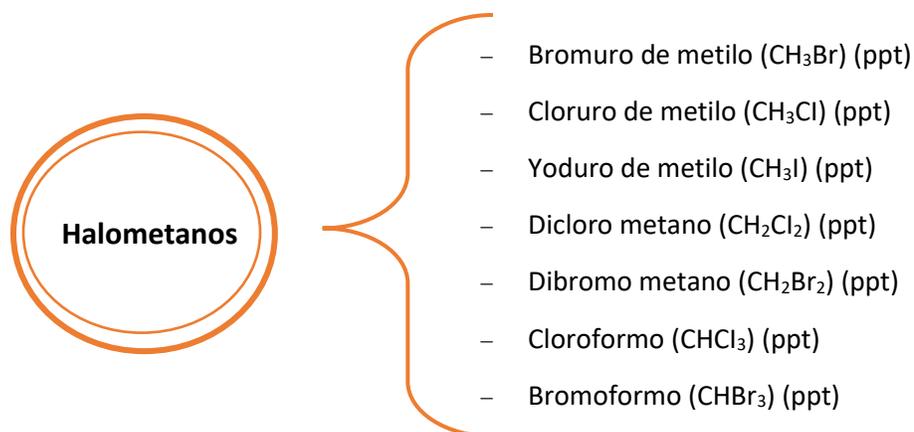


Figura 4. Compuestos halogenados, las bases de datos se obtuvieron del sistema de preconcentración criogénica “Medusa”, los datos corresponden a mediciones tomadas del muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., las unidades medición de halometanos.

2.5 Diversidad microbiana en el agua

2.5.1 Extracción de ADN y ARN

Para el análisis de diversidad de la comunidad bacteriana se colectaron muestras del plancton microbiano mediante filtración a través de filtros Supor de $0.2 \mu\text{m}$ (Pall) inmediatamente después de la toma de muestra de 3-4 litros de agua de mar, a temperatura a *in situ* (con un rango de 16 a 24°C durante todo el año). Posteriormente se almacenó el ARN (Ambion) y el ADN directamente a -80°C . El ADN se extrajo de los filtros usando el kit ZR Fungal / Bacterial DNA MiniPrep (investigación ZYMO) siguiendo las pautas del fabricante después de una digestión inicial de lisozima de 45 minutos a una temperatura de 37°C y una digestión con proteinasa K de una hora (20 mg ml^{-1} final) a una temperatura de 55°C . El ARN se extrajo de un segundo conjunto de filtros utilizando el kit de aislamiento de ARN PowerWater® (MO BIO) siguiendo las pautas del fabricante. El cDNA se sintetizó a partir de $1 \mu\text{L}$ de muestra de RNA usando el kit de síntesis de cDNA Maxima First strand (Thermo Fisher Scientific) siguiendo las pautas del fabricante con un tratamiento de DNasa optimizado de 30 minutos para la ausencia insegura de DNA en las muestras.

2.5.2 Secuenciación y análisis de rRNA / rDNA 16S

Las concentraciones totales de ADNc y ADN se cuantificaron mediante qPCR. La amplificación por PCR con cebadores específicos del gen de ARNr 16S bacteriano (región V4-V5) 515F-Y y 926R (Parada et al., 2016) fue seguida de una PCR anidada con cebadores que se adaptaron con códigos de barras para identificar diferentes muestras. Posteriormente, los productos se purificaron con perlas magnéticas Agencourt AmPure XP (Beckman Coulter). La secuenciación de PGM de Ion Torrent se realizó como se describe por Stark et al., 2015. Todas las lecturas se procesaron utilizando el pipeline Quantitative Insight Into Microbial Ecology (QIIME 2). Después de la demultiplexación, se controló la calidad de las secuencias y se eliminaron las quimeras utilizando DADA2. Las asignaciones de taxonomía de las variantes de secuencia de amplicones de (ASV) se realizaron utilizando clasificadores Naïve Baye previamente entrenados en la base de datos de secuencias de longitud completa SILVA 132 99% OTUS (Figura 5).

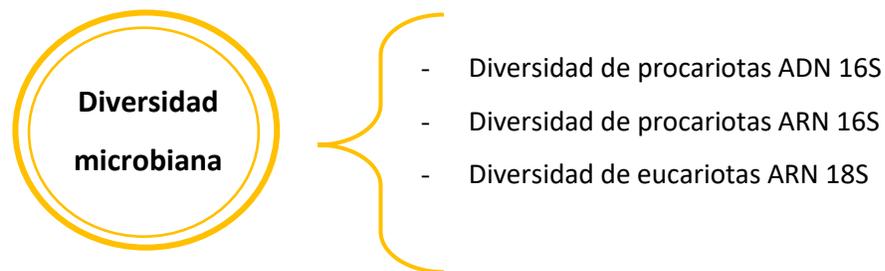


Figura 5. Diversidad de grupos procariotas y eucariotas, las cuales se obtuvieron a partir de la toma de muestras de agua in situ en el muelle Scripps en La Jolla, California, EE. UU., y procesadas posteriormente en laboratorio.

Capítulo 3. Resultados

Se graficaron cada una de las variables ambientales tanto para el grupo de variables ambientales 1, grupo de variables ambientales 2, y concentración de halometanos, con el objetivo de observar de manera visual el comportamiento durante todo el año 2015 de cada variable ambiental y de los 7 compuestos halogenados. En el caso del grupo de variables ambientales 1, se graficaron datos semanales teniendo un total de 51 datos. En el caso del grupo de variables ambientales 2, se graficaron datos semanales teniendo un total de 32 datos. Para las figuras de concentraciones de halometanos, estos se graficaron con los datos tomados cada 2 horas, teniendo un total de ~ 4,000 para cada halometano. Cabe destacar que para el grupo de variables 1, se cuenta con una variable que es la asimilación de metanol, sin embargo, debido a que no se considera relevante para el análisis, se procedió a eliminar del análisis. En el caso de las bases de datos de variables ambientales 2, se cuenta con datos de nitrito y grupos fitoplactónicos como: *Phaeocystis* spp., *Dinophysis* spp., *Prorocentrum* spp., *Pseudo nitzschia delicatissima*, *Pseudo nitzschia seriata*, *Ceratium* spp., *Gymnodinium* spp. Debido a que el nitrito y los grupos fitoplanctónicos presentaban en su mayoría valores de 0, no se consideraron para el análisis.

3.1 Variables ambientales 1

Se realizaron gráficas para poder observar el comportamiento de cada una de las variables ambientales a lo largo del año 2015, visualizar el comportamiento de las variables durante diferentes temporadas a lo largo de todo el año (Figura 6 a Figura 16). Los datos se obtuvieron a partir del muestreo semanal de cada una de las variables tomando muestras de agua de mar superficial (~ 1 m), además de muestra de agua de mar algunas variables fueron tomadas *in situ*.

Las variables como, abundancia bacteriana (Figura 6), clorofila *a* (Figura 7), cianobacterias (Figura 8), picoclorofitas (Figura 9), *Ostreococcus* y *Micromonas* (Figura 10), mostraron un aumento en abundancia y concentración durante los meses de primavera. Por otro lado, la temperatura (Figura 11), la producción bacteriana específica (Figura 12), abundancia de nano flagelados heterótrofos (Figura 13), criptofitas (Figura 14), nano- clorofitas (Figura 15) presentaron un aumento en abundancia durante los meses de verano.

Durante el otoño las variables ambientales que presentaron una disminución en concentración y abundancia fueron la producción bacteriana (Figura 16), abundancia bacteriana (Figura 6), producción bacteriana específica (Figura 12), abundancia de cianobacterias (Figura 8), abundancia de Criptofitas (Figura 14), nano-clorofitas (Figura 15), *Ostreococcus* y *Micromonas* (Figura 10). Sin embargo, variables como la temperatura (Figura 11), clorofila *a* (Figura 7), abundancia de nanoflagelados heterótrofos (Figura 13), abundancia de pico-clorofitas (Figura 9) presentaron una disminución durante los meses de invierno.

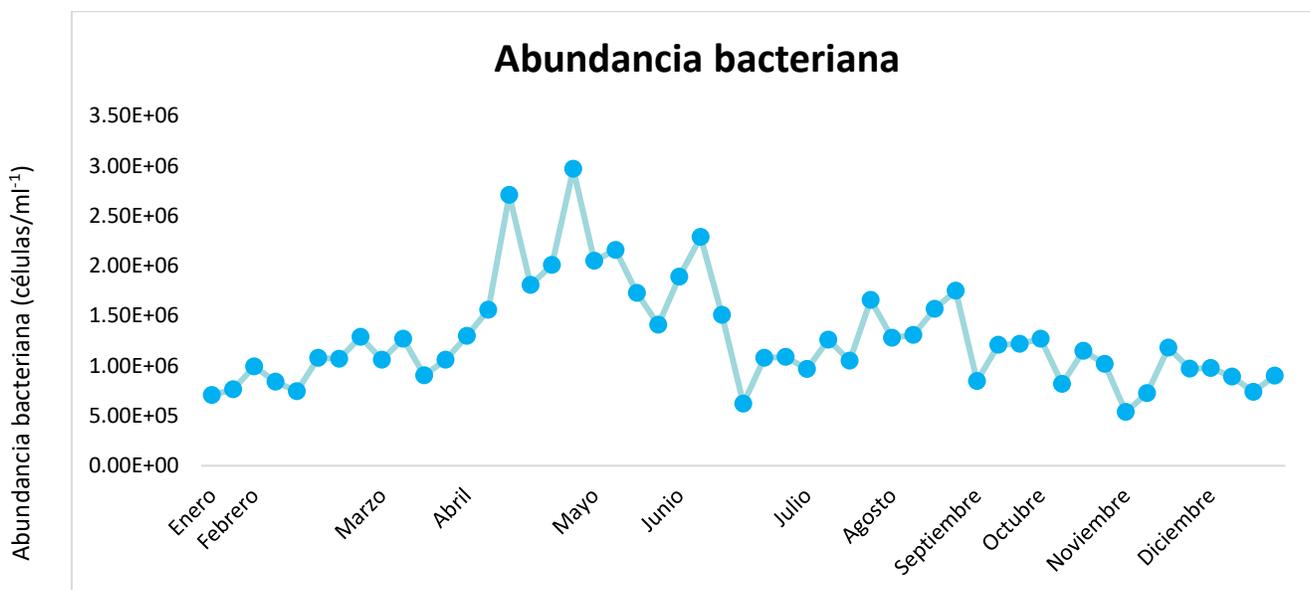


Figura 6. Datos semanales de la abundancia bacteriana (células/ml⁻¹), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

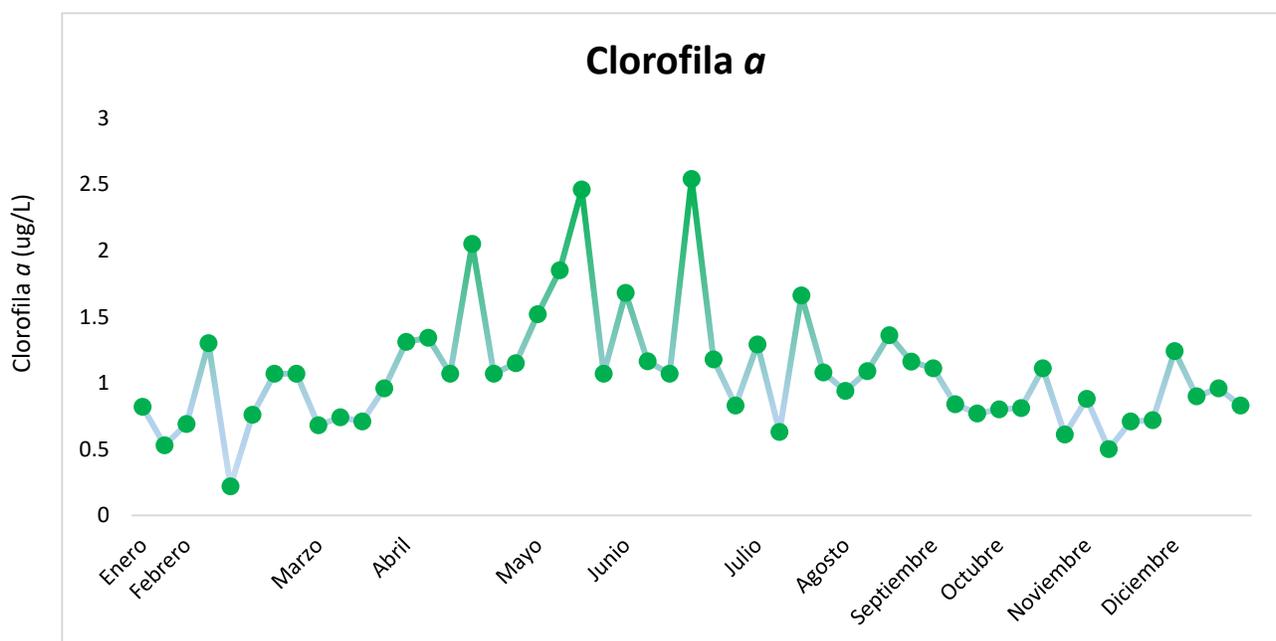


Figura 7. Datos semanales de Clorofila a (ug/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

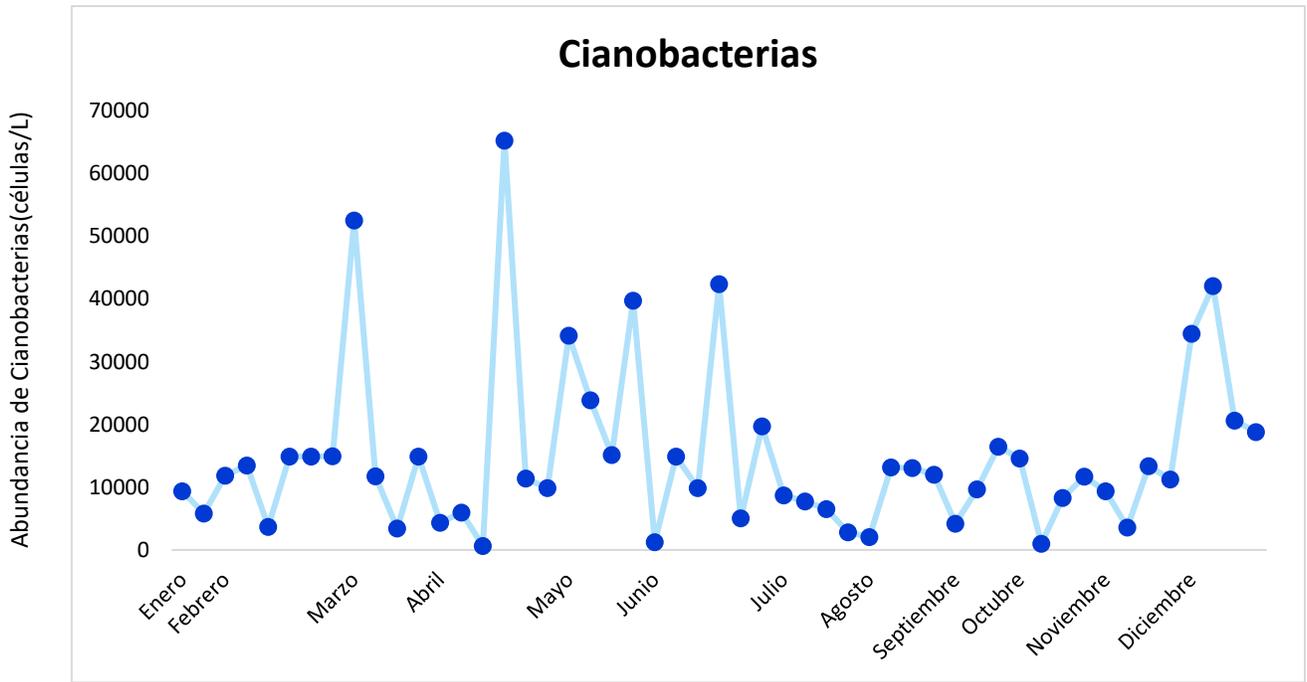


Figura 8. Datos semanales de la abundancia de cianobacterias (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

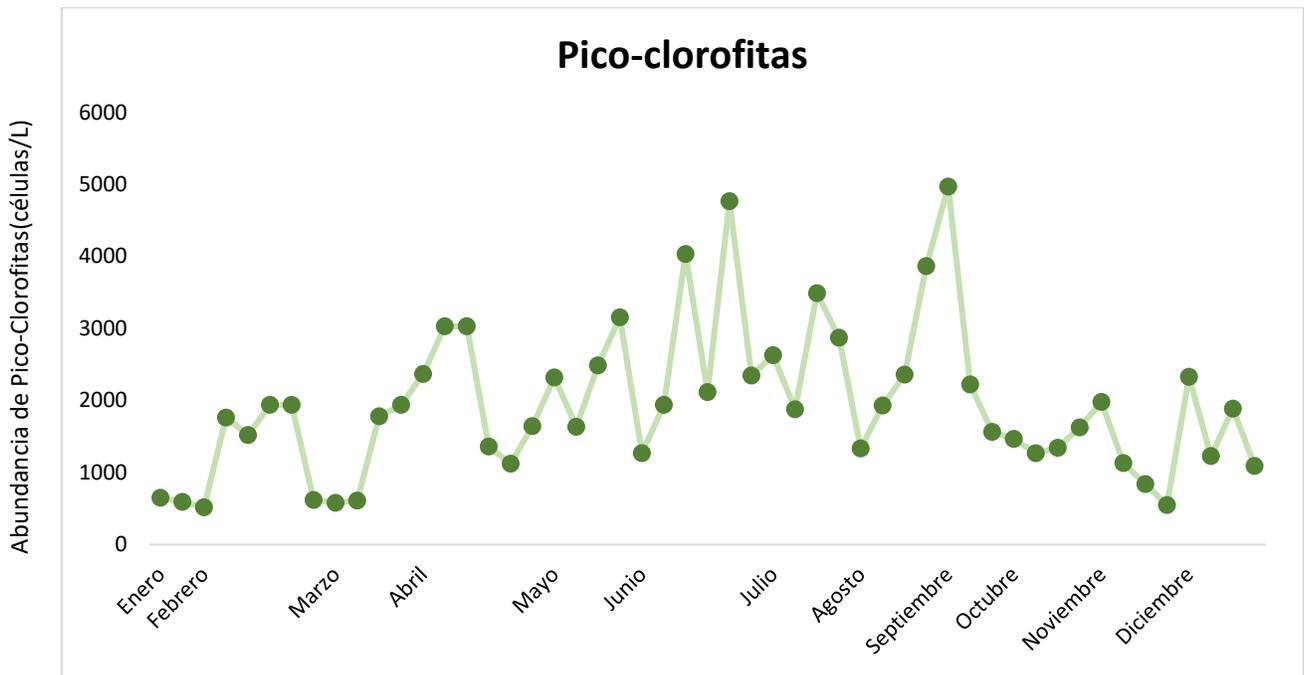


Figura 9. Datos semanales de la abundancia pico-clorofitas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

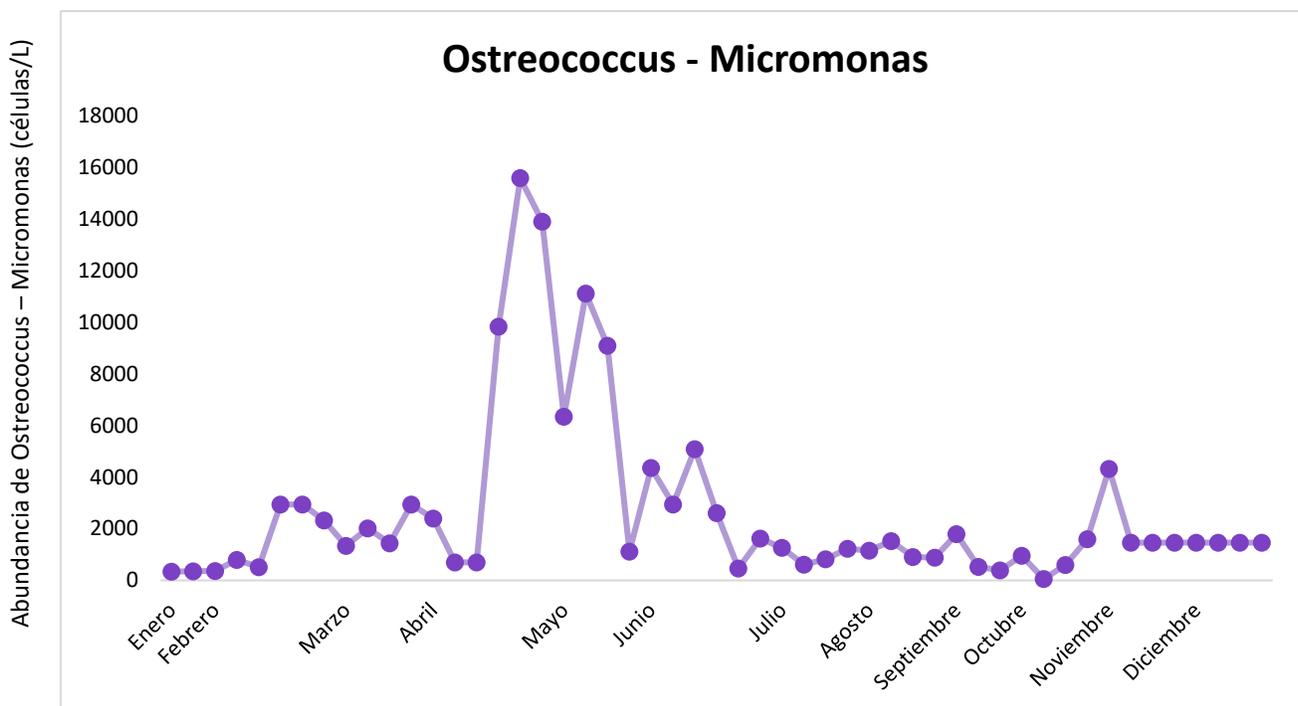


Figura 10. Datos semanales de la abundancia de ostreococcus – micromonas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

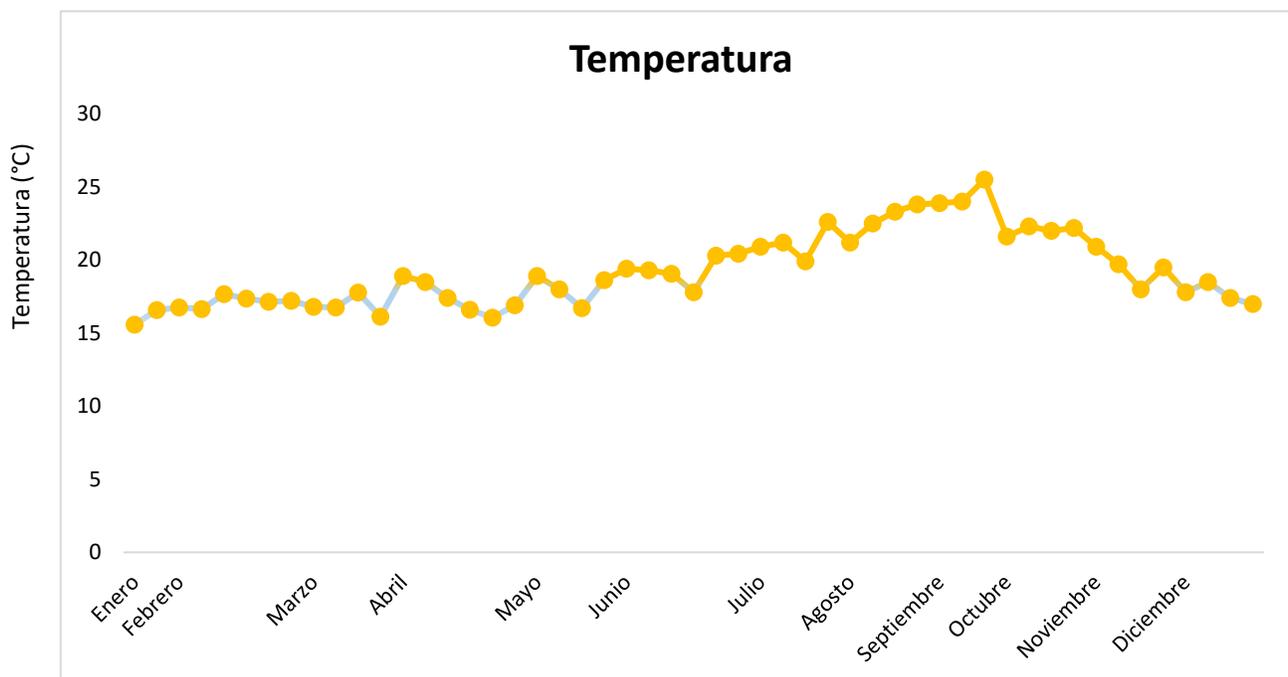


Figura 11. Datos semanales de temperatura (°C), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

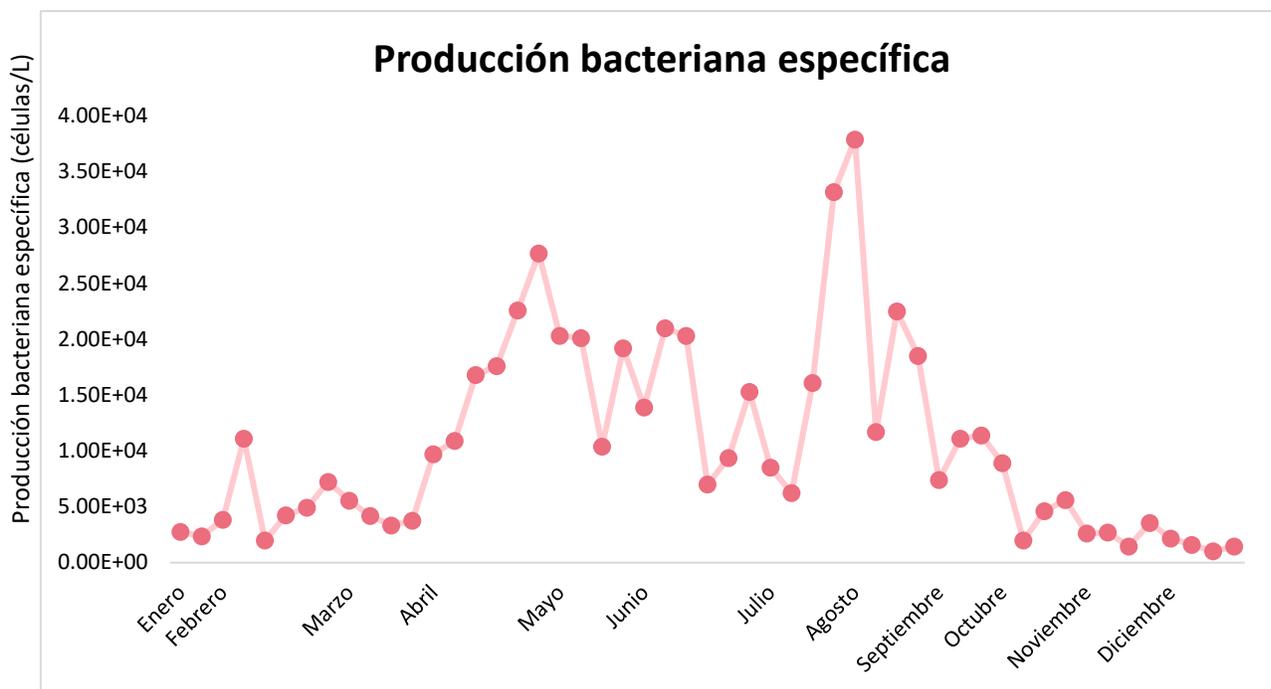


Figura 12. Datos semanales de la producción bacteriana específica (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

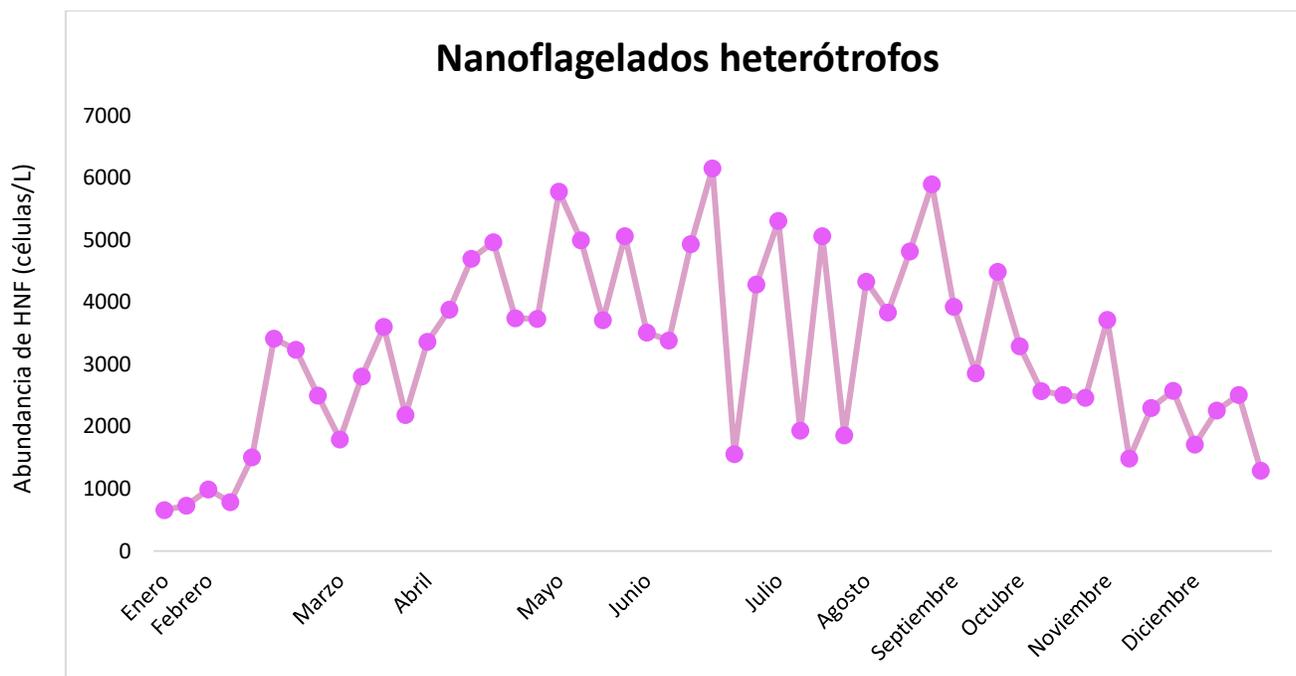


Figura 13. Datos semanales de la abundancia de nanoflagelados heterótrofos (HNF) (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

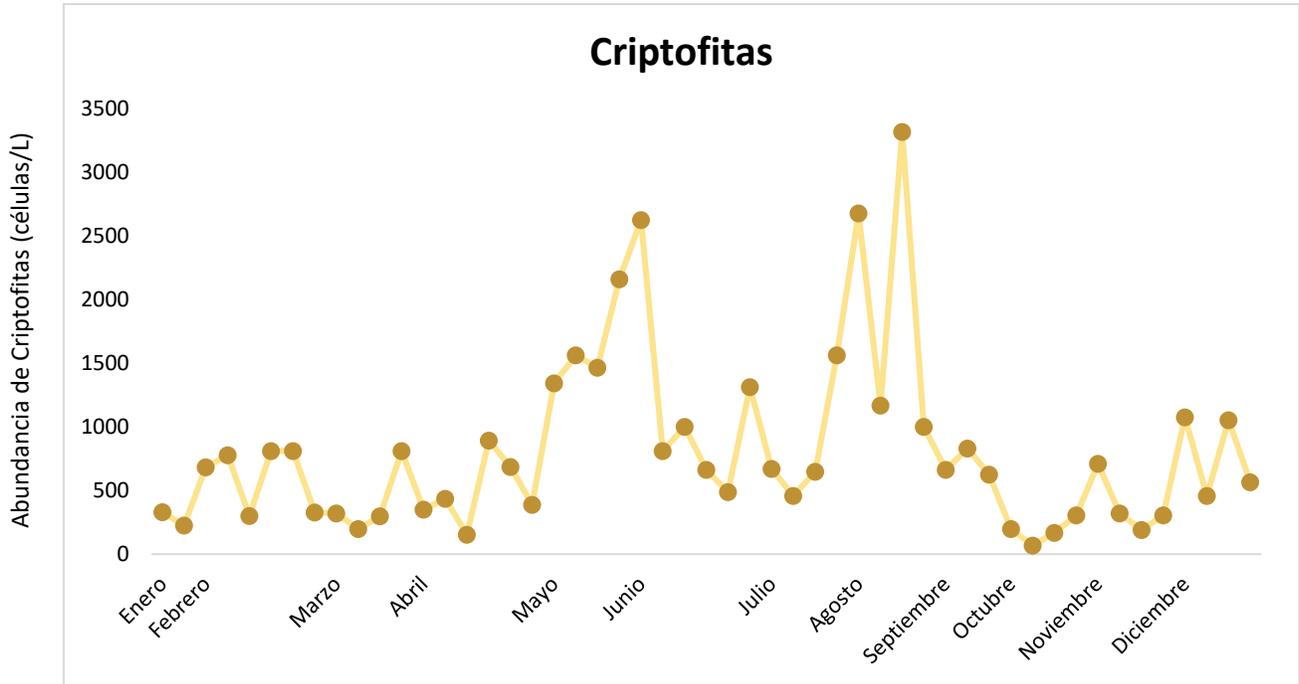


Figura 14. Datos semanales de la abundancia de criptofitas (células/L), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

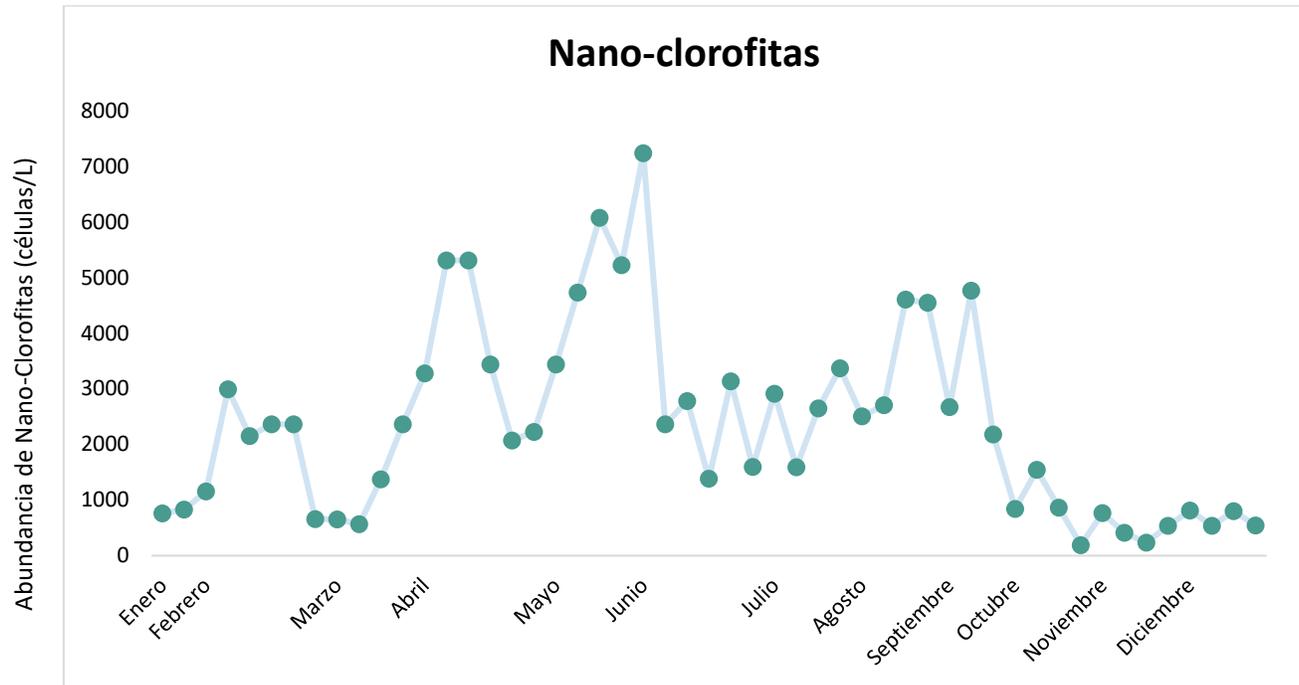


Figura 15. Datos semanales de la abundancia nano-clorofitas (células/L), a lo largo del año 2015 en la en la estación del muelle de Scripps Pier.

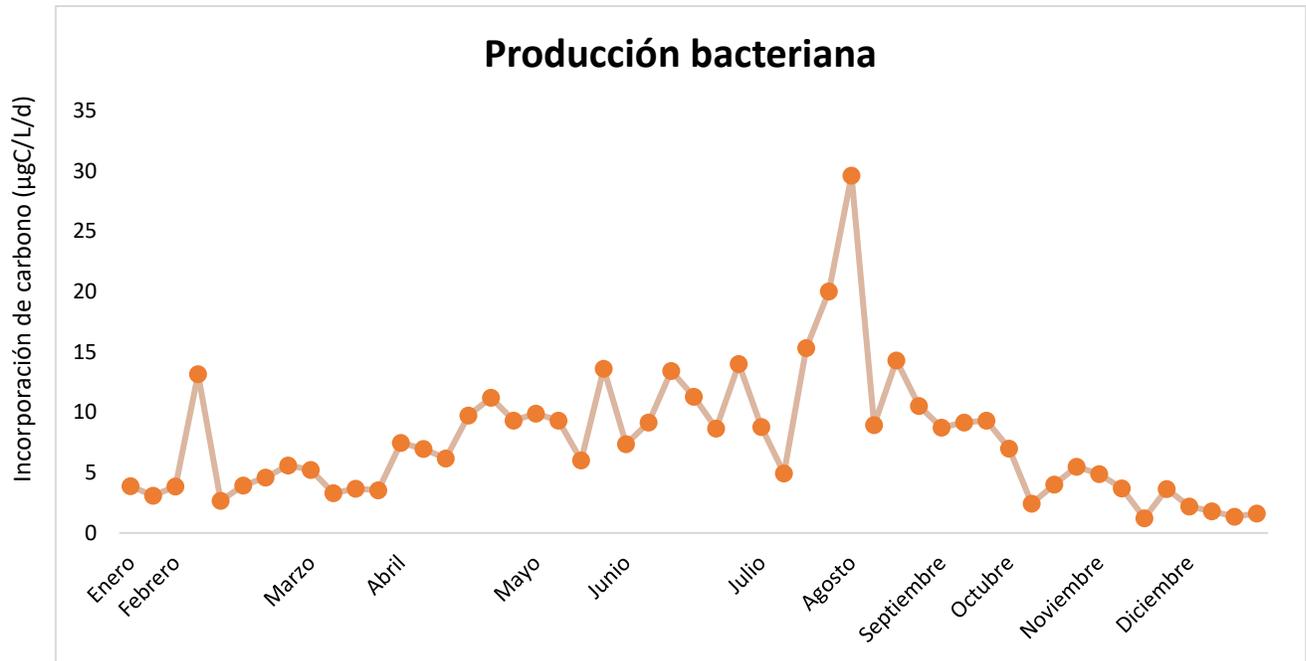


Figura 16. Datos semanales de la producción bacteriana ($\mu\text{gC/L/d}$), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

3.2 Variables ambientales 2

Se realizaron gráficos para poder observar el comportamiento de cada una de las variables ambientales 2 durante diferentes temporadas a lo largo de todo el año 2015 (Figura 17 a Figura 23). Los datos graficados fueron tomados de bases de datos de libre acceso del Programa de acceso a datos de la División de Investigación Ambiental (ERDDAP), teniendo variables ambientales físicas como la temperatura, salinidad; variables químicas como la determinación de concentraciones de nutrientes como fosfato, silicato, amonio y nitrato.

Durante la primavera las variables que presentaron un aumento o sus valores máximos de concentración y abundancia fueron, la clorofila a (Figura 17), concentraciones de nutrientes como el fosfato (Figura 18), silicato (Figura 19), amonio (Figura 20), nitrato (Figura 21). En el verano la temperatura (Figura 22) alcanzó su punto máximo, la salinidad (Figura 23) durante el invierno alcanzó su valor máximo de concentración. Por otro lado, para variables como la temperatura, salinidad, clorofila a , fosfato, silicato, amonio, nitrato, el descenso en su concentración se presentó tanto en los meses de verano, otoño e invierno.

Es notable observar que el grupo de variables ambientales 1 y el grupo de variables ambientales 2, presentan aumento - descenso en su concentración y abundancia durante diferentes estaciones del año

de muestreo. Sin embargo, en la mayoría de los casos los valores máximos de las variables se presentaron durante las estaciones de primavera y verano. Cabe destacar que existen una diferencias entre los grupos de variables ambientales 1 y 2, esto se debe a el número de muestras que se tiene para cada grupo, así como en el método de recolección, es posible observar la presencia de patrones de aumento y descenso a lo largo de todo el año; tomando en cuenta que durante el año 2015 se presentó un evento inusual en el área de estudio lo cual provocó un aumento en la temperatura del agua (Morgan et al., 2019), siendo quizá un factor importante en el comportamiento de las variables a lo largo de todo el año, el cual no es posible determinar a partir de la observación de los gráficos.

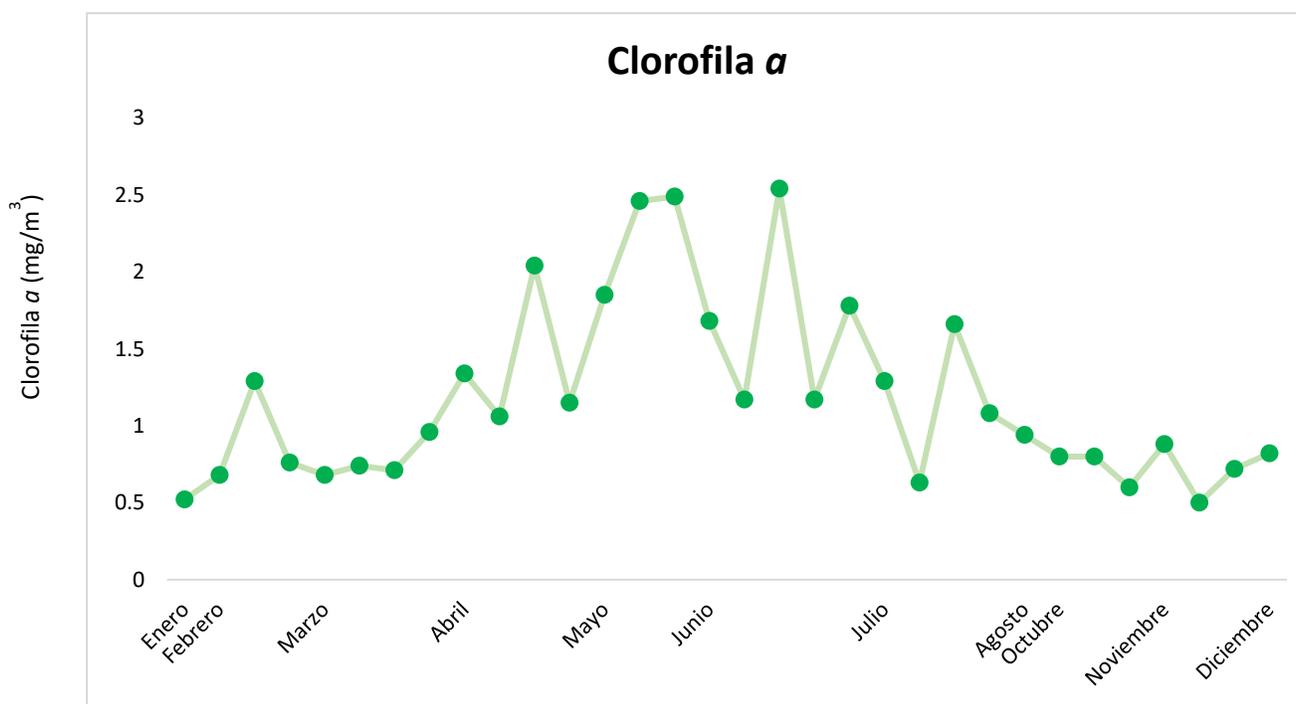


Figura 17. Datos semanales de clorofila a (mg/m³), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

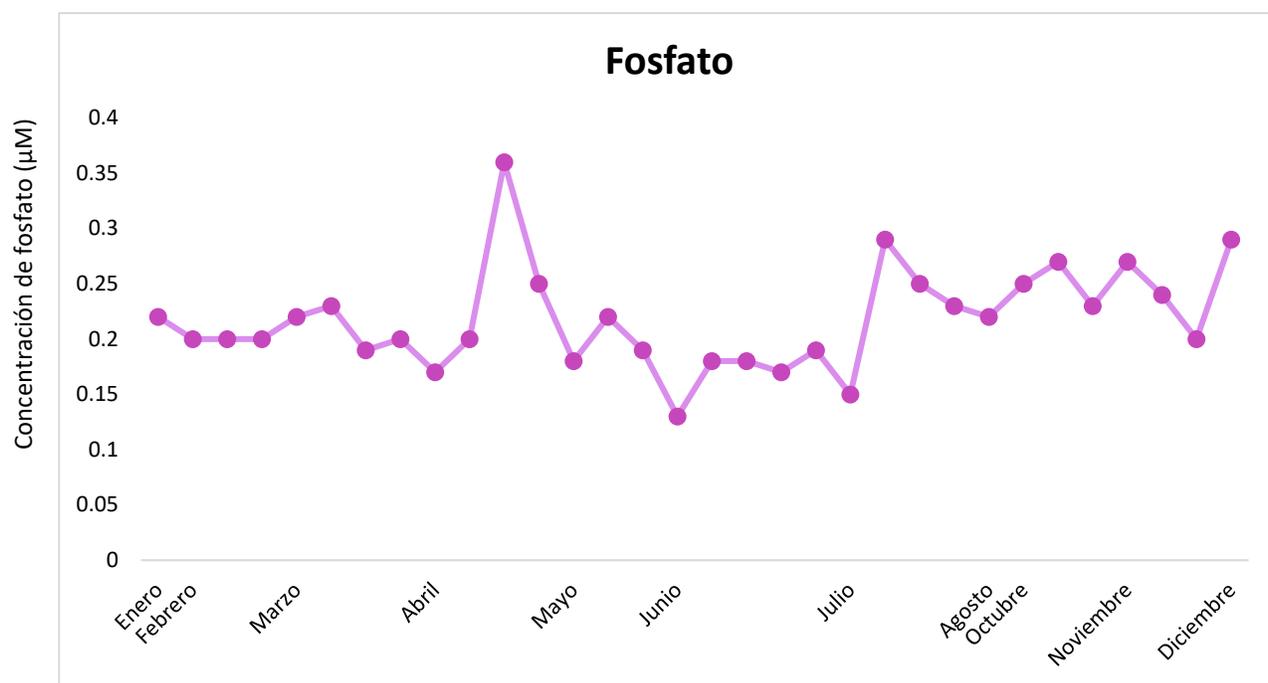


Figura 18. Datos semanales de Fosfato (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

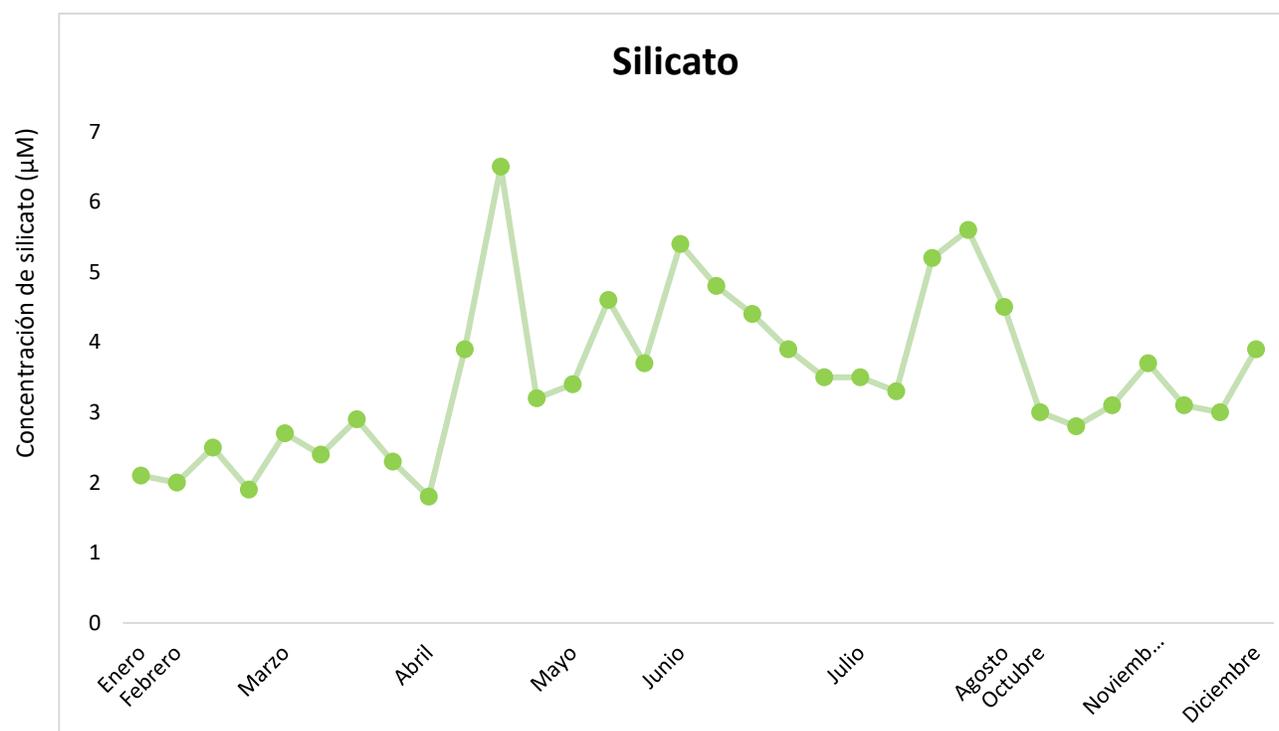


Figura 19. Datos semanales de Silicato (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

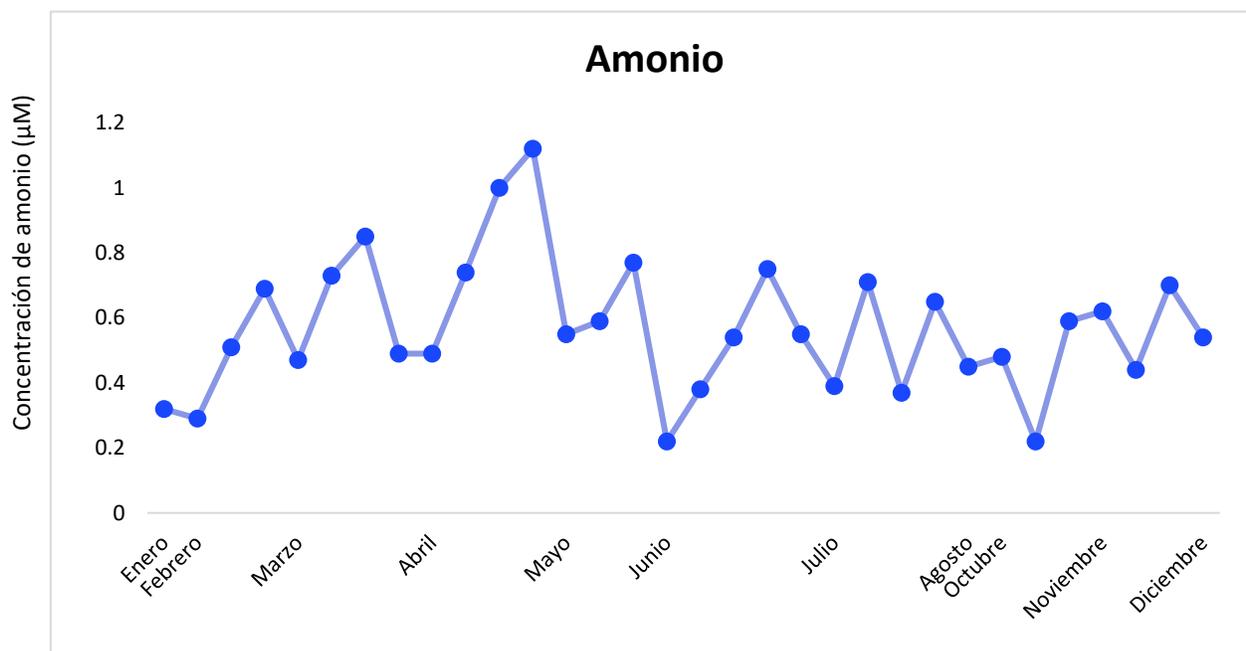


Figura 20. Datos semanales de amonio (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

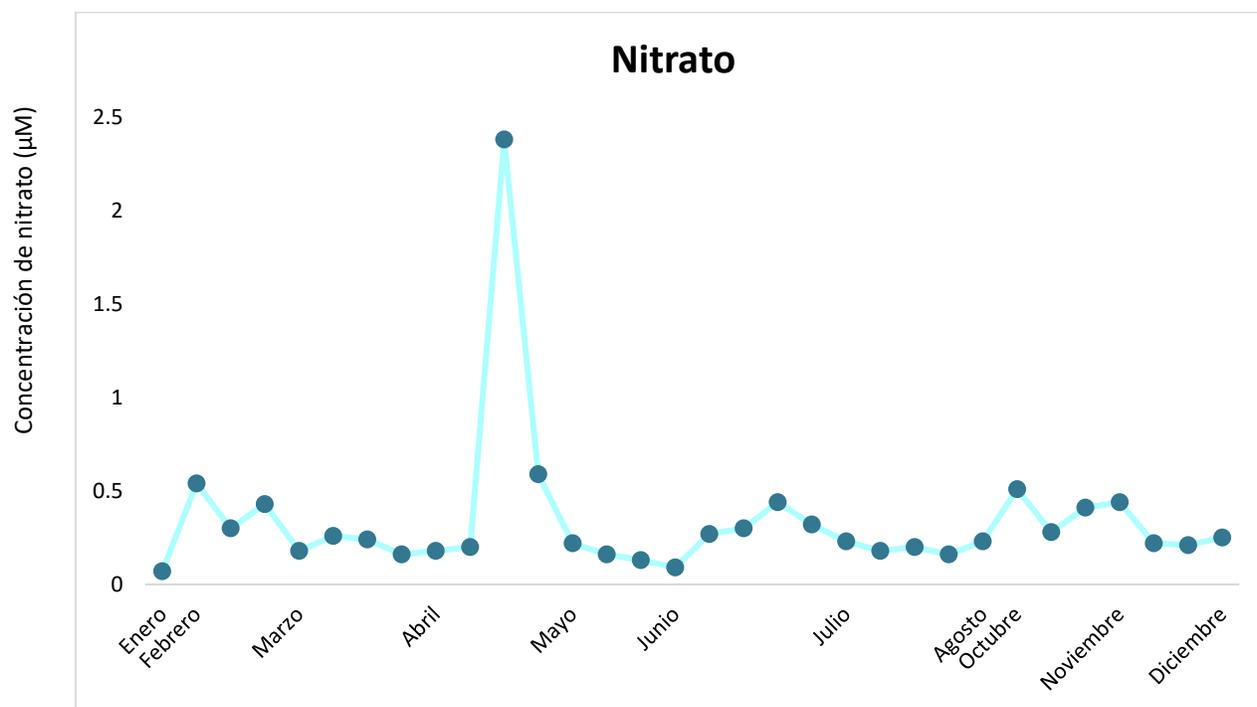


Figura 21. Datos semanales de nitrato (μM), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

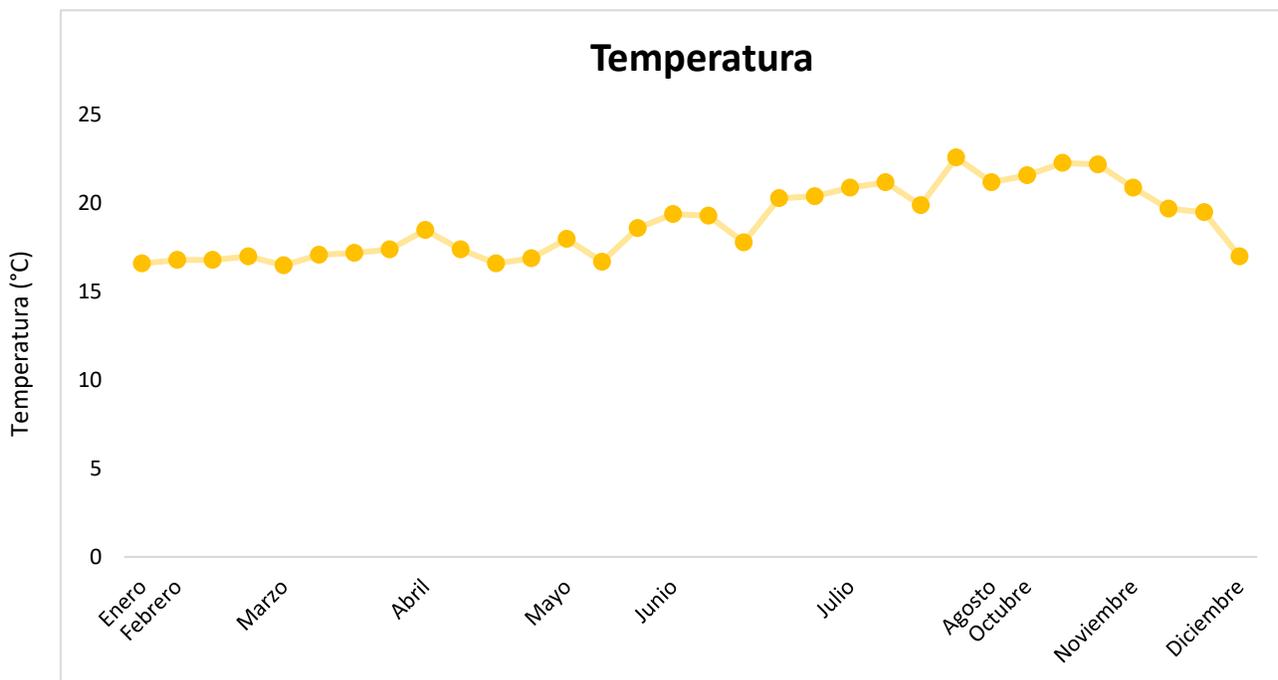


Figura 22. Datos semanales de temperatura (°C), a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

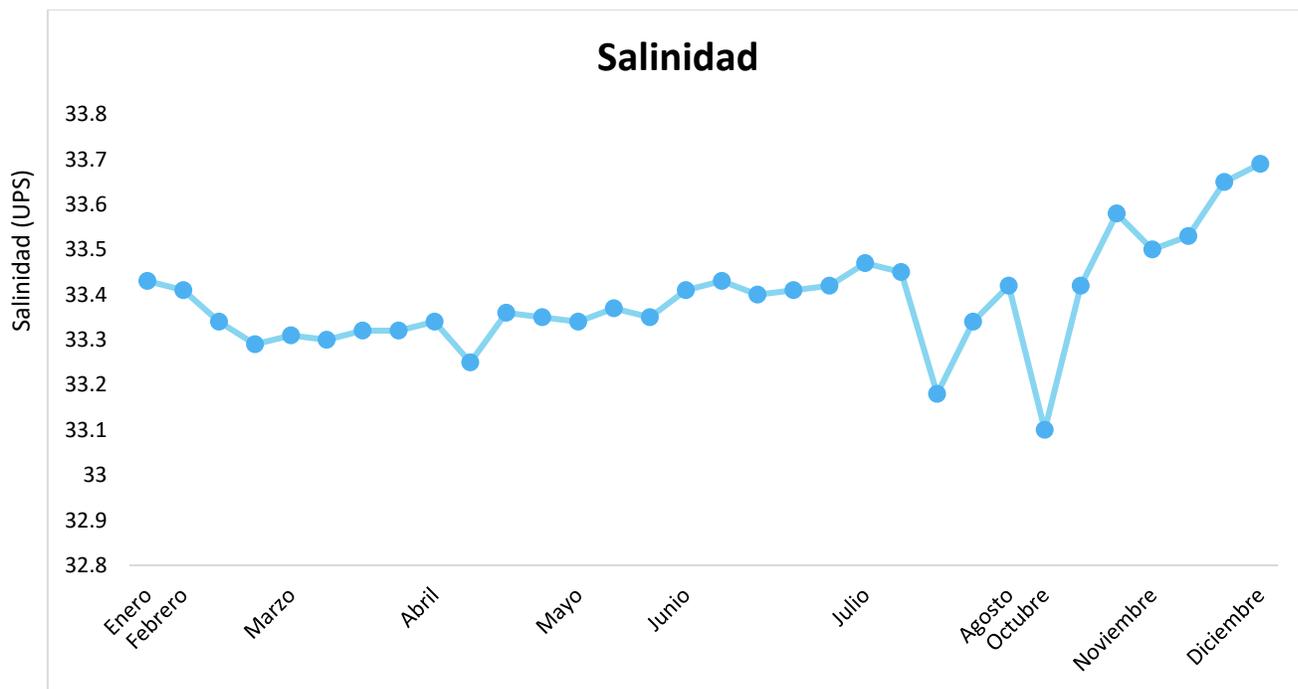


Figura 23. Datos semanales de salinidad, a lo largo del año 2015 en la estación de Scripps Pier.

3.3 Halometanos

Se realizaron gráficas para poder observar el comportamiento de cada uno de los halometanos a lo largo del año 2015, durante diferentes temporadas (Figura 24 a Figura 30). Las concentraciones de halometanos se obtuvieron a partir de la toma de muestras de aire, las cuales se midieron con el sistema de preconcentración criogénica conocido como "Medusa". El cual realiza la toma de muestra de aire a intervalos de tiempo de 2 horas, teniendo un amplio número de datos de concentración para cada uno de los halometanos (CH_3Br , CH_3Cl , CH_3I , CH_2Cl_2 , CH_2Br_2 , CHCl_3 , CHBr_3). Los halometanos presentaron un comportamiento diferente entre sí a lo largo del año 2015 (Figura 24 a Figura 30). El bromuro de metilo presentó mayor concentración durante el invierno y parte de primavera (Figura 24), durante el resto del año se mantuvo con concentraciones bajas. El cloruro de metilo presentó concentraciones constantes durante todo el año teniendo su concentración más alta durante el verano (Figura 25). Caso contrario, el yoduro de metilo presentó fluctuaciones de aumento y descenso en sus concentraciones presentando un aumento visible durante el verano y parte del otoño (Figura 26). El dicloro metano presentó durante invierno y parte de la primavera concentraciones altas (Figura 27), posteriormente presentó un descenso en las concentraciones, sin embargo, nuevamente durante el otoño se observa un aumento en su concentración. El cloroformo presentó durante todo el año fluctuaciones de aumento y descenso en sus concentraciones (Figura 28), parte del verano, durante el otoño e invierno se presentaron las mayores concentraciones. El dibromo metano presentó fluctuaciones durante todo el año (Figura 29), teniendo aumento en su concentración durante el verano y otoño. El bromoformo (Figura 30) presentó fluctuaciones la mayor parte del año teniendo aumento y descenso en su concentración, sin embargo, es posible observar que durante el verano y otoño se presentan altas concentraciones de este compuesto.

A partir de los gráficos es posible observar que todos estos compuestos halogenados se presentan en diferentes concentraciones, así como su comportamiento a lo largo del año es diferentes esto puede atribuirse a la interacción con variables ambientales, así como a su composición química y microorganismos presentes en el agua. Cabe destacar que la concentración en el aire de cada uno de los compuestos fue diferente y su permanencia en la atmósfera dependerá tanto de la concentración, su composición química y la interacción con variables ambientales.

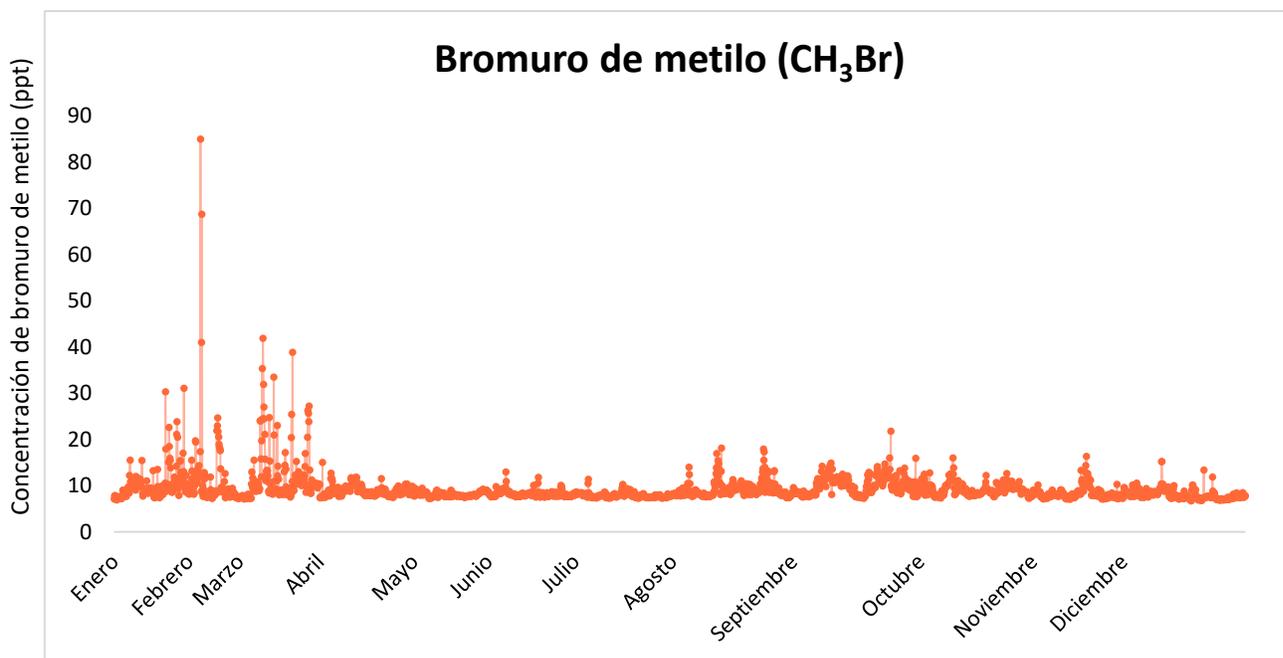


Figura 24. Datos diarios de la concentración de bromuro de metilo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

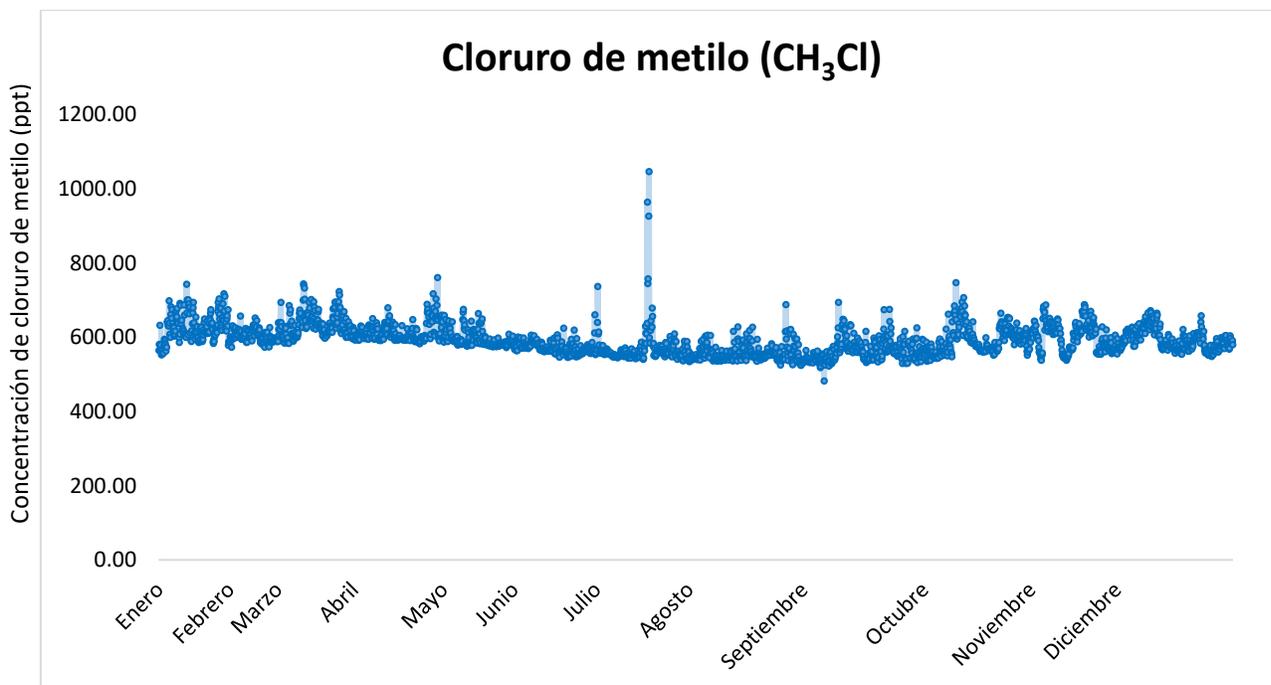


Figura 25. Datos diarios de la concentración de cloruro de metilo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

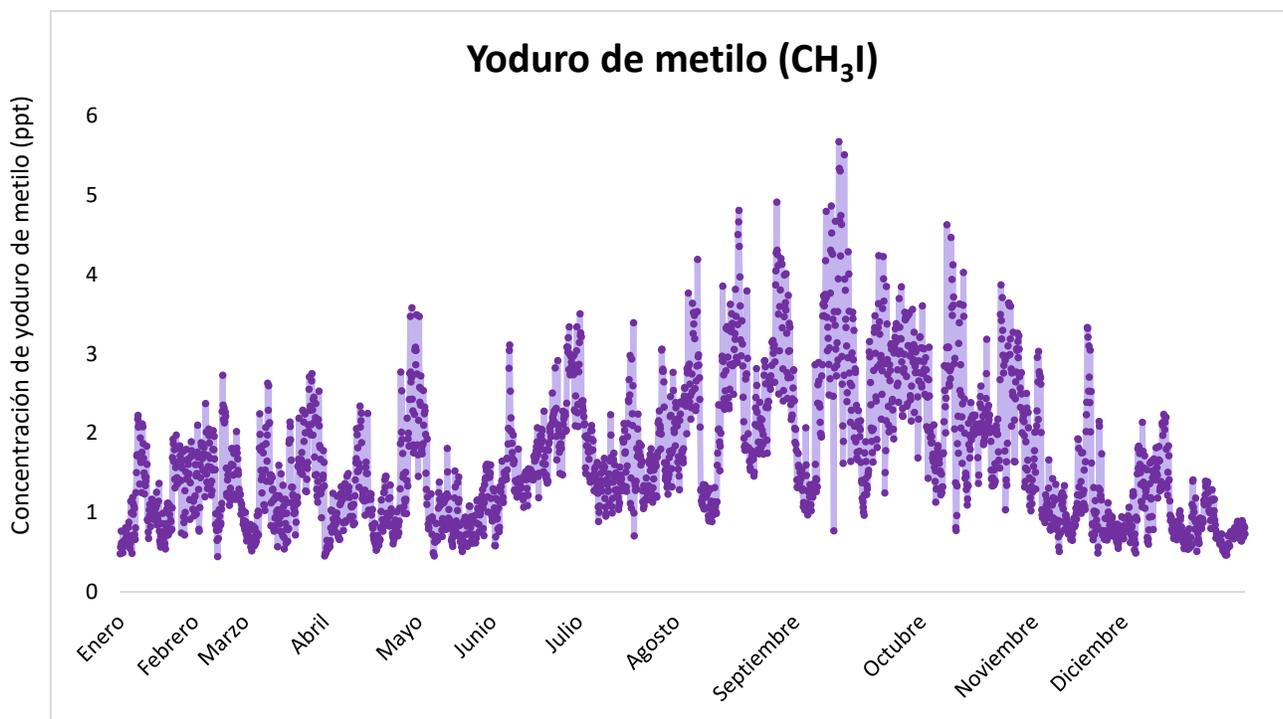


Figura 26. Datos diarios de la concentración de yoduro de metilo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

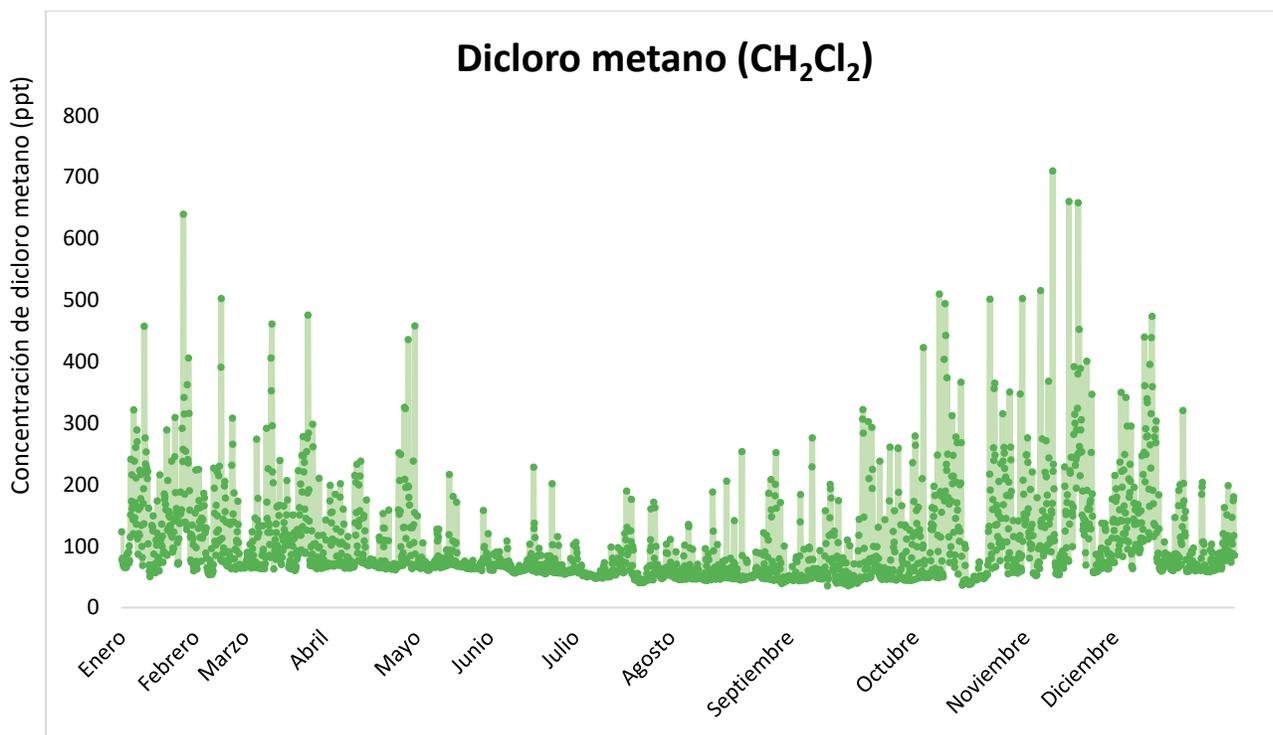


Figura 27. Datos diarios de la concentración de dicloro metano (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

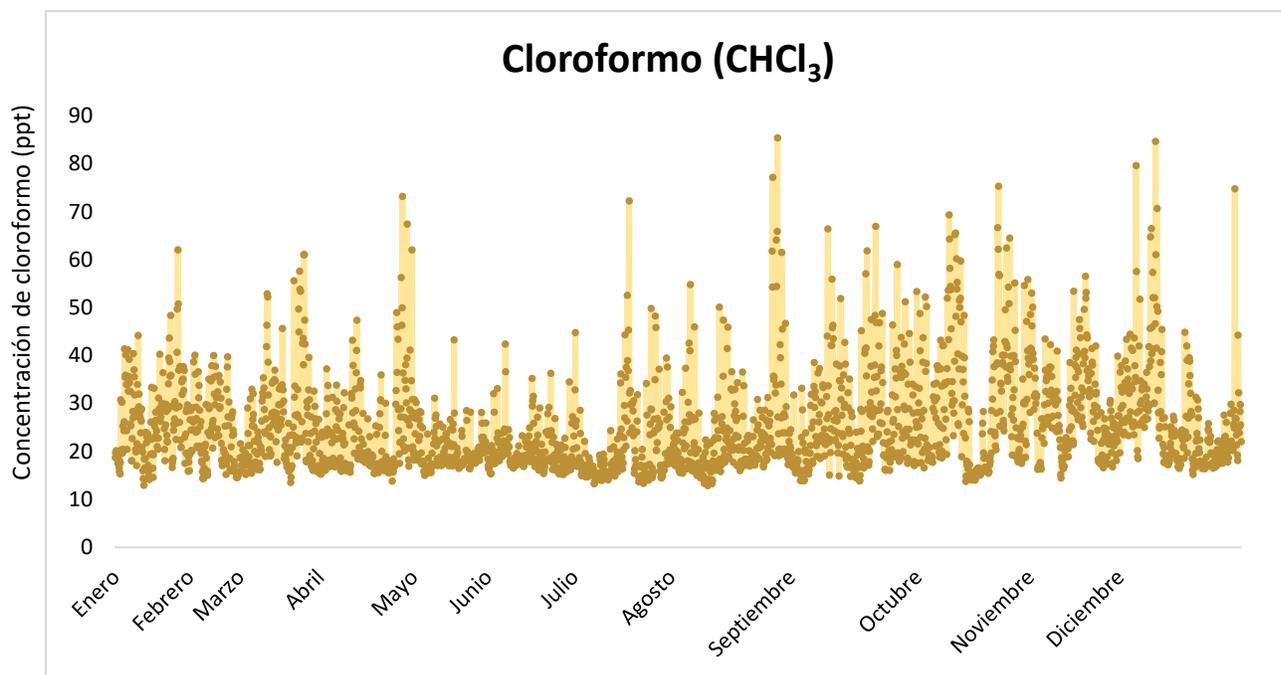


Figura 28. Datos diarios de la concentración de cloroformo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

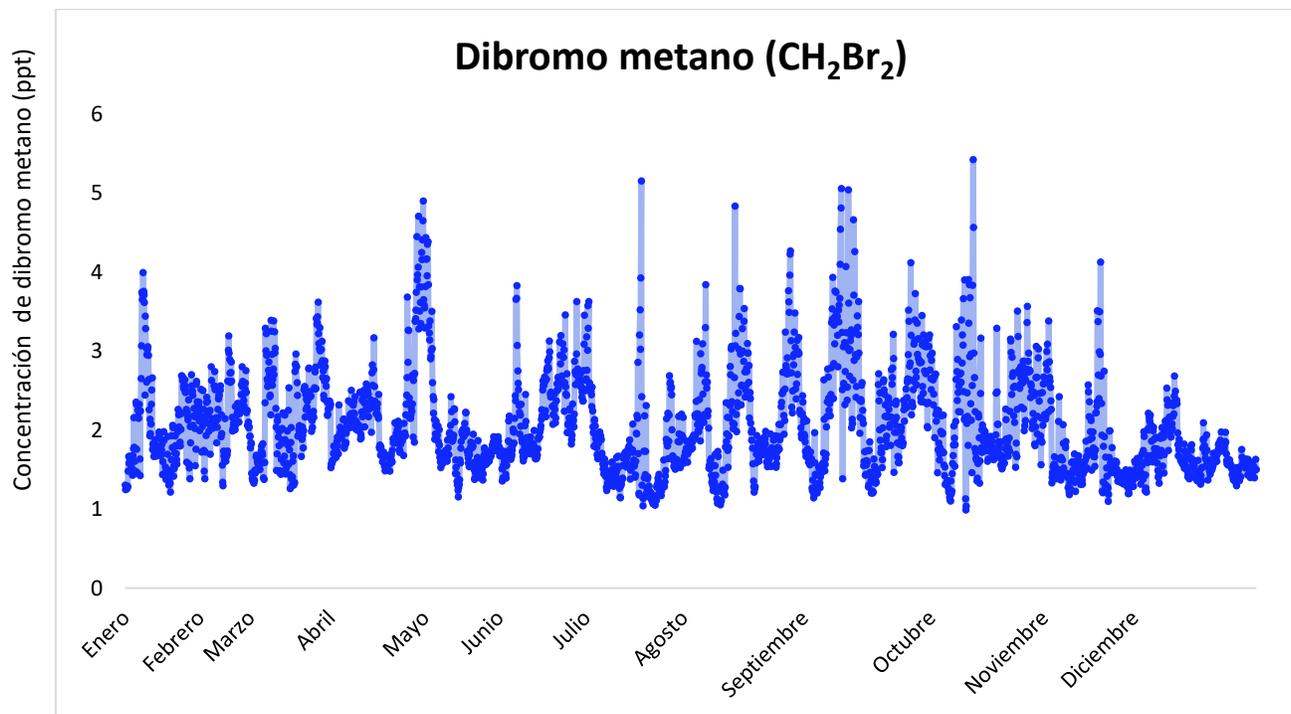


Figura 29. Datos diarios de la concentración de dibromo metano (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

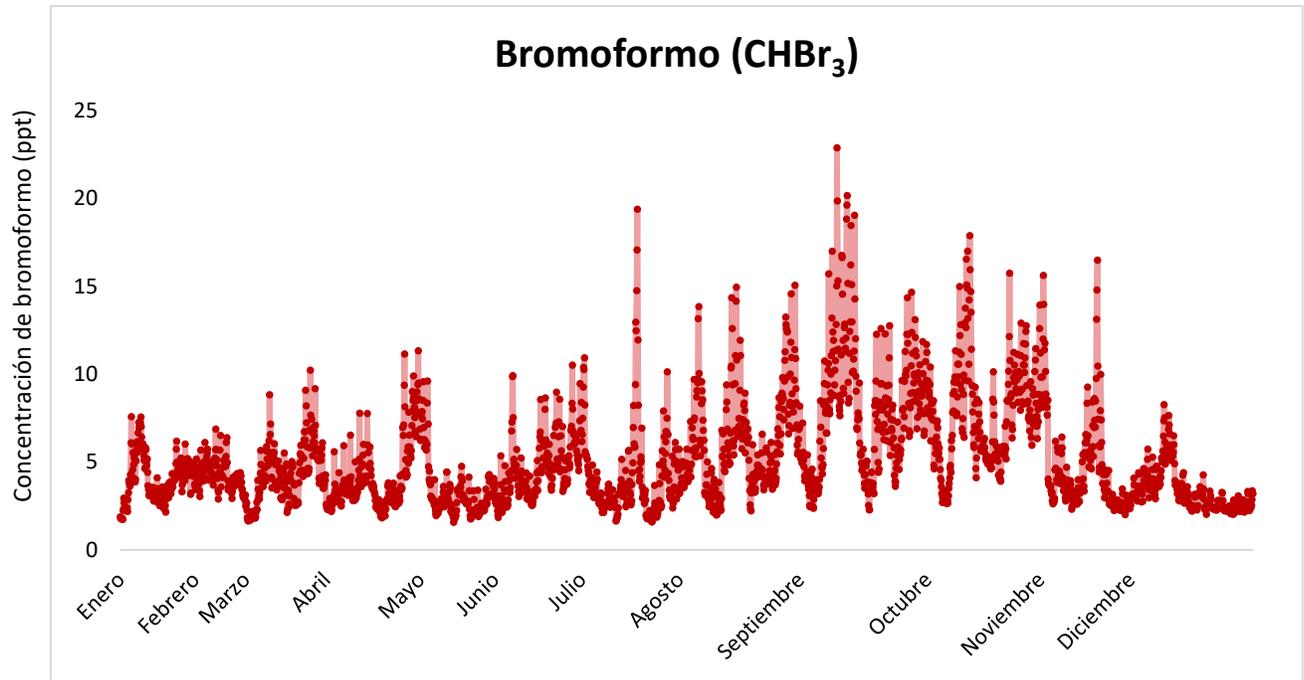


Figura 30. Datos diarios de la concentración de bromoformo (ppt), a lo largo del año 2015 en la estación del muelle de Scripps Pier.

3.4 Análisis estadístico

3.4.1 Correlaciones

Aplicando el coeficiente de correlación de *Spearman*, siendo una prueba no paramétrica con la cual es posible observar la correlación y/o asociación de dos variables. Con las correlaciones que se obtuvieron a partir del uso de esta prueba, se realizaron *heatmaps* para observar las correlaciones tanto positivas como negativas considerando solo aquellas correlaciones estadísticamente significativas teniendo un valor de p menor a 0.05, que se obtuvieron a partir de la aplicación del coeficiente de correlación de *Spearman*. Posteriormente se realizaron gráficos de dispersión de las correlaciones que fueron estadísticamente significativas para el grupo de variables ambientales 1 (Anexo A) y para el grupo de variables ambientales 2 (Anexo B). A los gráficos de dispersión se les agregó línea de tendencia, así como el valor del coeficiente de correlación (r) siendo el valor que determina la “fuerza” de la correlación entre dos variables y el valor de significancia (p) siendo el determinante de “confianza” de la correlación.

3.4.2 Correlaciones entre halometanos y variables ambientales

3.4.2.1 Variables ambientales 1

Derivado del análisis del coeficiente de correlación de Spearman, se realizó un *heatmap* para observar las correlaciones tanto positivas como negativas entre los halometanos y las variables ambientales 1 (Figura 31), las cuales, en su mayoría, se observaron correlaciones negativas entre halometanos y variables ambientales 1, posteriormente derivado de estas correlaciones se realizaron gráficos de dispersión para observar la correlación positiva o negativa, agregando los valores de r y p ; el yoduro de metilo presentó correlación positiva con la producción bacteriana y temperatura, al igual el bromoformo presentó correlación positiva con la temperatura, el dibromo metano fue el compuesto que no presentó correlación con alguna de las variables ambientales. Los compuestos halogenados como el cloruro de metilo, cloroformo, dicloro metano presentaron correlaciones negativas con la abundancia de grupos fitoplanctónicos (criptofitas, pico-clorofitas,—nano-clorofitas, así como con la producción bacteriana específica, el bromuro de metilo presentó correlaciones negativas con la abundancia de pico-clorofitas y con la clorofila a . Asimismo, la clorofila a tuvo correlación negativa con el cloroformo y el dicloro metano. En el caso del yoduro de metilo este compuesto presentó correlación negativa con la abundancia de *ostreococcus* - micromonas y dos correlaciones positivas una fue con la producción bacteriana y con la temperatura. Para este compuesto se ha reportado que la temperatura estimula la tasa de crecimiento bacteriano y como resultado se obtiene un aumento en la concentración del yoduro de metilo (Hirata et al., 2017).

3.4.2.2 Variables ambientales 2

Derivado de la obtención de correlaciones entre halometanos y variables ambientales 2 (Figura 32) se realizó el gráfico de dispersión correspondiente a cada una de las correlaciones de *Spearman* que se obtuvieron al correr esta prueba no paramétrica en *RStudio*, se realizaron gráficos de dispersión tanto de las correlaciones positivas y negativas que se obtuvieron. En su mayoría se observaron correlaciones negativas entre los halometanos y variables ambientales 2. El bromuro de metilo, el cloruro de metilo y el dicloro metano presentaron correlación negativa con el silicato. Para el cloruro de metilo se presentaron dos correlaciones negativas adicionales al silicato con la clorofila a y la temperatura. El dicloro metano, ya que además de la correlación negativa con el silicato, también presentó una correlación negativa con la

clorofila a . El yoduro de metilo presentó correlación positiva de nuevo con la temperatura (al igual que se observó con las variables ambientales 1) y así como con el nitrato, el dibromo metano y bromoformo también presentaron correlación positiva con el nitrato. El cloroformo presentó correlación positiva con el fosfato y una correlación negativa con la clorofila a .

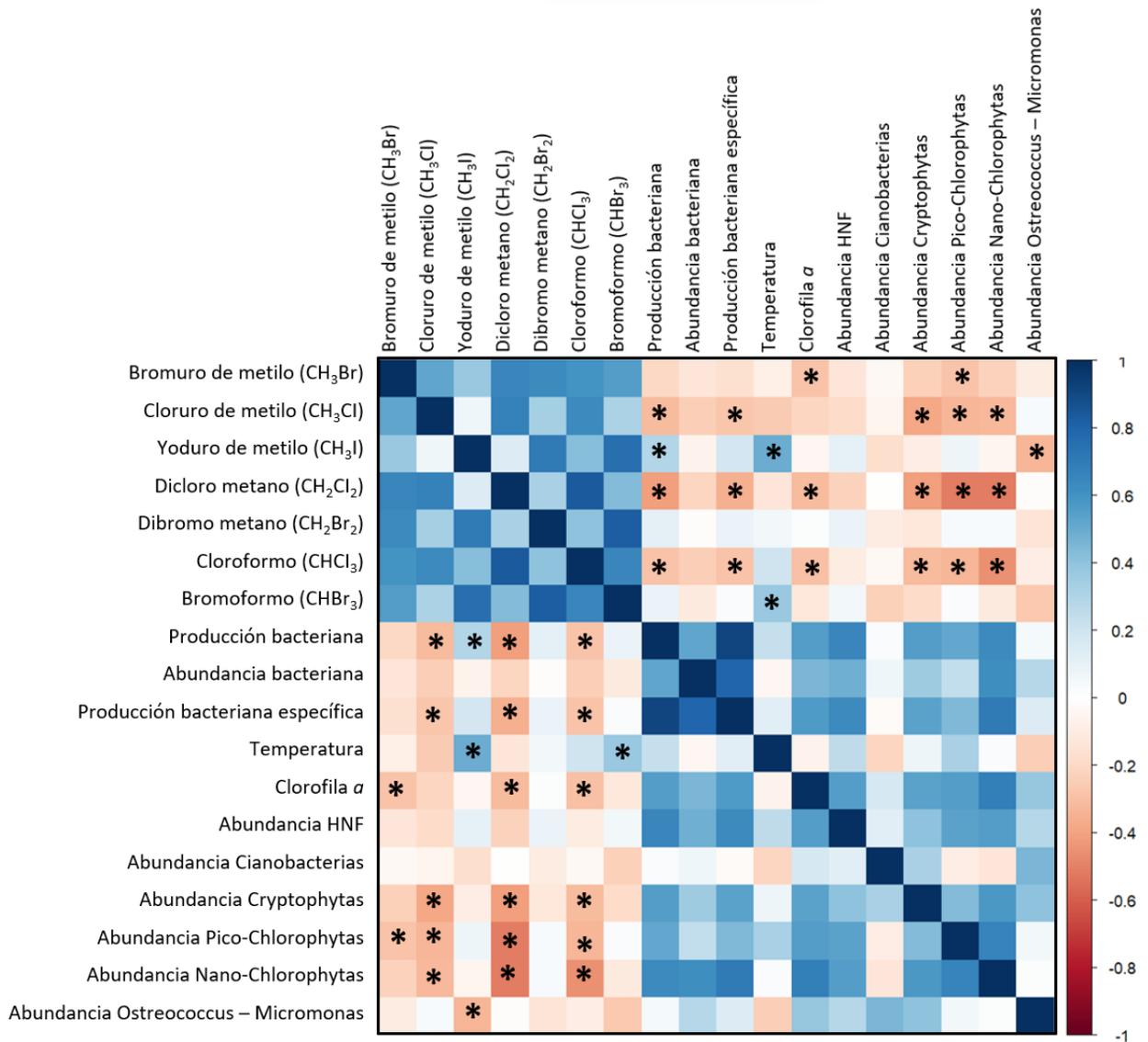


Figura 31. Heatmap, se muestran las correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y variables ambientales 1 tomadas semanalmente en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y variables ambientales. Gráficos de dispersión dónde se presentan los valores de r y p , revisar sección de Anexo A.

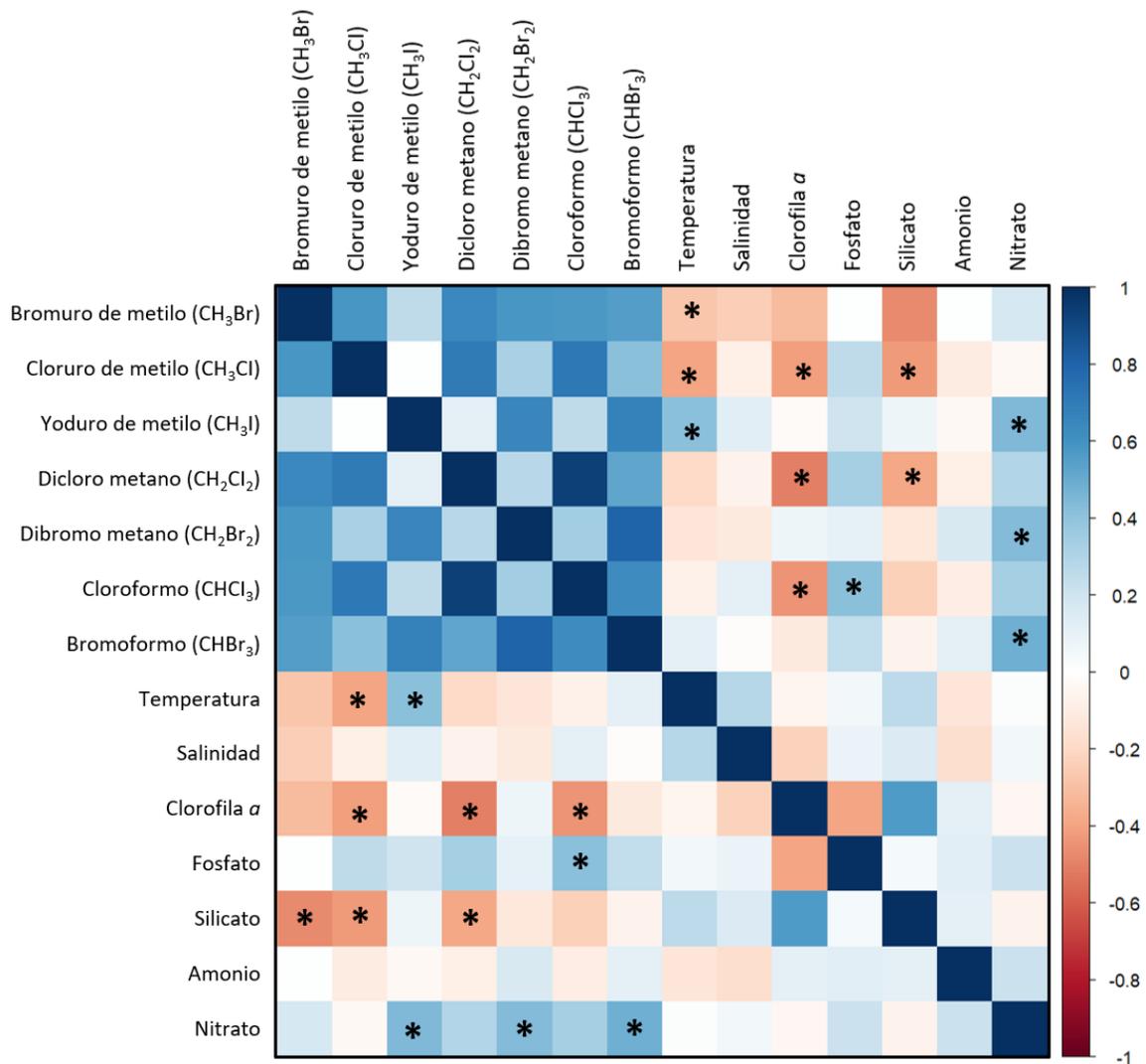


Figura 32. Heatmap, se muestran las correlaciones (r de *Spearman*) entre halometanos y variables ambientales 2 de datos de libre acceso de ERDDAP un servidor de datos de la NOAA de la estación Scripps Pier, La Jolla, California, E.U. A en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y variables ambientales. Gráficos de dispersión dónde se presentan los valores de r y p , revisar sección de Anexo B.

3.4.3 Correlaciones entre halometanos y diversidad microbiana

3.4.3.1 Diversidad 16S DNA

El análisis de 16S DNA, nos da información sobre el total de los microorganismos procariontes de cada grupo taxonómico que se encuentran dentro de la muestra. Se realizó un gráfico para representar la estructura

de la comunidad microbiana, el cual se obtuvo a partir de calcular la media anual de cada grupo y obtener el porcentaje con respecto al 100%, para observar los grupos más dominantes a lo largo del año (Figura 33).

Se realizó el *heatmap* para poder observar las correlaciones de *Spearman* entre halometanos y la diversidad 16S DNA, tomando en cuenta las correlaciones que son estadísticamente significativas presentando un valor de p menor a 0.05. El dicloro metano fue el compuesto que presentó el mayor número de correlaciones entre halometanos y grupos microbianos. En su mayoría estas correlaciones fueron positivas con los siguientes grupos: Bdellovibrionales, Clado OM182, Clado SAR11, Clado SAR202, Clado Grupo Marino B SAR324, Dadabacteriales, Grupo Marino III, Myxococcales, Rickettsiales, Rhodospirillales, Thalassobaculales y correlaciones negativas con los siguientes grupos: Balneolales, Cellvibrionales, Kordiimonadales, Rhodobacterales, Sphingobacteriales. El cloruro de metilo fue el segundo compuesto con mayor número de correlaciones, siendo estas en su mayoría positivas con grupos como: Clado OM182, Clado SAR11, Clado SAR202, Clado Grupo Marino B SAR324, Dadabacteriales, Ectothiorhodospirales, Grupo Marino III, Rhodospirillales, Thalassobaculales y correlaciones negativas con los siguientes grupos: Cellvibrionales, Flavobacteriales, Rhodobacterales, Verrucomicrobiales. El cloroformo es el tercer compuesto que presentó un número considerable de correlaciones siendo estas en su mayoría negativas con los siguientes grupos: Cellvibrionales, Flavobacteriales, Kordiimonadales, Pirellulales, Rhodobacterales, Salinisphaerales, Sphingobacteriales, Verrucomicrobiales, Vibrionales y correlaciones positivas con los siguientes grupos: Bdellovibrionales, Myxococcales, Rickettsiales, Rhodospirillales. Para el yoduro de metilo, todas las correlaciones que se obtuvieron fueron negativas con los siguientes grupos: Caulobacterales, Clado Ga0077536, Clado HOC36, Nitrosopumilales, Pirellulales, Steroidobacterales, Thalassobaculales, Thiomicrospirales. En el caso del bromuro de metilo presento en su mayoría correlaciones positivas con los siguientes grupos: Bdellovibrionales, Kiritimatiellales, Rhodospirillales, Thalassobaculales y una correlación negativa con el grupo Flavobacteriales; el bromoformo presentó dos correlaciones positivas con los grupos Myxococcales y Rhodospirillales, así como dos correlaciones negativas con los grupos Kordiimonadales, Nitrosopumilales. Finalmente, el dibromo metano presentó una sola correlación positiva con el grupo Phycisphaerales (Figura 34).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Balneolales	2.33	1.50	2.61	5.01	5.72	4.71	4.95	6.55	6.54	2.90	0.95	0.11
Bdellovibrionales	0.17	0.18	0.20	0.11	0.10	0.04	0.10	0.11	0.26	0.61	0.28	0.12
Caulobacterales	0.03	0.34	0.34	0.31	0.05	0.09	0.08	0.08	0.00	0.01	0.00	0.00
Cellvibrionales	1.95	2.09	2.35	2.73	3.44	3.40	2.97	2.66	1.97	1.88	2.20	1.44
Clado OM182	0.09	0.14	0.05	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.19
SAR11 clade	2.09	2.06	1.87	1.22	0.69	0.17	0.99	1.14	1.17	1.04	1.87	2.87
Clado Grupo Marino B SAR324	0.27	0.13	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.36	0.58
Dadabacteriales	0.26	0.09	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.28	0.50
Ectothiorhodospirales	0.16	0.16	0.20	0.21	0.09	0.01	0.13	0.00	0.28	0.03	0.14	0.13
Flavobacteriales	18.20	18.69	21.26	20.32	24.92	28.87	22.84	19.54	15.13	19.39	20.21	22.35
Ga0077536	0.04	0.04	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10
HOC36	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.22
Kiritimatiellales	0.66	0.33	0.30	0.09	0.34	0.01	0.23	0.05	0.87	0.18	0.22	0.08
Kordiimonadales	0.00	0.00	0.02	0.02	0.07	0.07	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Grupo marino III	0.11	0.07	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.45	0.18
Myxococcales	0.09	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.10	0.07
Nitrosopumilales	0.05	0.18	0.24	0.27	0.07	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	1.77
Oceanospirillales	0.86	0.93	0.84	0.61	0.22	0.10	0.37	2.53	0.74	1.53	2.59	3.08
Phycisphaerales	0.30	0.12	0.12	0.18	0.21	0.35	0.01	0.00	0.13	0.13	0.12	0.08
Pirellulales	2.06	4.85	3.93	3.45	4.87	5.40	1.47	0.66	1.72	1.23	2.53	1.87
Rhodobacterales	13.74	15.98	16.91	20.63	17.82	21.89	23.07	27.26	21.16	20.06	16.10	16.14
Rhodospirillales	2.12	1.45	1.51	0.88	0.62	0.43	0.95	0.87	3.22	1.16	1.47	1.37
Rickettsiales	0.52	0.35	0.19	0.20	0.00	0.00	0.14	0.10	0.29	0.99	0.93	0.75
Salinisphaerales	0.04	0.06	0.01	0.01	0.06	0.01	0.11	0.16	0.00	0.05	0.00	0.00
SAR202 clade	0.05	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.12	0.10
SAR86 clade	2.71	2.43	2.59	1.99	1.26	0.98	1.36	1.18	1.62	1.02	2.17	2.08
Steroidobacterales	0.09	0.13	0.11	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.16
Thalassobaculales	0.43	0.41	0.44	0.14	0.06	0.09	0.14	0.20	0.13	0.03	0.38	0.48
Thiomicrospirales	0.08	0.37	0.29	0.82	0.31	0.13	0.06	0.08	0.01	0.00	0.18	0.54
UBA10353 marine group	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Verrucomicrobiales	2.98	3.35	2.78	3.78	5.69	4.42	4.07	3.27	3.01	4.50	1.90	1.40
Vibrionales	0.07	0.09	0.21	0.11	0.10	0.12	0.43	0.24	0.02	0.09	0.06	0.15

Figura 33. Estructura de la comunidad microbiana de 16S DNA, se calculó a partir de la abundancia de cada grupo, obteniendo la media mensual para determinar el porcentaje correspondiente de cada grupo. Los colores en azul representan una mayor abundancia, colores en blanco representan una disminución en la abundancia y colores en rojo representan valores bajos de abundancia.

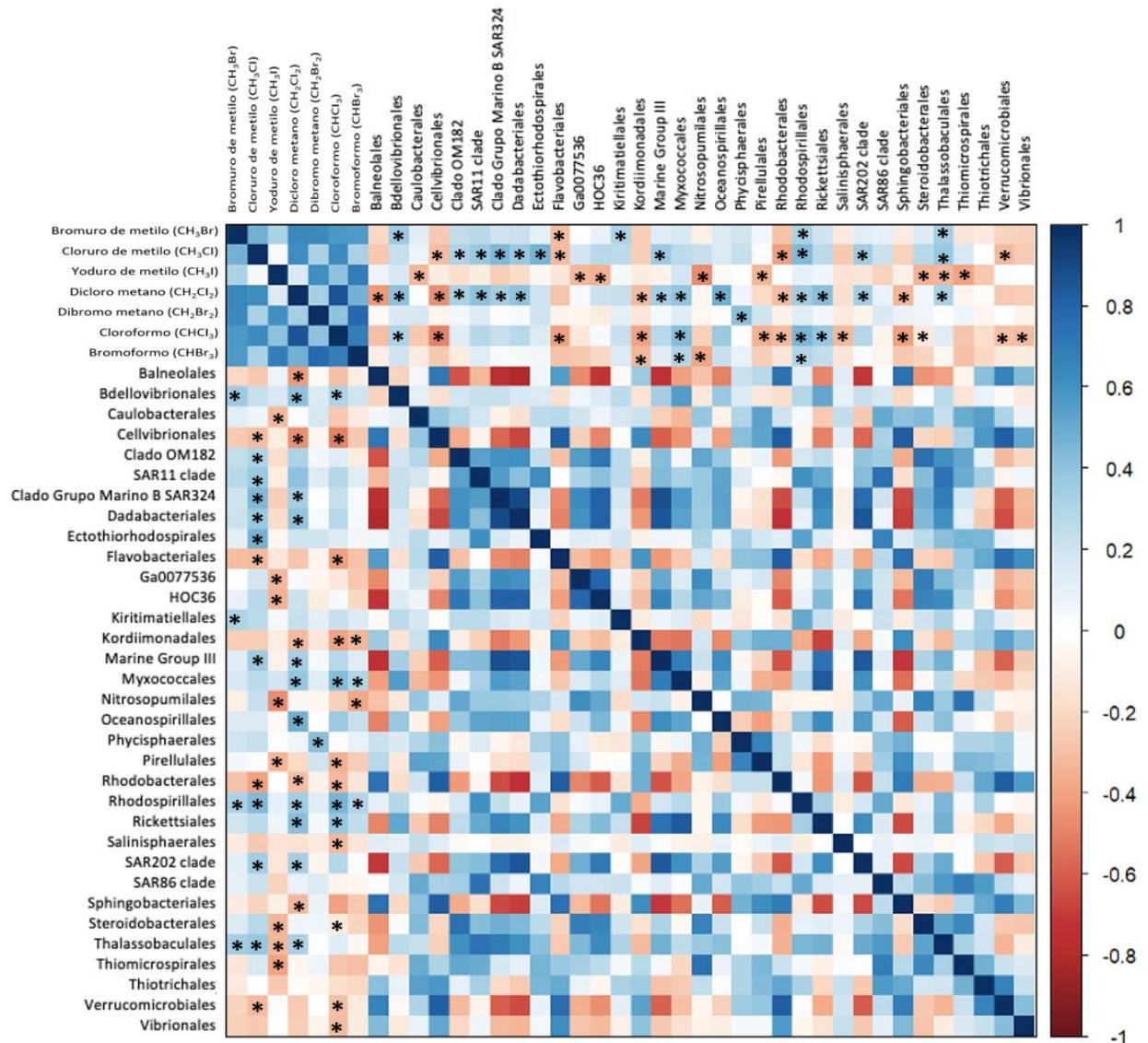


Figura 34. Heatmap, se muestran las correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y diversidad 16S DNA tomadas semanalmente en el de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y grupos microbianos.

3.4.3.2 Diversidad 16 S RNA

El análisis el 16S RNA, nos permite no solo obtener datos de los grupos microbianos que se encuentran en las muestras, sino que también tiene en cuenta la actividad de cada uno de estos grupos, dado que los organismos más activos metabólicamente están expresando más RNA ribosómico. Se realizó un gráfico para representar la estructura de la comunidad microbiana, el cual se obtuvo a partir de calcular la media

anual de cada grupo y obtener el porcentaje con respecto al 100%, para distinguir los grupos más representados a nivel de expresión (ARN) en la comunidad (Figura 35).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Actinomarinales	0.24	0.36	0.13	0.45	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.12
Alteromonadales	0.51	0.06	2.46	0.06	0.15	0.38	0.43	0.47	0.25	0.02	0.11	0.33
Bacteroidales	0.00	0.07	0.04	0.09	0.13	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04
Balneolales	0.11	0.14	0.74	0.95	1.05	0.40	0.44	0.49	0.26	0.03	0.00	0.00
Bdellovibrionales	0.72	0.60	0.53	0.29	0.28	0.31	1.61	2.90	2.08	1.25	0.58	0.43
Clado SAR11	1.28	1.25	1.15	2.21	1.78	1.27	0.92	0.57	0.43	0.30	0.71	0.38
Clado SAR86	1.20	1.02	1.47	2.08	1.76	1.41	1.26	1.11	0.86	0.60	0.63	1.17
Dadabacteriales	0.12	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.05	0.10	0.06	0.09
Ectothiorhodospirales	0.16	0.15	0.25	0.36	0.36	0.20	0.17	0.14	0.12	0.10	0.12	0.07
Ga0077536	0.00	0.07	0.06	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.24
Kiritimatiellales	0.02	0.08	0.05	0.01	0.19	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Myxococcales	0.11	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.07
Oligoflexales	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16
Opitutales	0.54	0.61	0.49	2.11	0.78	0.53	0.41	0.30	0.22	0.15	0.12	0.14
Parvibaculales	0.22	0.35	0.34	0.63	0.45	0.34	0.70	1.06	0.59	0.11	0.44	0.66
Pedosphaerales	0.10	0.21	0.03	0.01	0.04	0.25	0.12	0.00	0.02	0.03	0.23	0.57
Pirellulales	1.58	3.38	2.65	2.68	4.46	1.89	1.29	0.68	1.21	1.74	0.68	1.39
Rhodospirillales	1.85	1.13	1.70	1.33	2.02	1.47	1.24	1.01	0.96	0.91	1.32	1.83
Rickettsiales	1.21	0.56	0.29	0.09	0.13	0.48	0.55	0.61	0.79	0.97	0.89	1.04
Salinisphaerales	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00	0.06	0.28	0.49	0.24	0.00	0.00	0.00
Sphingobacteriales	0.02	0.07	0.15	0.47	0.60	0.30	0.23	0.17	0.08	0.00	0.00	0.00
Synechococcales	57.74	49.74	44.61	42.66	47.82	44.93	34.32	23.70	26.84	36.99	28.36	48.21
Thiomicrospirales	0.10	0.20	0.62	1.43	0.57	0.25	0.13	0.00	0.08	0.15	0.28	0.19
Vibrionales	0.04	0.06	0.00	0.06	0.10	0.04	0.25	0.47	0.24	0.00	0.04	0.19

Figura 35. Estructura de la comunidad microbiana de 16S RNA, se calculó a partir de la expresión relativa de cada grupo, obteniendo la media mensual para determinar el porcentaje correspondiente de cada grupo. Los colores en azul representan una mayor expresión relativa, colores en blanco representan una disminución en la expresión relativa y colores en rojo representan valores bajos de expresión relativa.

Asimismo, se realizó un *heatmap* para poder observar las correlaciones de *Spearman* entre halometanos y la diversidad procarionta 16S RNA, tomando en cuenta las correlaciones que son estadísticamente significativas presentando un valor de *p* menor a 0.05. En este caso, el yoduro de metilo fue el compuesto que presentó el mayor número de correlaciones en su mayoría negativas con los siguientes grupos: Bacteroidales, Clado SAR86, Ectothiorhodospirales, Clado Ga0077536, Kiritimatiellales, Opitutales, Pirellulales, Thiomicrospirales, dos correlaciones positivas con los grupos Actinomarinales y Salinisphaerales. El cloroformo presentó correlaciones positivas con los siguientes grupos: Actinomarinales, Bdellovibrionales, Dadabacteriales, Rickettsiales, Synechococcales y correlaciones

negativas con los siguientes grupos Bañeolales y Sphingomonadales. El dicloro metano presente en su mayoría correlaciones positivas con los siguientes grupos: Actinomarinales, Dadabacteriales, Pedosphaerales, Synechococcales y correlaciones negativas con los grupos Bañeolales y Sphingobacteriales. El dibromo metano presente en su mayoría correlaciones negativas con los siguientes grupos: Bacteroidales, Clado SAR86, Clado Ga0077536, Rhodospirillales, Thiomicrospirales y una correlación positiva con el grupo Alteromonadales. Para el cloroformo se obtuvieron correlaciones en su mayoría positivas con los siguientes grupos: Actinomarinales, Bdellovibrionales, Dadabacteriales, Rickettsiales, Synechococcales y dos correlaciones negativas con los grupos Bañeolales y Sphingomonadales.

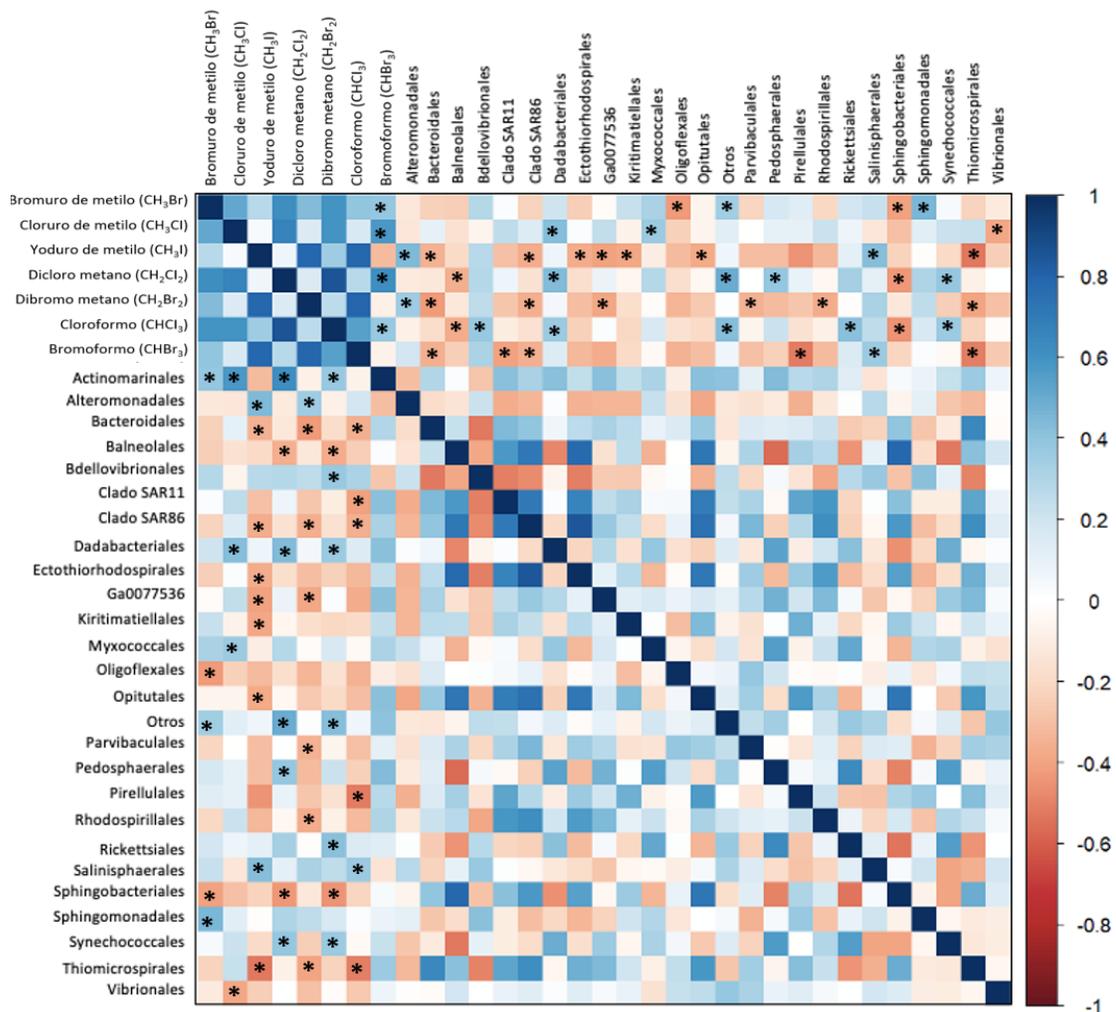


Figura 36. Heatmap, se muestran las correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y diversidad 16S RNA tomadas semanalmente en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas entre halometanos y grupos microbianos.

El bromoformo presentó correlaciones en su mayoría negativas con los siguientes grupos: Bacteroidales, Clado SAR11, Clado SAR86, Clado Ga0077536, Oligoflexales, Pirellulales, Thiomicrospirales y una correlación positiva con el grupo Salinisphaerales. El bromuro de metilo presentó correlaciones positivas con los grupos Actinomarinales, Sphingomonadales, correlaciones negativas con los grupos Oligoflexales y Sphingobacteriales. El cloruro de metilo presentó correlaciones y estas fueron en su mayoría positivas con los grupos Actinomarinales, Dadabacteriales, Myxococcales y una correlación negativa con el grupo Vibrionales (Figura 36)

3.4.3.3 Diversidad 18S RNA

Al igual que el análisis el 16S RNA, el análisis del 18S RNA nos permite conocer la presencia de los grupos microbianos (en este caso eucarióticos) en las muestras. Además, permite conocer que grupos son más activos, dado que los organismos más activos metabólicamente, están expresando más RNA ribosómico. Se realizó un gráfico para representar la estructura de la comunidad microbiana, el cual se obtuvo a partir de calcular la media mensual de cada para observar los grupos más representativos de la comunidad a lo largo del año (Figura 37).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Charophyta	0.30	0.08	0.04	0.10	0.08	0.51	0.85	0.41	0.32	0.00	0.00	0.07
Coccolithales	2.59	1.93	1.68	1.31	0.97	1.21	1.47	1.67	1.95	2.47	1.70	1.50
Leucocryptos	0.34	0.56	0.53	0.39	0.61	0.77	0.85	0.55	0.28	0.48	0.79	0.22
MAST-12	0.17	0.04	0.03	0.12	0.12	0.20	0.32	0.27	0.25	0.11	0.20	0.03
MAST-4	1.09	0.71	1.29	1.86	0.83	1.41	1.39	0.57	0.79	1.79	1.33	1.82
MAST-8	0.08	0.07	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00	0.05	0.00	0.17	0.00	0.11
Metazoa (Animalia)	4.14	2.62	0.76	3.67	1.42	6.15	1.94	7.03	5.67	7.64	4.62	7.82
Ochrophyta	23.38	16.72	16.07	22.16	28.88	24.73	24.24	48.76	58.04	37.92	20.32	35.32
Phaeocystis	2.12	2.07	1.16	2.56	1.25	2.49	2.69	1.78	0.98	2.38	1.76	3.21
Protalveolata	2.50	1.13	0.32	0.67	0.81	0.66	3.01	2.02	1.83	2.45	3.08	0.90
Prymnesiales	13.64	22.31	21.96	22.10	15.67	11.02	9.77	4.29	8.23	3.63	6.15	5.88

Figura 37. Estructura de la comunidad microbiana de 18S RNA, se calculó a partir de la expresión relativa de cada grupo, obteniendo la media mensual para determinar el porcentaje correspondiente de cada grupo. Los colores en azul representan una mayor expresión relativa, colores en blanco representan una disminución en la expresión relativa y colores en rojo representan valores bajos de expresión relativa.

Se realizó el *heatmap* para poder observar las correlaciones de *Spearman* entre halometanos y la diversidad microbiana eucariota mediante el análisis del gen 18S RNA, tomando en cuenta las correlaciones que son estadísticamente significativas presentando un valor de p menor a 0.05. El yoduro de metilo fue el compuesto que presentó el mayor número de correlaciones, en su mayoría positivas con los grupos: Charophyta, MAST 8, MAST 12, Metazoa, Ochrophyta y una correlación negativa con Prymnesiales. El bromuro de metilo presentó solo dos correlaciones una positiva con el grupo Coccolithales y una correlación negativa con el grupo MAST 4. En el caso del cloruro de metilo presentó una correlación negativa con el grupo Phaeocystis, el dicloro metano presentó solo una correlación negativa con el grupo Charophyta. El dibromo metano presentó solo una correlación negativa con el grupo Leucocryptos, el cloroformo al igual presentó una correlación positiva con el grupo Protalveolata y el bromoformo presento una sola correlación positiva con el grupo MAST 8 (Figura 38).

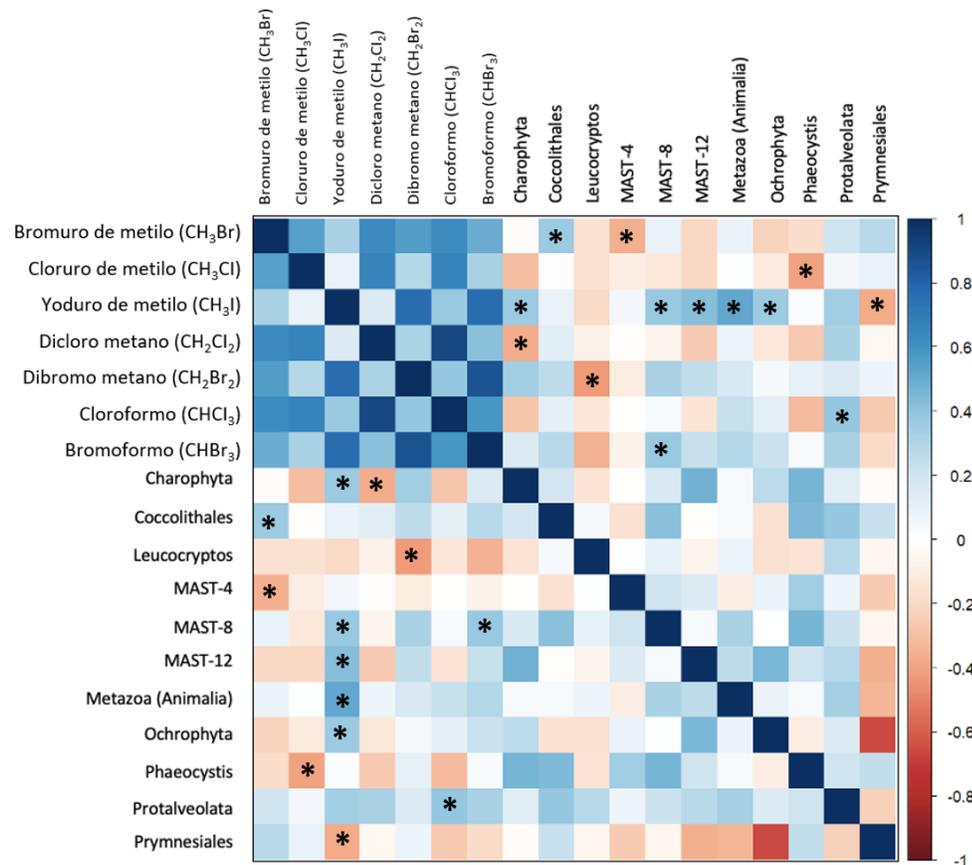


Figura 38. Correlaciones (r de Spearman) entre halometanos y diversidad 18S RNA tomadas semanalmente en el muelle de Scripps Pier, La Jolla, California, E.U.A., teniendo en cuenta las correlaciones con valor $p < 0.05$. Los recuadros en tonos rojos indican correlaciones negativas y los recuadros en tonos azules indican correlaciones positivas, los recuadros con asteriscos (*) representan las correlaciones estadísticamente significativas solamente entre halometanos y grupos microbianos (eucariotas).

3.4.4 Análisis de componentes principales

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para explorar los datos más profundamente, permitiendo observar las variaciones en las bases de datos que contienen múltiples variables. Con la ayuda del software *RStudio*, aplicando el comando de PCA por sus siglas en inglés, se obtuvieron figuras por separado de variables ambientales 1 (Figura 36 a Figura 43) y variables ambientales 2 (Figura 44 a Figura 51) con cada uno de los siete halometanos las cuales se muestran a continuación. Este análisis se realizó para el grupo de variables ambientales 1 (Figura 36) y grupo de variables ambientales 2 (Figura 44) tomando en cuenta los 7 halometanos y todas las variables ambientales. Al observar que los PCA para cada halometano con las variables ambientales y el compuesto se distribuían de manera diferente, se dispuso a realizar un PCA para cada uno de los 7 halometanos con las variables ambientales 1 y las variables ambientales 2. Los resultados obtenidos a partir del Análisis de Componentes Principales (PCA) muestran las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2), para los cada halometano y variables ambientales 1 (tablas en sección de Anexos).

Al igual se realizaron PCA's para cada uno de los halometanos y variables ambientales 2, Los resultados obtenidos a partir del Análisis de Componentes Principales (PCA) muestran las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2), para los cada halometano y variables ambientales 2 (tablas en sección de Anexos). Los PCA's se realizaron específicamente para cada halometano y grupo de variables ambientales correspondiente, debido a que al realizar PCA con todas las variables ambientales y con los 7 halometanos, puede que estos se encontraran afectando o teniendo alguna influencia entre sí. Por ese motivo se realizó además de los PCA's de halometanos y variables ambientales 1 y 2 (Figura 36 y Figura 44), un PCA individual para cada halometano con los grupos de variables ambientales 1 y 2.

Cabe destacar que este análisis nos ayuda a determinar qué variables son influyentes entre sí, en la mayoría de los casos es posible observar que los halometanos y las variables presentan en su mayoría correlaciones negativas. Con este tipo de prueba estadística multivariada es posible observar otro comportamiento de los datos analizados en el presente estudio, ya que al observar la dirección a la que apunta cada variable ambiental y cada uno de los halometanos en particular, puede dar paso a entender que variables ambientales se encuentran influyendo en las concentraciones de los halometanos.

3.4.4.1. Análisis de componentes principales halometanos y variables ambientales 1

El análisis de componentes principales entre todos los halometanos y todas las variables ambientales 1, en la mayoría de los casos mostró entre las variables y estos compuestos. Esta observación podría deberse a un comportamiento similar en las distribuciones de halometanos, debido a que poseen la misma dirección (Figura 39). Asimismo, al realizar un análisis de componentes principales para cada halometano es posible observar un cambio en la orientación de las variables ambientales y de cada compuesto (Figuras 40 a 43).

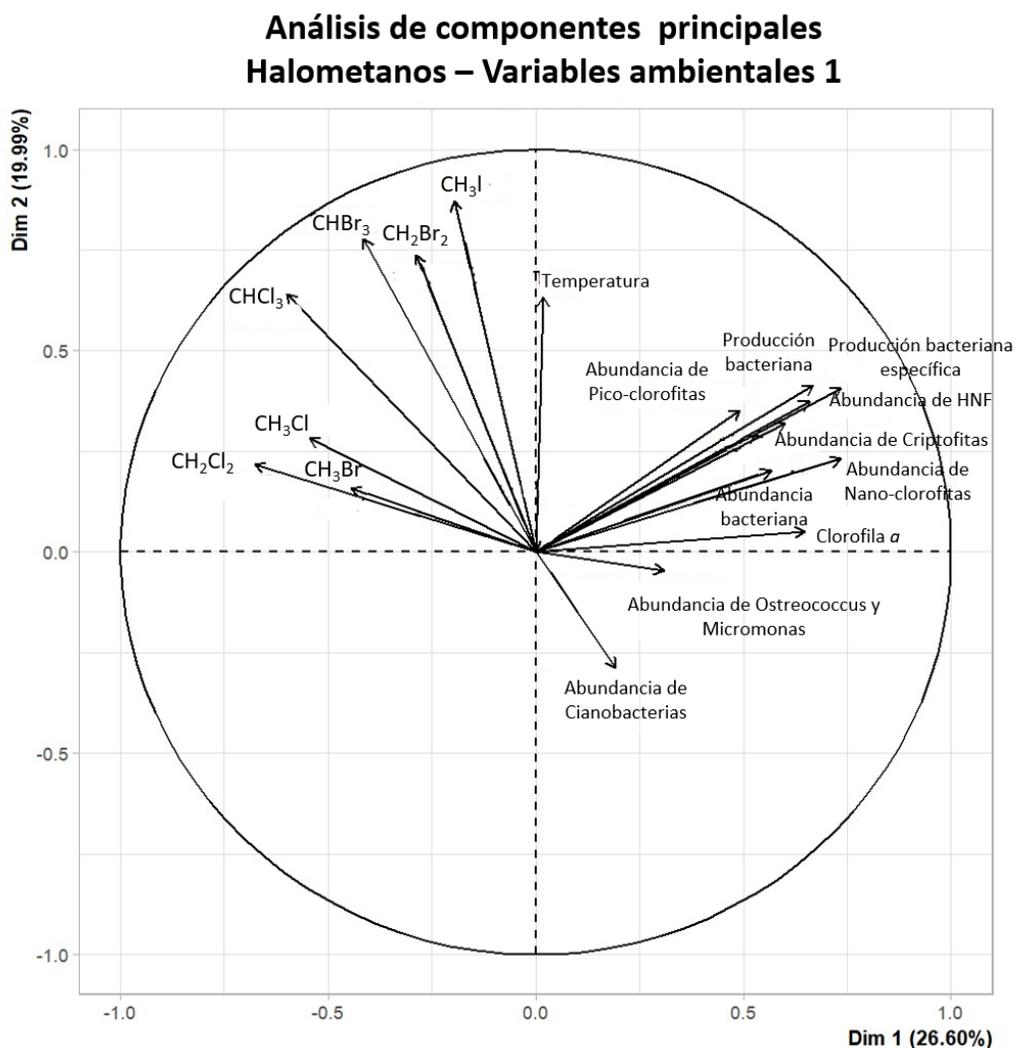


Figura 39. Análisis de Componentes Principales (PCA) de halometanos y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Para el bromuro de metilo se observaron correlaciones negativas con todas las variables ambientales, mostrando una dirección opuesta en las flechas respecto a las variables ambientales (Figura 40). Por otro lado, el cloruro de metilo presenta una orientación más cercana con la abundancia de cianobacterias, mientras que se presentan correlaciones negativas (Figura 41) con las demás variables ambientales.

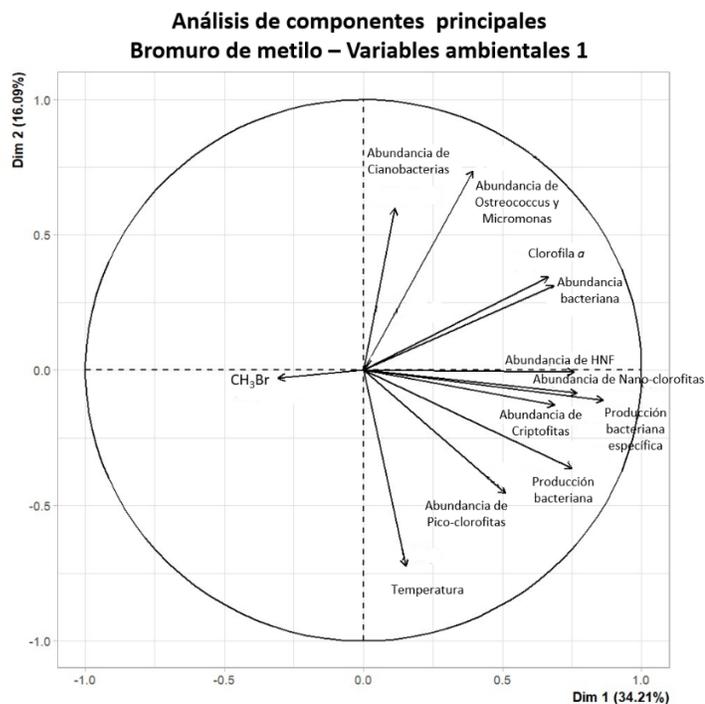


Figura 40. Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromuro de metilo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

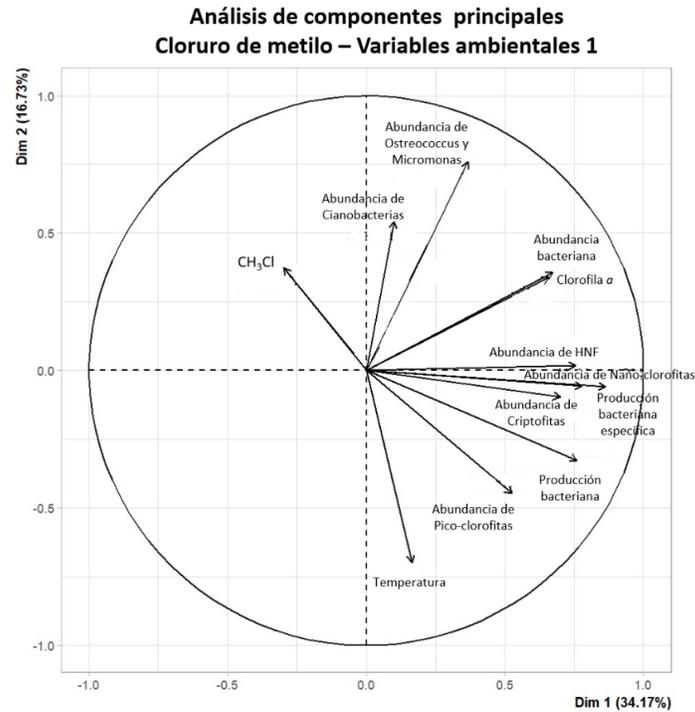


Figura 41. Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloruro de metilo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

El yoduro de metilo presenta correlación positiva con la temperatura, ya que la dirección en la que se distribuyen es la misma. Está correlación también fue posible observar al aplicar el coeficiente de correlación *de Spearman*, en el análisis anterior (Figura 42). Otras variables como la producción bacteriana, abundancia de pico- clorofitas, son otras dos variables que presentan correlaciones positivas con este compuesto (Figura 42). El dicloro metano (Figura 43) y el cloroformo (Figura 44) son compuestos que presentan correlaciones opuestas con todas las variables ambientales 1.

Análisis de componentes principales Yoduro de metilo – Variables ambientales 1

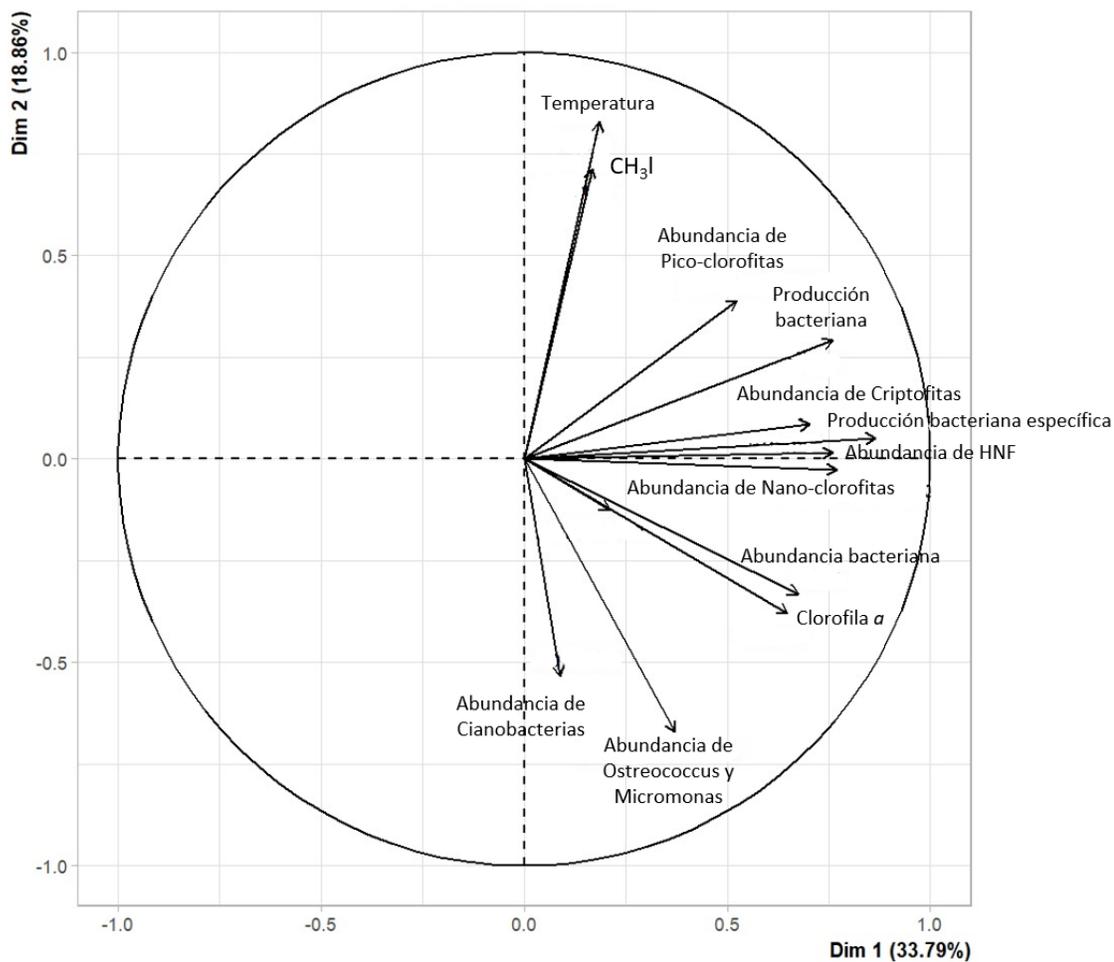


Figura 42. Análisis de Componentes Principales (PCA) de yoduro de metilo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

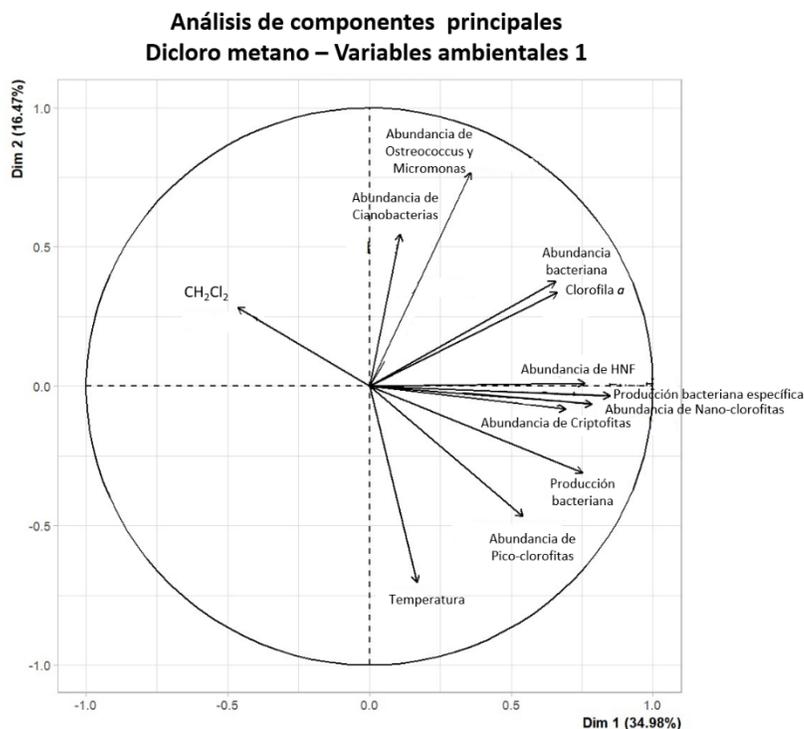


Figura 43. Análisis de Componentes Principales (PCA) de dicloro metano y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

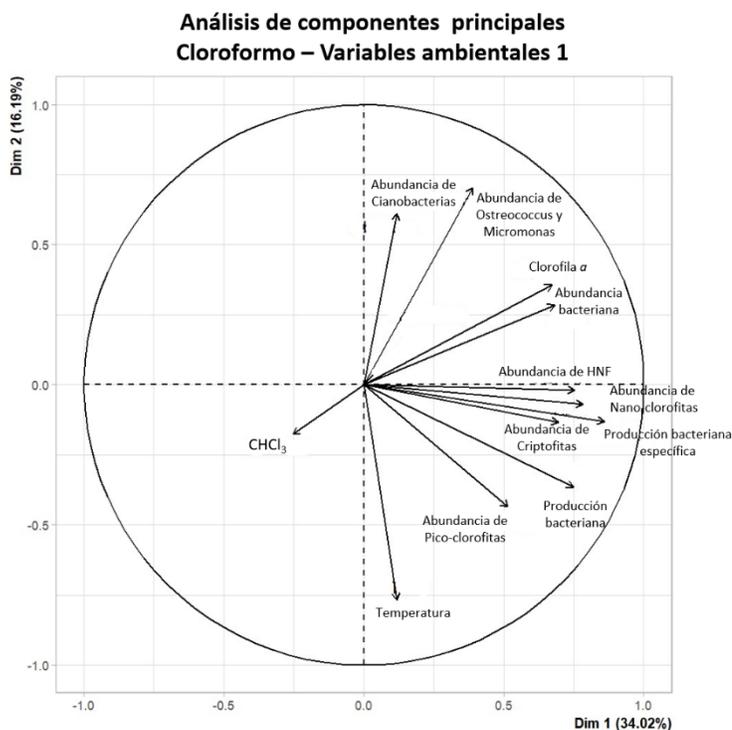


Figura 44. Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloroformo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Por otro lado, el dibromo metano es posible observar una correlación positiva con la temperatura, así como con la abundancia de pico-clorofitas y con la producción bacteriana (Figura 45). El bromoformo presenta una correlación positiva con la temperatura, y es posible observar que presenta correlaciones negativas

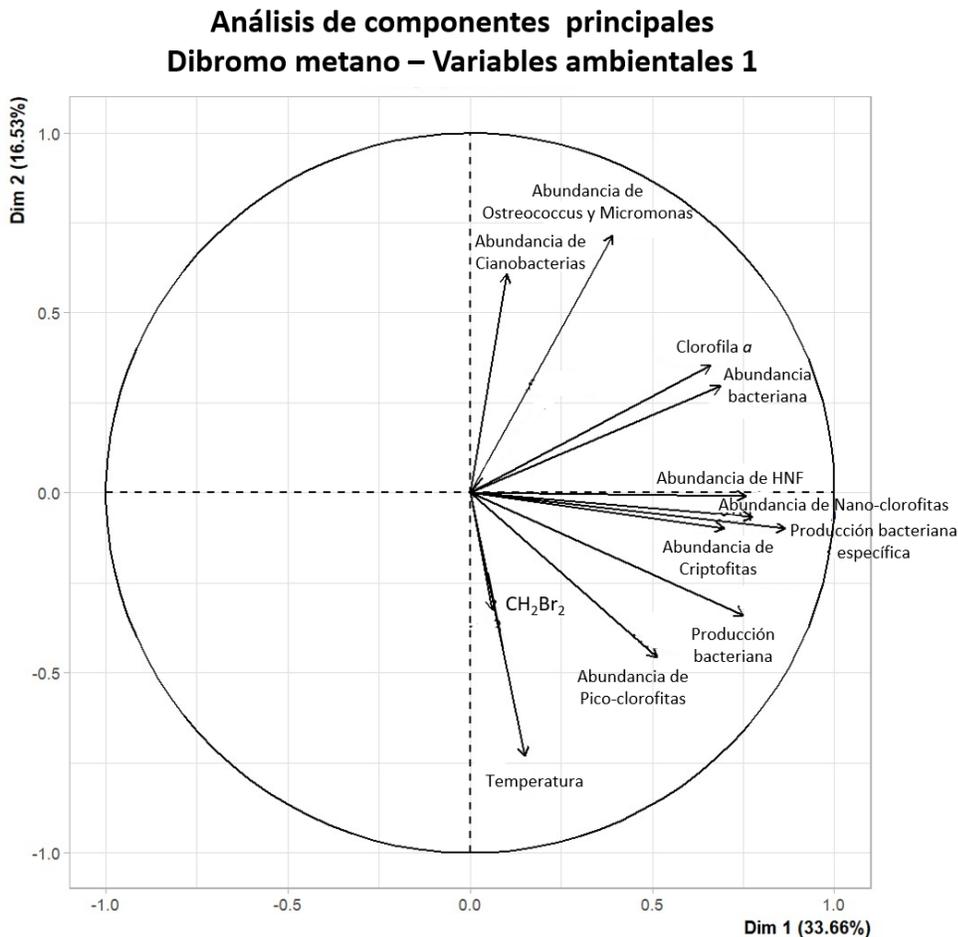


Figura 45. Análisis de Componentes Principales (PCA) de dibromo metano y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 1. las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Análisis de componentes principales Bromoformo – Variables ambientales 1

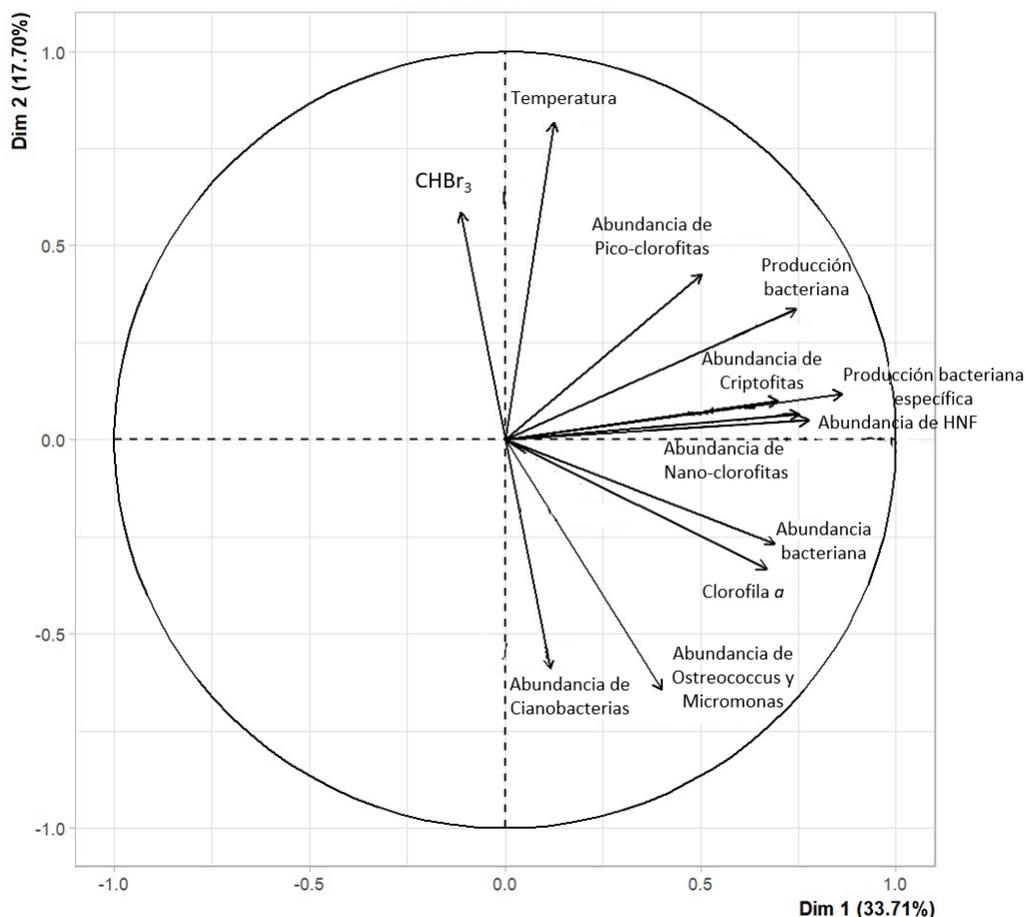


Figura 46. Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromoformo y variables ambientales 1, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 1, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

3.4.4.2. Análisis de componentes principales halometanos y variables ambientales 2

Al igual que en el análisis de componentes principales entre halometanos y las variables ambientales 1, los 7 compuestos halogenados mostraron una dirección similar entre sí. Además, otras variables como el fosfato y la salinidad también presentaron una misma dirección que los halometanos (Figura 47).

Análisis de componentes principales Halometanos – Variables ambientales 2

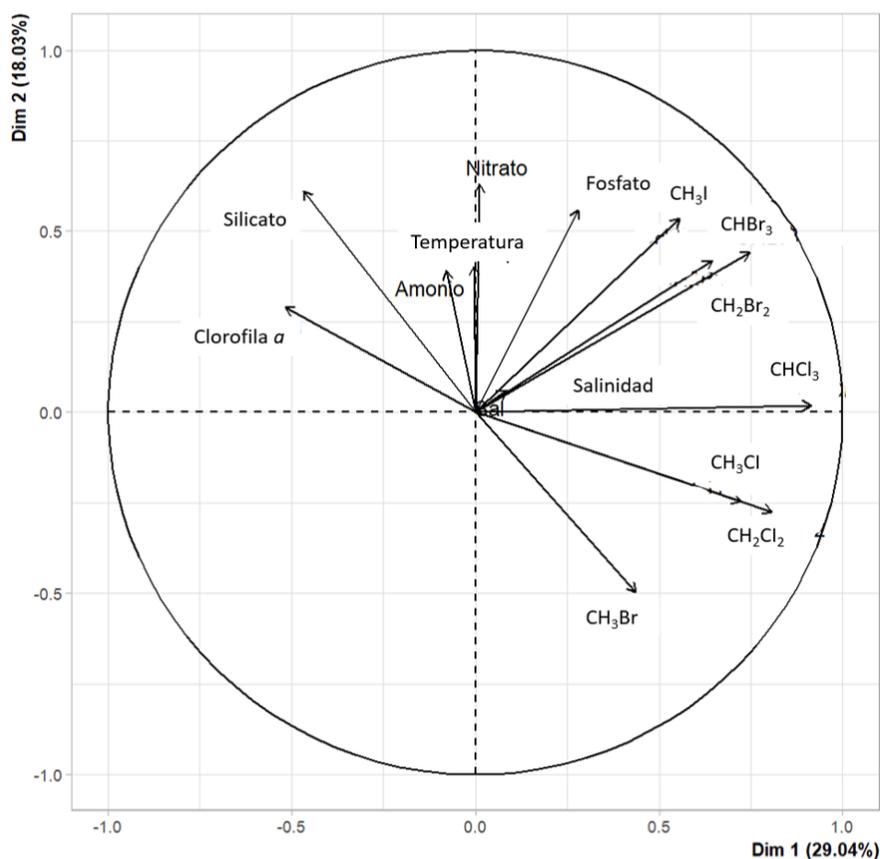


Figura 47. Análisis de Componentes Principales (PCA) de halometanos y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Sin embargo, para evitar que se enmascaren interacciones con cada halometano de forma individual, también se realizaron análisis de componentes principales para cada halometano y variables ambientales 2 (Figura 48 a 54). Para el bromuro de metilo se observaron correlaciones negativas con todas las variables ambientales, debido a que la flecha del compuesto se encuentra en dirección opuesta a las variables (Figura 48).

Análisis de componentes principales Bromuro de metilo – Variables ambientales 2

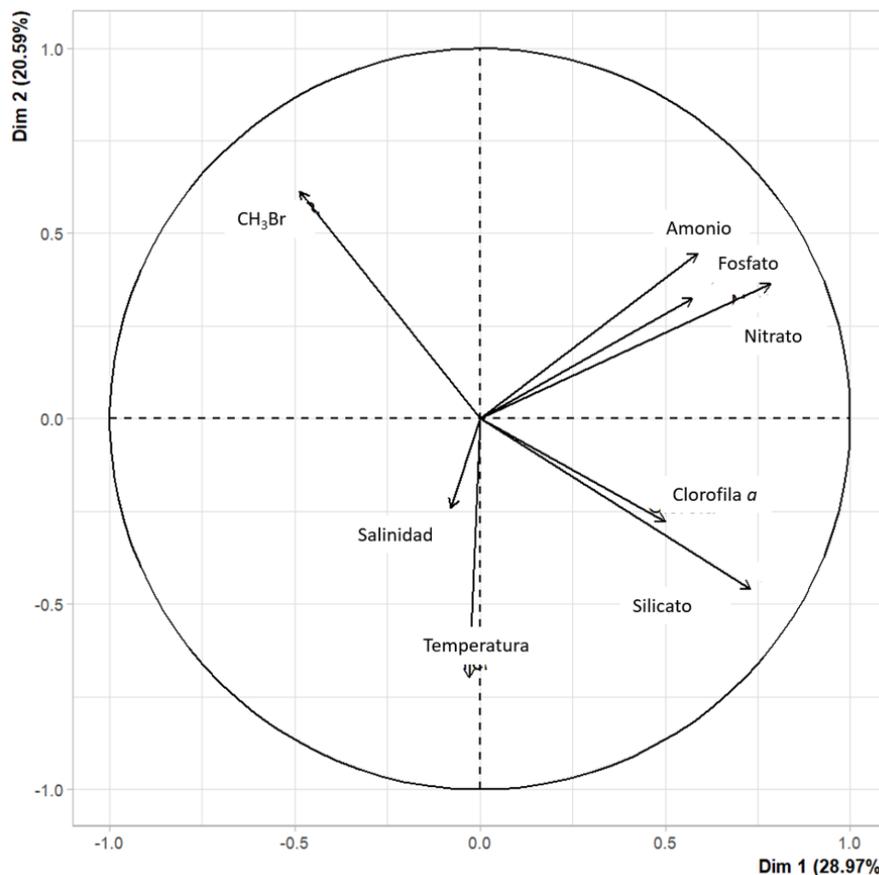


Figura 48. Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromuro de metilo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

El cloruro de metilo, presento una dirección opuesta con respecto a todas las variables ambientales 2 (Figura 49). Sin embargo, en el caso del yoduro de metilo y el bromoformo, estos compuestos presentaron una misma dirección con la temperatura y salinidad, teniendo dirección opuesta con el resto de las variables (Figura 50 y 51).

**Análisis de componentes principales
Cloruro de metilo – Variables ambientales 2**

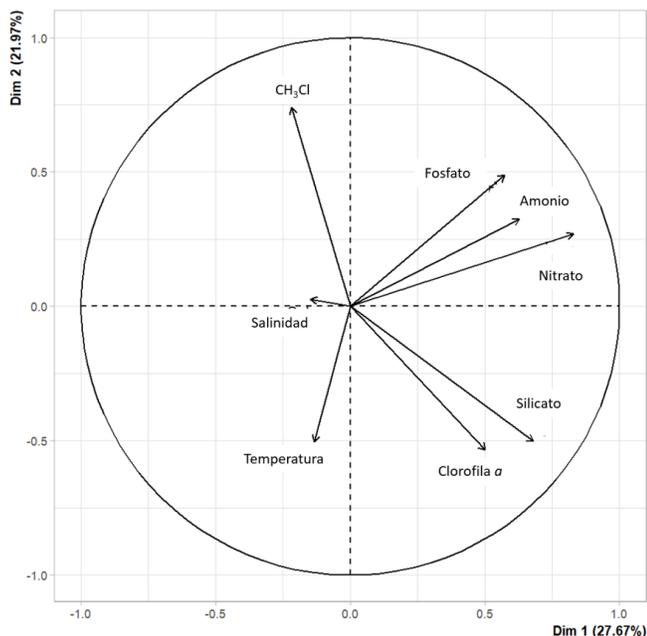


Figura 49. Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloruro de metilo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

**Análisis de componentes principales
Yoduro de metilo – Variables ambientales 2**

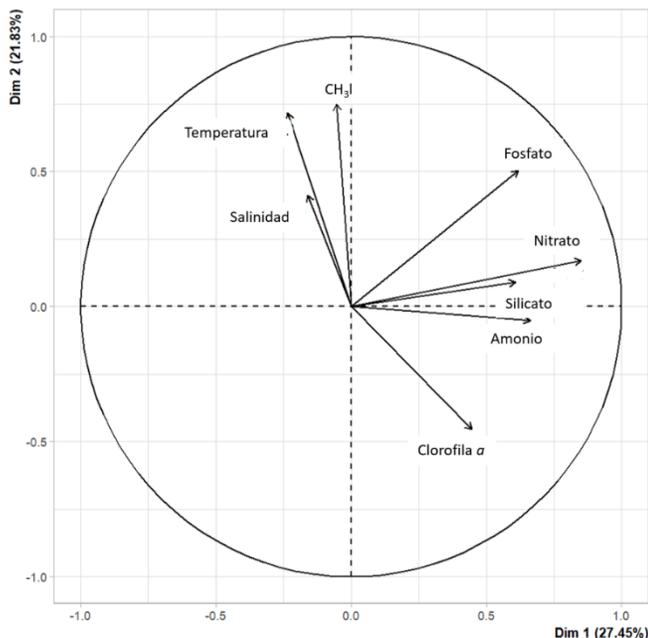


Figura 50. Análisis de Componentes Principales (PCA) de yoduro de metilo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Análisis de componentes principales Bromoformo – Variables ambientales 2

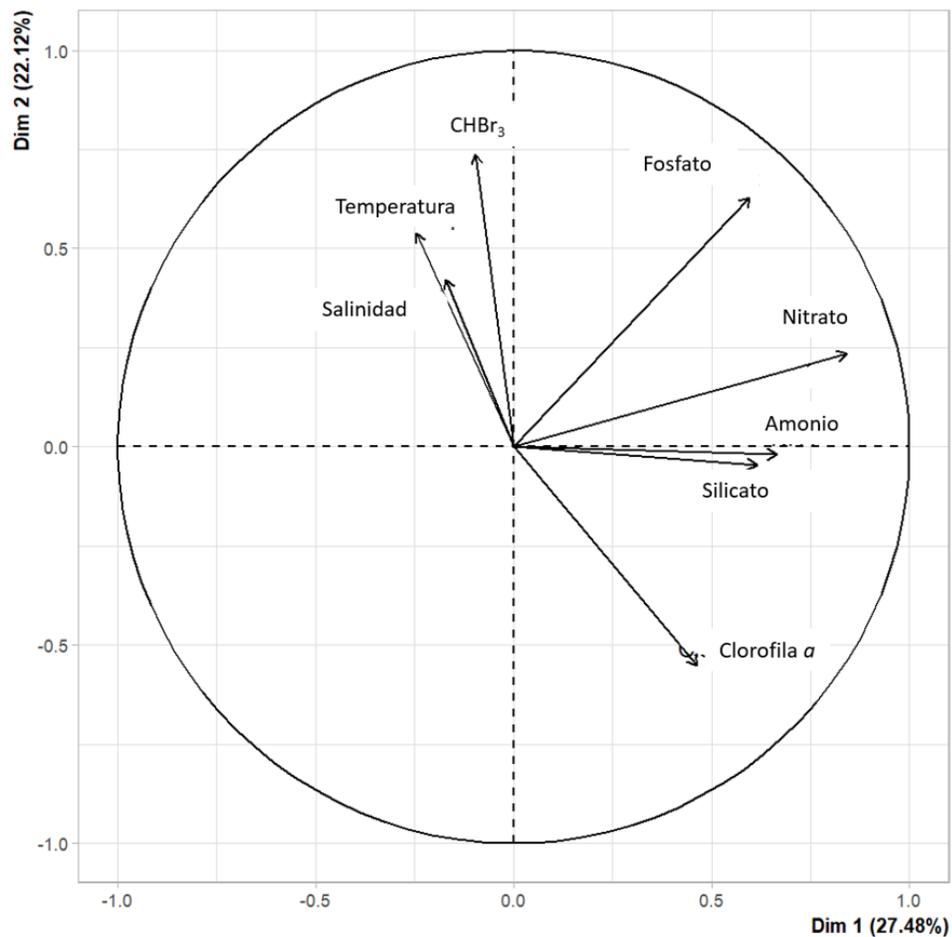


Figura 51. Análisis de Componentes Principales (PCA) de bromoformo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Por otro lado, el dicloro metano y el cloroformo presentaron una dirección similar con la salinidad, caso contrario se presenta con el resto de las variables (Figuras 52y 53). A diferencia del resto de halometanos el dibromo metano, presenta una dirección similar con los nutrientes inorgánicos como fosfato, amonio y nitrato, mientras que muestra una dirección opuesta con el resto de las variables (Figura 54).

**Análisis de componentes principales
Dicloro metano – Variables ambientales 2**

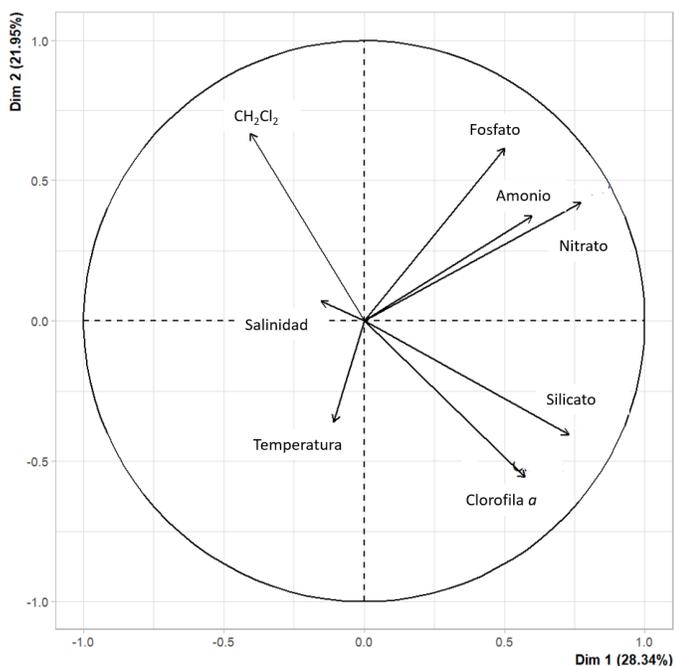


Figura 52. Análisis de Componentes Principales (PCA) de dicloro metano y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

**Análisis de componentes principales
Cloroformo – Variables ambientales 2**

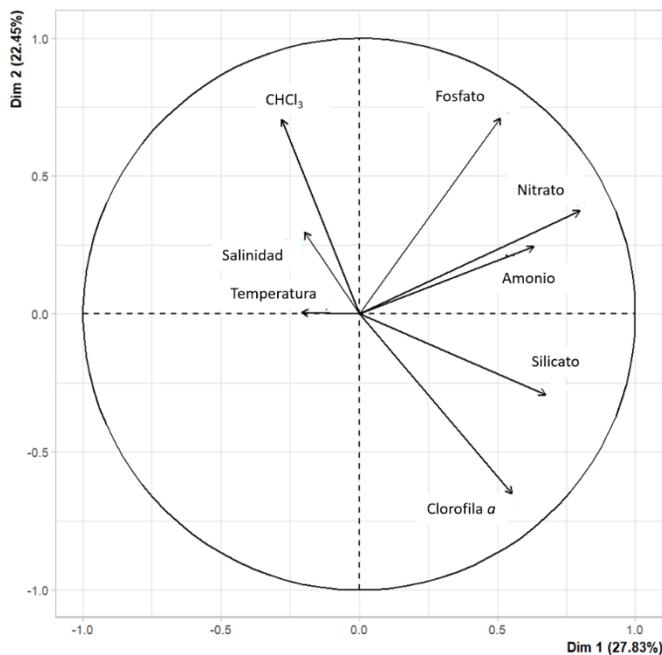


Figura 53. Análisis de Componentes Principales (PCA) de cloroformo y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

Análisis de componentes principales Dibromo metano – Variables ambientales 2

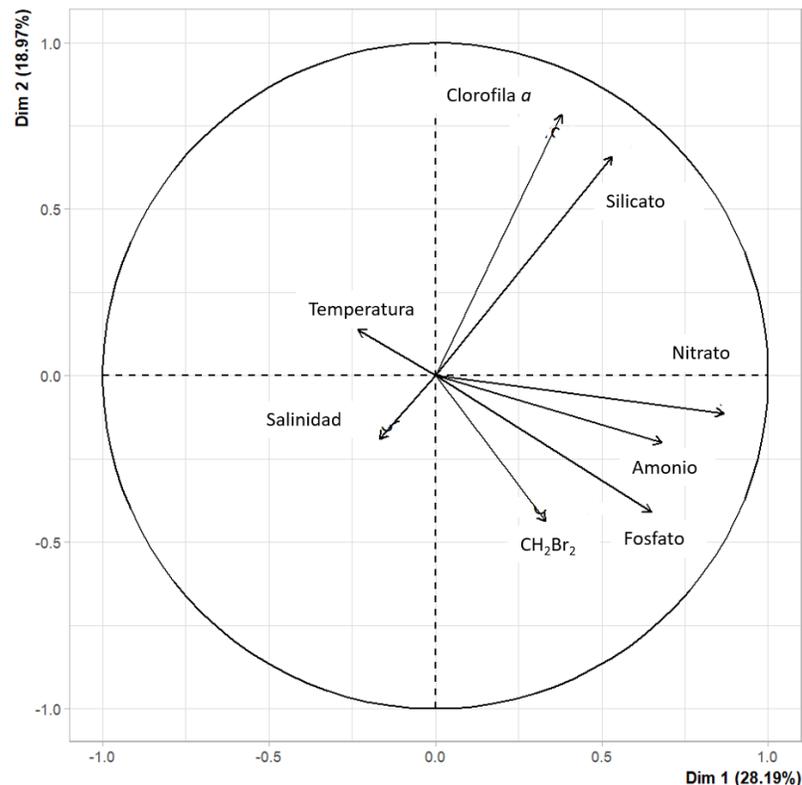


Figura 54. Análisis de Componentes Principales (PCA) de dibromo metano y variables ambientales 2, realizando una estandarización de los datos. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 2, las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas, ver sección de Anexo C.

3.4.5 Retraso de 1 semana, correlaciones entre variables ambientales y concentraciones de halometanos

Se realizó un retraso de 1 semana en las bases de datos (*1 lag*) con el objetivo de observar otras correlaciones significativas de *Spearman* entre variables ambientales y halometanos. Este análisis se realizó para las variables ambientales 1 (Tabla 1) y variables ambientales 2 (Tabla 2). Las tablas con estos datos se presentan a continuación, y es posible observar comparación entre las correlaciones que se obtuvieron sin retraso (*0 lag*) y las correlaciones que se obtuvieron con retraso (*1 lag*).

Al aplicar un retraso de 1 semana (*1 lag*), para el grupo de variables 1, en algunos casos las correlaciones se mantuvieron como fue el caso del cloruro de metilo - producción bacteriana y cloruro de metilo - producción bacteriana específica, se observó aumento en el valor de *r* en las correlaciones entre el yoduro de metilo - temperatura y bromuro de metilo - temperatura, presentándose también una disminución en

el valor de r en algunas correlaciones como dicloro metano con la abundancia Pico-Clorofitas y Nano-Clorofitas, la producción bacteriana específica y el cloroformo- abundancia Nano-Clorofitas. Cabe mencionar que en algunos casos este retraso provocó la ausencia de correlaciones que se presentaron con 0 lag y en otros casos se observó la correlación de nuevas variables con los halometanos (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación entre las correlaciones de Spearman que se obtuvieron a partir de la aplicación de un retraso (1 lag) y correlaciones sin retraso (0 lag) entre el grupo de variables ambientales 1 y halometanos.

Variables ambientales 1

Halometano	Variable ambiental	0 lag	1 lag
CH ₃ Br	Clorofila α	-0.28	-
CH ₃ Br	Abundancia Pico-Clorofitas	-0.28	-
CH ₃ Cl	Producción bacteriana	-0.32	-0.32*
CH ₃ Cl	Producción bacteriana específica	-0.28	-
CH ₃ Cl	Abundancia Criptofitas	-0.39	-
CH ₃ Cl	Abundancia Pico-Clorofitas	-0.33	-
CH ₃ Cl	Abundancia Nano-Clorofitas	-0.33	-
CH ₃ I	Producción bacteriana	0.30	-
CH ₃ I	Temperatura	0.49	0.56***
CH ₃ I	Abundancia <i>Ostreococcus</i> - <i>Micromonas</i>	-0.33	-0.28**
CH ₂ Cl ₂	Producción bacteriana	-0.41	-0.35**
CH ₂ Cl ₂	Producción bacteriana específica	-0.35	-0.31**
CH ₂ Cl ₂	Clorofila α	-0.32	-
CH ₂ Cl ₂	Abundancia Criptofitas	-0.41	-
CH ₂ Cl ₂	Abundancia Pico-Clorofitas	-0.51	-0.37**
CH ₂ Cl ₂	Abundancia Nano-Clorofitas	-0.52	-0.32**
CHCl ₃	Producción bacteriana	-0.29	-
CHCl ₃	Producción bacteriana específica	-0.28	-0.28*
CHCl ₃	Clorofila α	-0.30	-
CHCl ₃	Abundancia Criptofitas	-0.32	-
CHCl ₃	Abundancia Pico-Clorofitas	-0.34	-
CHCl ₃	Abundancia Nano-Clorofitas	-0.45	-0.33**
CHBr ₃	Temperatura	0.38	0.40***
CH ₃ Cl	Abundancia HNF	-	-0.29
CH ₂ Cl ₂	Abundancia HNF	-	-0.42
CHCl ₃	Abundancia HNF	-	-0.33
CHBr ₃	Abundancia bacteriana	-	-0.32

- Ausencia de correlación de Spearman

* Se mantiene el valor de r (correlación de Spearman)

** Disminuye el valor de r (correlación de Spearman)

*** Aumenta el valor de r (correlación de Spearman)

En el caso del grupo de variables ambientales 2 se observaron casos de aumento en el valor de r como fue para el dicloro metano - temperatura, correlaciones que disminuyeron el valor de r como fue el caso de bromuro de metilo- silicato, yoduro de metilo - temperatura, así como casos en lo que el retraso se obtuvieron nuevas correlaciones o la ausencia de correlaciones entre variables ambientales y los halometanos (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación entre las correlaciones de Spearman que se obtuvieron a partir de la aplicación de un retraso (1 lag) y correlaciones sin retraso (0 lag) entre el grupo de variables ambientales 2 y halometanos.

Variables ambientales 2			
Halometano	Variable ambiental	0 lag	1 lag
CH ₃ Br	Silicato	-0.48	-0.43**
CH ₃ Cl	Temperatura	-0.39	-
CH ₃ Cl	Clorofila <i>a</i>	-0.41	-
CH ₃ Cl	Silicato	-0.43	-
CH ₃ I	Temperatura	0.41	0.36**
CH ₃ I	Nitrato	0.45	-
CH ₂ Cl ₂	Clorofila <i>a</i>	-0.51	-
CH ₂ Cl ₂	Silicato	-0.39	-
CHCl ₃	Clorofila <i>a</i>	-0.45	-
CHCl ₃	Fosfato	0.41	-
CH ₂ Br ₂	Nitrato	0.43	-
CHBr ₃	Nitrato	0.49	-
CH ₃ Br	Temperatura	-	-0.43

- Ausencia de correlación de Spearman

* Se mantiene el valor de r (correlación de Spearman)

** Disminuye el valor de r (correlación de Spearman)

*** Aumenta el valor de r (correlación de Spearman)

En resumen, es posible observar que en algunos casos el realizar un retraso puede beneficiar a los resultados y en algunos casos no. En casos particulares algunas variables ambientales mostraron una mayor correlación con halometanos después de este ajuste, ya que fue posible observar correlaciones nuevas entre halometanos y variables. En otros casos se presentó la disminución del valor de r , así como también se perdieron correlaciones. Este tipo de ajuste nos ayuda a expandir la comprensión de las interacciones entre las variables ambientales y los halometanos, ya que no es posible determinar si la influencia de una variable es inmediata o puede estar actuando de manera gradual sobre los niveles de concentración de los compuestos.

Capítulo 4. Discusión

Los resultados obtenidos a partir del análisis de las bases de datos permiten comprender y predecir procesos e interacciones que se están llevando a cabo en el medio natural. Distintas pruebas estadísticas son herramientas útiles para plantear hipótesis acerca de los procesos físicos, químicos y biológicos del océano. En este estudio se utilizó una prueba no paramétrica, el coeficiente de correlación de *Spearman*, además de una prueba paramétrica multivariada, el análisis de componentes principales (PCA). Posterior a estas pruebas se reanalizaron los datos aplicando un retraso de 1 semana (*1 lag*) nuevamente aplicando correlaciones de *Spearman* para observar si las correlaciones mejoraban, empeoraban o se mantenían.

Para el **bromuro de metilo** se obtuvieron correlaciones negativas con la clorofila *a*, abundancia de picoclorofitas y con el silicato. En el caso del PCA, las líneas de tendencia para este compuesto en su totalidad fueron opuestas (negativas) a todas las variables ambientales. Con respecto a la aplicación del retraso (*1 lag*), la única correlación que se mantuvo fue con el silicato. Sin embargo, se presentó una disminución en el valor de *r*. Las correlaciones con la clorofila *a* y con la abundancia de pico-clorofitas desaparecieron al aplicar el retraso (*1 lag*). Este resultado indica que estas interacciones entre el bromuro de metilo y las pico-clorofitas puede estar sucediendo en un periodo, por lo que al aplicar el retraso esta correlación disminuye. Con respecto a los resultados obtenidos de las correlaciones entre este compuesto y la diversidad microbiana, en el caso de 16S DNA la mayoría correlaciones positivas se dieron con grupos microbianos no muy abundantes. Sin embargo, la correlación positiva más significativa con este halometano se dio con el grupo Rhodospirillales, siendo este un grupo de los más abundantes a lo largo del año. En cuanto a las correlaciones con los grupos activos del gen 16S RNA, se presentaron correlaciones positivas y negativas, estas fueron con grupos muy representados a nivel de RNA. Llama la atención que las correlaciones que se presentaron en 16S DNA y 16S ARN fueron distintas, es decir en ninguno de los casos se presentó una correlación con un mismo grupo microbiano. Finalmente, las correlaciones que se obtuvieron para el 18S RNA, fue una correlación positiva con el grupo Coccolithales y negativa con el grupo MAST-4, siendo en ambos casos grupos poco representados a nivel de RNA, y por lo tanto poco activos en la comunidad. Los resultados obtenidos tanto de las correlaciones como del PCA, sugiere que este compuesto puede ser sintetizado, pero también puede estar siendo aprovechados por grupos bacterianos y fitoplanctónicos.

El **cloruro de metilo** presentó correlaciones negativas con las siguientes variables: producción bacteriana, producción bacteriana específica, abundancia de Criptofitas, abundancia de pico-clorofitas, abundancia de

nano-clorofitas, temperatura, clorofila a y silicato. Para el PCA este compuesto presentó tendencia positiva con la abundancia de cianobacterias, teniendo dirección opuesta con las demás variables. Aplicando el retraso (*1 lag*), la correlación con la producción bacteriana se mantuvo, y el valor de *r* fue el mismo. Con respecto al resto de variables antes mencionadas, estas ya no presentaron una correlación significativa con este halometano al aplicar el retraso. Sin embargo, se obtuvo una nueva correlación significativa, siendo esta con la abundancia de nanoflagelados heterotóficos (HNF). El hecho que la mayoría de las correlaciones significativas se presentaron al no aplicar el retraso en los datos, sugiere que las interacciones entre estos parámetros y el cloruro de metilo tienen lugar de forma simultánea. Las correlaciones significativas entre este compuesto y la comunidad microbiana a nivel de ADN (16S DNA), en su mayoría fueron negativas. Destaca la correlación negativa con el grupo Flavobacteriales, el grupo más abundante en la comunidad microbiana a lo largo del año, y una correlación positiva con el grupo SAR11 tratándose también de un grupo abundante. Para el caso de las correlaciones con grupos microbianos a nivel de RNA 16S, se obtuvieron correlaciones positivas y negativas, estas se presentaron con grupos poco representados a nivel de expresión. En el análisis de 18S RNA se presentó una sola correlación significativa, la cual fue negativa, con el grupo Phaeocystis, un grupo poco representado. El hecho que las correlaciones con un gran número de parámetros biológicos sean negativas, sugiere que existe un consumo de este halometano por parte de las bacterias, así como ciertos grupos del fitoplancton.

Para el **yoduro de metilo** se obtuvieron correlaciones significativas tanto positivas como negativas con distintos parámetros bióticos y abióticos. Las correlaciones positivas fueron con la producción bacteriana, temperatura y el nitrato. La correlación negativa se presentó con la abundancia de *Ostreococcus* y *Micromonas*. Al aplicar el PCA, fue posible observar nuevamente una correlación significativa positiva entre este halometano y la producción bacteriana además de la temperatura, sumándose nuevas correlaciones positivas con la abundancia de pico-clorofitas y con la salinidad. Al aplicar el retraso (*1 lag*), las correlaciones con la producción bacteriana y el nitrato se perdieron. Sin embargo, en el caso de la temperatura, la correlación significativa se mantuvo y aumentó el valor de *r*. Para la abundancia de *Ostreococcus* y *Micromonas* la correlación se mantuvo, pero disminuyó su valor de *r*. Por lo que se puede pensar que en el caso de las correlaciones con variables bióticas estas pueden estar sucediendo en periodos cortos y por eso las correlaciones desaparecieron al aplicar el retraso. Con respecto a las correlaciones significativas que se obtuvieron en el análisis de 16S DNA, en su totalidad estas fueron negativas, destacando la correlación negativa relevante con el grupo Pirellulales, un grupo abundante en la comunidad microbiana a lo largo del año. Para el análisis de 16S RNA, las correlaciones fueron en mayoría negativas, presentando una correlación negativa con Opituales un grupo bien representado a nivel de RNA. En el caso de las correlaciones que se observaron tanto a nivel de 16S DNA y 16S RNA, no se

observaron correlaciones con grupos similares, es decir no se correlaciona este compuesto con algún grupo en particular abundante (DNA) y activo (RNA). Para las correlaciones con el 18S RNA, estas fueron en su mayoría negativas, presentando una correlación negativa con Prymnesiales y una correlación positiva con Ochrophyta, siendo en ambos casos los grupos más activos. Derivado de los resultados obtenidos de las correlaciones y PCA, es posible determinar que la temperatura como un factor abiótico de importancia para la síntesis de este compuesto, ya que la temperatura influye en el crecimiento bacteriano. Posiblemente debido a esta influencia se presentó una correlación positiva estadísticamente significativa con la producción bacteriana. Tomando en cuenta las correlaciones con grupos microbianos abundantes y activos, las cuales fueron positivas y negativas, se puede considerar que este compuesto está siendo producido y consumido por grupos bacterianos y fitoplanctónicos abundantes y activos en el océano. Es importante destacar que Gomez- Consarnau et al. (2021) ya reportó correlaciones positivas entre las tasas de crecimiento bacteriano y la síntesis del yoduro de metilo en cultivos de bacterias en laboratorio. Concretamente, el yoduro de metilo presentó los valores más altos de síntesis en comparación a otros halometanos, y siendo la temperatura un factor clave, debido a que estimula el crecimiento bacteriano. También Hirata et al. (2017) reportaron una correlación positiva entre este compuesto y el aumento de la temperatura en un ambiente controlado. El obtener como resultado correlaciones positivas entre el yoduro de metilo con la temperatura y la producción bacteriana, da paso a considerar que la síntesis de este halometano a partir de bacterias marinas, no solo se presenta en cultivos de laboratorio, sino que también está ocurriendo en el océano.

El **dicloro metano** presentó correlaciones negativas con las siguientes variables ambientales: producción bacteriana, producción bacteriana específica, clorofila *a*, abundancia de Criptofitas, abundancia de picoclorofitas, abundancia de nano- clorofitas y silicato. A partir del PCA para este compuesto, se obtuvo como resultado que este halometano presenta una dirección opuesta con respecto a las variables ambientales, siendo la salinidad la única variable en presentar una misma dirección. Los resultados que se obtuvieron al aplicar el retraso (*1 lag*) para este compuesto, presentaron pérdidas de correlaciones significativas, como con la clorofila *a*, la abundancia de Criptofitas y el silicato. Las correlaciones que se mantuvieron fueron con la producción bacteriana, la producción bacteriana específica, la abundancia de pico- clorofitas y la abundancia de nano- clorofitas. Sin embargo, en todos los casos el valor de *r* disminuyó, asimismo se presentó una nueva correlación la cual fue con la abundancia de los nanoflagelados heterotróficos (HNF). Con respecto a las correlaciones con los grupos microbianos a nivel de ADN (16S DNA), las correlaciones significativas fueron en su mayoría positivas, aunque dos correlaciones significativas negativas se presentaron Rhodobacterales y Balneonales, siendo estos grupos abundantes en la comunidad microbiana. En cuanto a las correlaciones significativas a nivel de expresión (16S RNA), estas fueron tanto

positivas como negativas, destacando la correlación positiva con el grupo microbiano más activo a lo largo del año, Synechococcales. Las correlaciones significativas a nivel de 16S DNA y 16S RNA, no coincidieron. Para el 18S RNA, se presentó una sola correlación negativa con el grupo Charophyta, siendo este un grupo poco representado a nivel de ARN. En resumen, estos datos muestran que existe una influencia de variables tanto bióticas como abióticas en la síntesis de dicloro metano. Por otro lado, no se está observando solamente una síntesis del dicloro metano en el sistema, sino que derivado de las correlaciones negativas con grupos bacterianos y fitoplanctónicos, puede determinarse que algunos grupos microbianos pueden estar consumiendo a este compuesto.

En el caso del **dibromo metano**, este compuesto presentó solamente una correlación positiva, con el nitrato. Al aplicar el PCA se observó una tendencia similar a la producción bacteriana, temperatura y la abundancia de pico-clorofitas. En el caso del retraso (*1 lag*), la correlación significativa positiva con el nitrato se perdió, sugiriendo que la interacción entre estos parámetros abióticos ocurre de forma sincronizada. Con respecto a las correlaciones significativas que se obtuvieron para el 16S DNA, solo se presentó una correlación positiva con el grupo Phycisphaerales, siendo este un grupo poco abundante. Para el 16S RNA, las correlaciones fueron principalmente negativas y con grupos poco representados a nivel de expresión. El análisis de 18S RNA, presenta una sola correlación negativa con el grupo Leucocryptos, el cual fue poco activo respecto al resto de la comunidad microbiana eucariota. El dibromo metano es el halometano que presentó la menor interacción con las variables ambientales bióticas y abióticas, considerando que quizá su síntesis puede estar influenciada por otros factores que no se midieron en este estudio.

Los resultados que se obtuvieron para el **cloroformo** fueron correlaciones significativas negativas con las siguientes variables: producción bacteriana, producción bacteriana específica, clorofila α , abundancia de Criptofitas, abundancia de pico-clorofitas, abundancia de nano-clorofitas y una correlación positiva con el fósforo. Con el PCA fue posible observar que el halometano y las variables ambientales presentaron en todos los casos una dirección opuesta. Al aplicar el retraso (*1 lag*), la mayoría de las correlaciones significativas iniciales se perdieron, siendo la abundancia de pico-clorofitas y la producción bacteriana específica, las únicas variables que se mantuvieron, aunque con una disminución en el valor de r . Cabe destacar que se presentó una nueva correlación significativa con la abundancia de HNF, la cual en este caso fue negativa. Las correlaciones que se obtuvieron para el 16S DNA fueron tanto positivas como negativas. Las correlaciones más representativas fueron negativas con los grupos Flavobacteriales y Rhodobacteriales, siendo estos los grupos más abundantes en la comunidad microbiana procariota a lo largo del año. A nivel de 16S RNA, también se presentaron correlaciones significativas positivas y negativas,

siendo la correlación positiva con el grupo Synechococcales la más representativa, debido a que se trata del grupo más activo de la comunidad microbiana a nivel de expresión. No existieron correlaciones significativas coincidentes con grupos microbianos a nivel de 16S DNA y 16S RNA con este halometano. Para el 18S RNA, se presentó una sola correlación positiva con el grupo Protalveolata, siendo este un grupo poco activo. En la mayoría de los casos, se presentaron correlaciones negativas con los grupos bacterianos y fitoplanctónicos, lo que sugiere que este compuesto es principalmente utilizado por estos microorganismos.

Para el **bromoformo**, se obtuvieron dos correlaciones significativas positivas, uno con la temperatura y el otro con nitrato. En el PCA fue posible observar una tendencia similar a la de la temperatura y la salinidad. Al aplicar el retraso (*1 lag*), la correlación con la temperatura se mantuvo, y además aumento su valor de *r*. Por lo contrario, la correlación significativa con el nitrato desapareció y se presentó una nueva correlación significativa, esta con la abundancia de HNF la cual fue negativa. En cuanto a las correlaciones significativas entre este halometano y la comunidad microbiana a nivel de 16S DNA, se presentaron correlaciones positivas y negativas, destacando la correlación positiva con el grupo Rhodospirillales el cual fue un grupo abundante en la comunidad microbiana a lo largo del año. Las correlaciones que se presentaron entre el bromoformo y la comunidad microbiana a nivel del 16S RNA también fueron negativas y positivas, las correlaciones negativas con grupos como SAR11, SAR86 y Pirellulares, siendo estos grupos activos. Para el 18S RNA, se presentó una sola correlación positiva, esta con el grupo MAST-8, el cual fue poco activo. Derivado de los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico, se puede determinar que la síntesis de este halometano está influenciada por factores principalmente abióticos, siendo la temperatura un factor clave para su producción en el ambiente natural. Considerando que este compuesto es utilizado, por grupos bacterianos y fitoplanctónicos presentes en el océano. La temperatura es un factor abiótico de importancia para la síntesis de este compuesto, ya que Hirata et al. (2017) reportan a la temperatura como una variable que estimula en bacterias la síntesis de este compuesto. Ahora con este trabajo, podemos determinar que esta interacción ocurre, no solo en experimentos de laboratorio, sino que también en el medio natural.

Capítulo 5. Conclusiones

Las concentraciones ambientales de distintos halometanos en el mar se ven reguladas por diferentes factores bióticos y abióticos, siendo la temperatura un factor crucial en los niveles de concentración del yoduro de metilo y el bromoformo.

Las concentraciones de yoduro de metilo en el ambiente natural están correlacionadas positivamente con las tasas de crecimiento bacteriano (o producción bacteriana), lo que sugiere que la síntesis de este compuesto es dominante en el bacterioplancton en su medio natural.

Para el cloruro de metilo, el dicloro metano y el cloroformo se obtuvieron correlaciones negativas con la producción bacteriana, sugiriendo que el consumo de estos halometanos es llevado a cabo principalmente por miembros de la comunidad bacteriana.

Estos resultados pueden ser útiles a la hora de realizar predicciones de las concentraciones de halometanos, con solo conocer la actividad bacteriana de la comunidad.

Las correlaciones positivas y negativas entre halometanos y miembros de la comunidad microbiana podrían indicar procesos tanto de “síntesis” como de “consumo” de estos compuestos por parte de grupos específicos. En el caso del yoduro de metilo, se identificó al grupo bacteriano Alteromonadales como principales productores y al grupo Opituales como principales consumidores de este compuesto.

Al aplicar un retraso en las correlaciones entre halometanos y variables ambientales, la correlación entre el yoduro de metilo y la temperatura presentó un aumento en su coeficiente de correlación (r). Esto podría explicarse por el efecto de la temperatura con el tiempo sobre el metabolismo de las bacterias, aumentando sus tasas de crecimiento y a su vez la concentración del yoduro de metilo.

Literatura citada

- Bakun, A., Nmfs, M. C. A. P. E. G. 1973. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946-71. (June). NOAA Technical Report NMFS SSRF-617. Pag, 112.
- Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., ... Rozanov, E. V. 2018. Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(2), 1379–1394. doi:10.5194/acp-18-1379-2018
- Bloem J, Bir-Gilissen MJB. 1989. Bacterial activity and protozoan grazing potential in a stratified lake. *Limnol Oceanogr* 34:297-309
- Butler, J. H., King, D. B., Lobert, J. M., Montzka, S. A., Yvon-Lewis, S. A., Hall, B. D., Warwick, N. J., Mondell, D. J., Aydin, M., Elkins, J. W. 2007. Oceanic distributions and emissions of short-lived halocarbons. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(1), 1–11. doi:10.1029/2006GB002732
- Carpenter LJ, Malin G & Liss P.S. 2000. Novel biogenic iodine-containing trihalomethanes and other short-lived halocarbons in the coastal East Atlantic. *Glob. Biogeochem. Cycles* 14: 1191–1204
- Carpenter, L. J., and others. 2014. Update on ozone- depleting substances (ODSs) and other gases of interest to the montreal protocol (Chapter 1). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 55*, World Meteorological Organization.
- Dimmer, C. H., Simmonds, P. G., Nickless, G., Bassford, M. R. 2001. Biogenic fluxes of halomethanes from Irish peatland ecosystems. *Atmospheric Environment*, 35(2), 321–330. doi:10.1016/S1352-2310(00)00151-5
- Ducklow, H. W. 2000. Bacterial Production and Biomass in the Oceans. *Microbial Ecology of the Oceans.*, (January 2000), 85–119.
- Ducklow, H. W., O. Schofield, M. Vernet, S. Stammerjohn, and M. Erickson. 2012. Multiscale control of bacterial production by phytoplankton dynamics and sea ice along the western Antarctic Peninsula: A regional and decadal investigation. *J. Mar. Syst.* 98–99: 26–39. doi:10.1016/j.jmarsys. 2012.03.003
- Gasol, J. M., Del Giorgio, P. A. 2000. Using flow cytometry for counting natural planktonic bacteria and understanding the structure of planktonic bacterial communities. *Scientia Marina*, 64(2), 197–224. doi:10.3989/scimar.2000.64n2197
- Gómez-Consarnau, L., Klein, N. J., Cutter, L. S., Sañudo-Wilhelmy, S. A. 2021. Growth rate-dependent synthesis of halomethanes in marine heterotrophic bacteria and its implications for the ozone layer recovery. *Environmental Microbiology Reports*, 13(2), 77–85. doi:10.1111/1758-2229.12905
- Hirata, M., Ikeda, M., Fukuda, F., Abe, M., Sawada, H., Hashimoto, S. 2017. Effect of temperature on the production rates of methyl halides in cultures of marine proteobacteria. *Marine Chemistry*, 196(July), 126–134. doi:10.1016/j.marchem.2017.08.012

- Johnson, T. L., Brahamsha, B., Palenik, B., Mühle, J. 2015. Halomethane production by vanadium-dependent bromoperoxidase in marine *Synechococcus*. *Limnology and Oceanography*, 60(5), 1823–1835. doi:10.1002/lno.10135
- Kirchman, D., K'nees, E., Hodson, R. 1985. Leucine incorporation and its potential as a measure of protein synthesis by bacteria in natural aquatic systems. *Applied and Environmental Microbiology*, 49(3), 599–607. doi:10.1128/aem.49.3.599-607.1985
- Kirchman D, Soto Y, Wambeck FV, Bianchi M. 1989. Bacterial production in the Rh6ne River plume: Effect of mixing on relationships among microbial assemblages. *Mar Ecol Prog Ser* 53:267-275
- Kirchman, D. L., X. A. G. Morán, and H. Ducklow. 2009. Microbial growth in the polar oceans - role of temperature and potential impact of climate change. *Nat. Rev. Microbiol.* 7: 451–459. doi:10.1038/nrmicro2115
- Kurihara, M. K., Kimura, M., Iwamoto, Y., Narita, Y., Ooki, A., Eum, Y. J., Tsuda, A., Suzuki, K., Tani, Y., Yokouchi, Y., Uematsu, M., Hashimoto, S. 2010. Distributions of short-lived iodocarbons and biogenic trace gases in the open ocean and atmosphere in the western North Pacific. *Marine Chemistry*, 118(3–4), 156–170. doi:10.1016/j.marchem.2009.12.001
- Kurylo, M.J., Rodriguez, J.M., 1998. Short-lived ozone-related compounds. In: Albritton, D.L., Watson, R.T., Aucamp, P.J. (Eds.) *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*. Report No. 44, World Meteorological Organization, Geneva, 1999.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P. & Stephens, C. 2000 Warming of the world ocean. *Science* 287, 2225 – 2229. (doi:10.1126/science.287.5461.2225)
- Manley, S. L. 2002. Phyto-genesis of halomethanes: A product of selection or a metabolic accident? *Biogeochemistry*, 60(2), 163–180. doi:10.1023/A:1019859922489
- Meehl, G. A. et al. 2007 The physical science basis. In *Climate change 2007 IPCC report*, pp. 748 – 845. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Molina, M. J. and Rowland, F. S.: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature*, 249, 810–812, <https://doi.org/10.1038/249810a0>, 1974.
- Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., Butler, J. H. 2011. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476(7358), 43–50. doi:10.1038/nature10322
- Morgan, Cheryl A.; Beckman, Brian R.; Weitkamp, Laurie A.; Fresh, Kurt L. (2019). *Recent Ecosystem Disturbance in the Northern California Current*. *Fisheries*, 44(10), 465–474. doi:10.1002/fsh.10273
- Piontek, J., M. Sperling, E.-M. Nöthig, and A. Engel. 2015. Multiple environmental changes induce interactive effects on bacterial degradation activity in the Arctic Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 60: 1392–1410. doi:10.1002/lno.10112
- Piontek, J., Galgani, L., Nöthig, E. M., Peeken, I., Engel, A. 2021. Organic matter composition and heterotrophic bacterial activity at declining summer sea ice in the central Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 66(S1), S343–S362. doi:10.1002/lno.11639

- Prinn, R. G., Weiss, R. F., Fraser, P. J., Simmonds, P. G., Cunnold, D. M., Alyea, F. N., O'Doherty, S., Salameh, P., Miller, B. R., Huang, J., Wang, R. H. J., Hartley, D. E., Harth, C., Steele, L. P., Sturrock, G., Midgley, P. M., McCulloch, A. 2000. A history of chemically and radiatively important gases in air deduced from ALE/GAGE/AGAGE. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D14), 17751–17792. doi:10.1029/2000JD900141
- Prinn, R. G., Weiss, R. F., Arduini, J., Arnold, T., Langley Dewitt, H., Fraser, P. J., Ganesan, A. L., Gasore, J., Harth, C. M., Hermansen, O., Kim, J., Krummel, P. B., Li, S., Loh, Z. M., Lunder, C. R., Maione, M., Manning, A. J., Miller, B. R., ... Zhou, L. 2018. History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE). *Earth System Science Data*, 10(2), 985–1018. doi:10.5194/essd-10-985-2018
- Sarmento, H., Montoya, J. M., Vázquez-Domínguez, E., Vaqué, D., Gasol, J. M. 2010. Warming effects on marine microbial food web processes: How far can we go when it comes to predictions? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2137–2149. doi:10.1098/rstb.2010.0045
- Smith, D. C., Azam, F. 1992. A simple, economical method for measuring bacterial protein synthesis rates in seawater using tritiated-leucine. *Marine Microbial Food Webs*, 6(2), 107–114.
- Stark, M. S., Klein, K., Weide, B., Haydu, L. E., Pflugfelder, A., Tang, Y. H., Palmer, J. M., Whiteman, D. C., Scolyer, R. A., Mann, G. J., Thompson, J. F., Long, G. V., Barbour, A. P., Soyer, H. P., Garbe, C., Herington, A., Pollock, P. M., Hayward, N. K. 2015. The Prognostic and Predictive Value of Melanoma-related MicroRNAs Using Tissue and Serum: A MicroRNA Expression Analysis. *EBioMedicine*, 2(7), 671–680. doi:10.1016/j.ebiom.2015.05.011
- Timmermann, A., Oberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M. & Roeckner, E. 1999 Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* 398, 694–697.
- White, P. A., Kalff, J., Rasmussen, J. B., Gasol, J. M. 1991. The Effect of Temperature and Algal Biomass on Bacterial Production and Specific Growth Rate in Freshwater and Marine Habitats Author (s): Paul A . White , Jacob Kalff , Joseph B . Rasmussen and Josep M . Gasol Published by : Springer Stable URL : http://Microbial Ecology, 21(2), 99–118.
- Wilson, J. M., Carter, M. L., Mühle, J., Bowman, J. S. 2020. Using empirical dynamic modeling to assess relationships between atmospheric trace gases and eukaryotic phytoplankton populations in coastal Southern California. *Marine Chemistry*, 227(February), 103896. doi:10.1016/j.marchem.2020.103896

Anexos

ANEXO A.

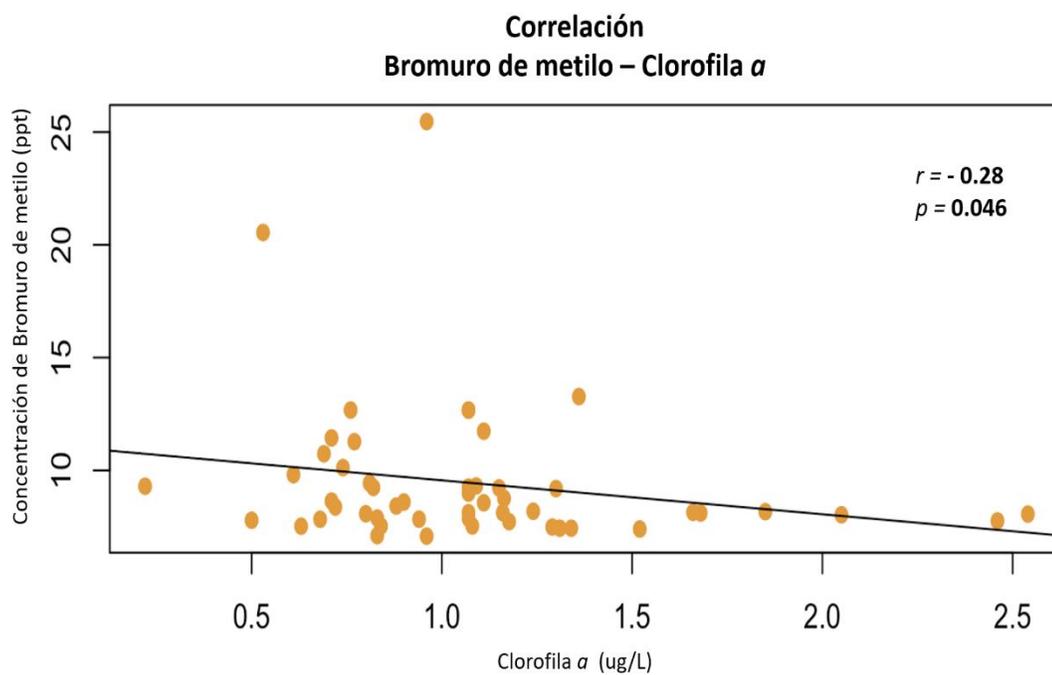


Figura 55. Gráfico de dispersión, correlación entre bromuro de metilo y Clorofila a durante el año 2015.

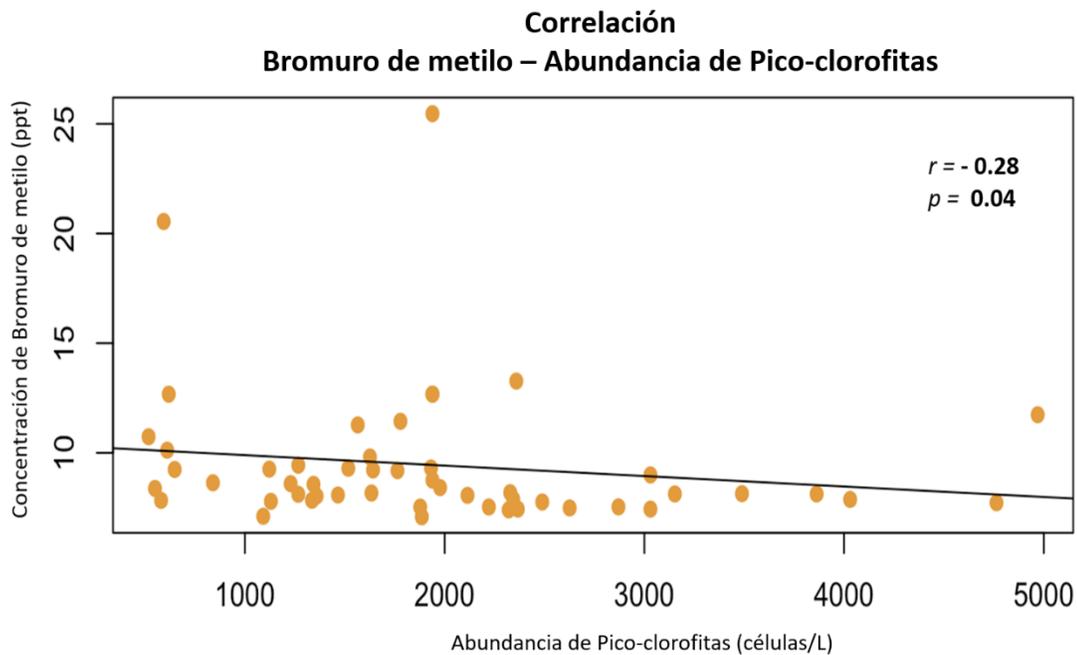


Figura 56. Gráfico de dispersión, correlación entre bromuro de metilo y la abundancia de Pico-clorofitas durante el año 2015.

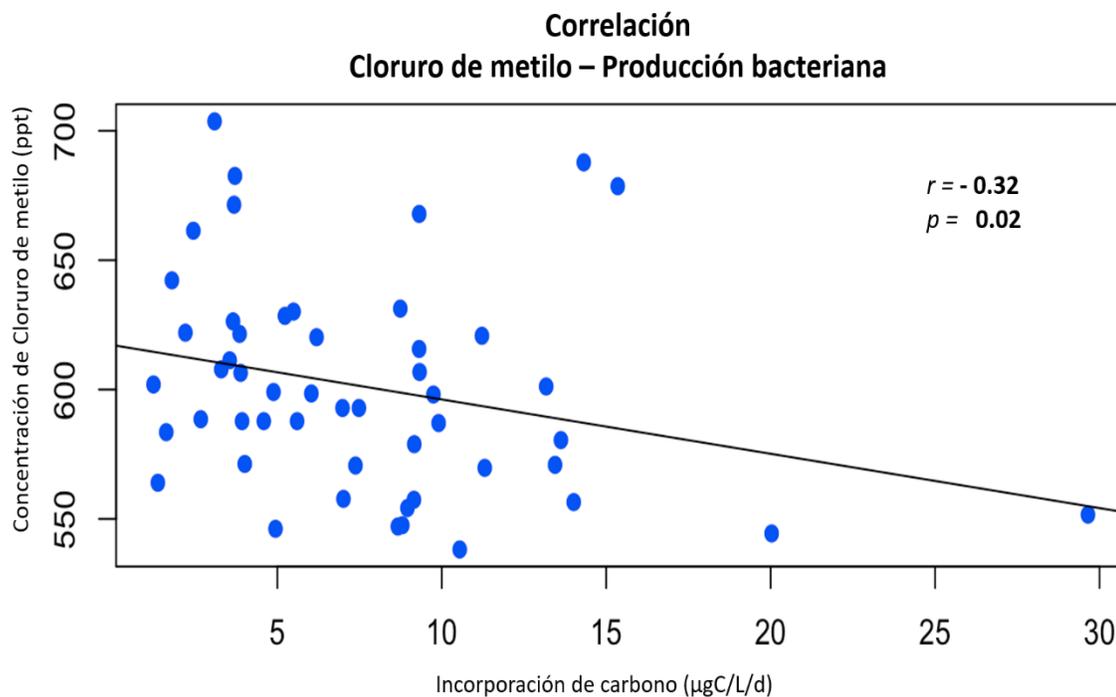


Figura 57. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la producción bacteriana durante el año 2015.

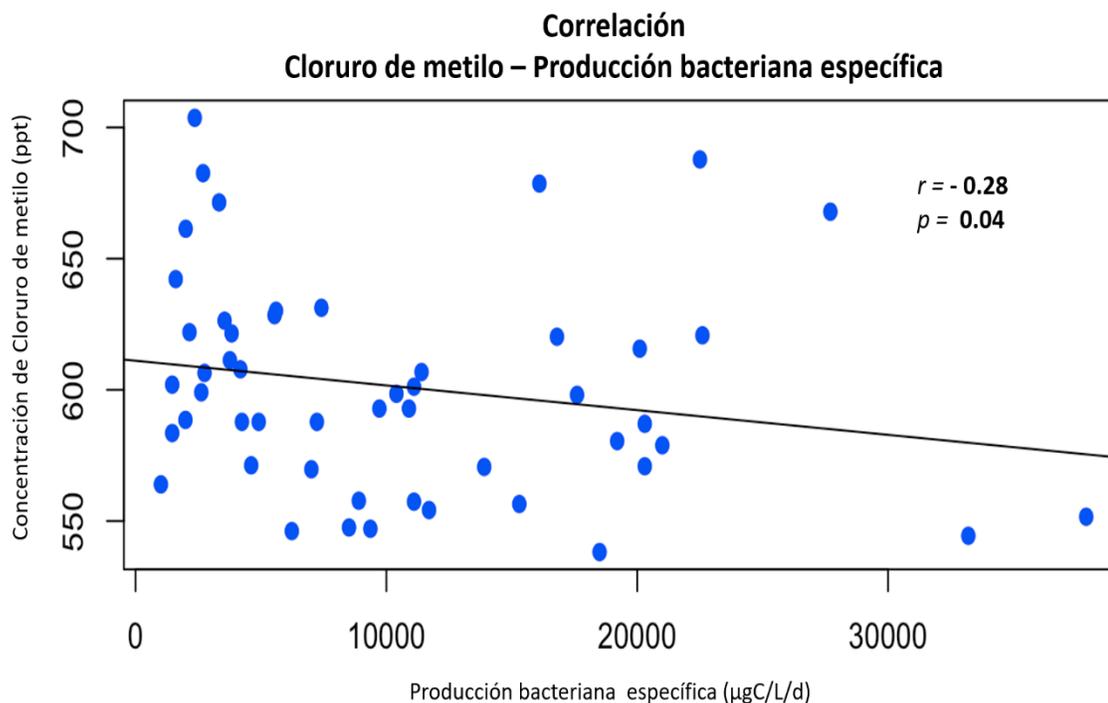


Figura 58. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la producción bacteriana específica durante el año 2015.

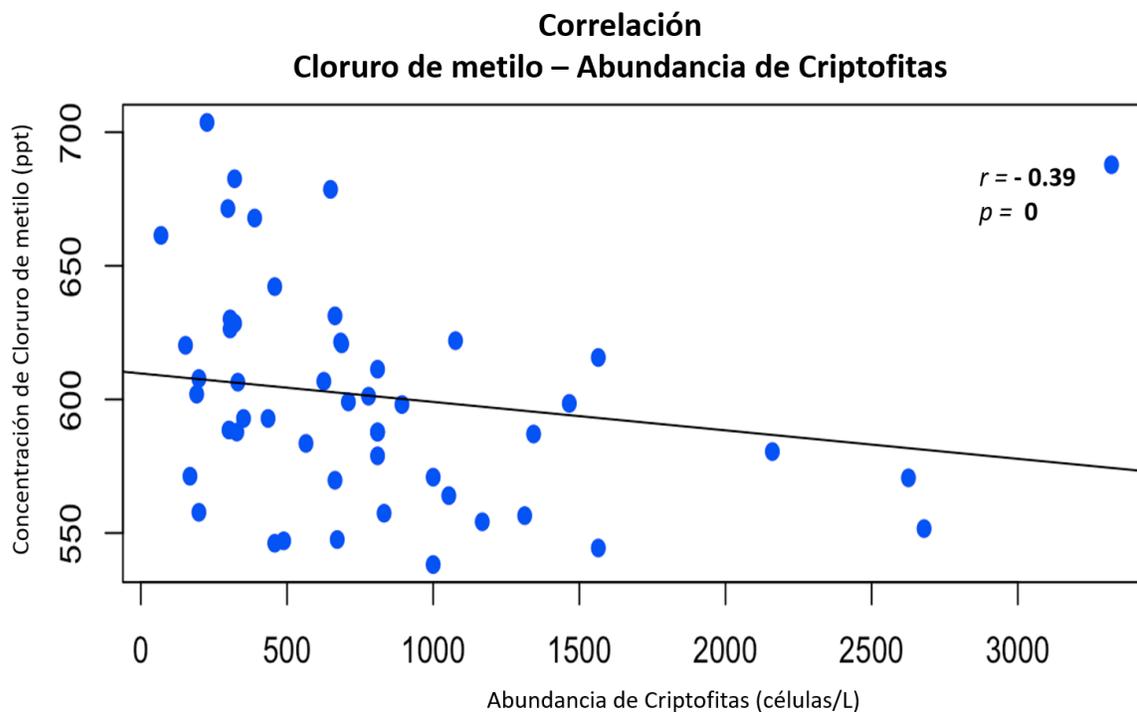


Figura 59. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la abundancia de Criptofitas durante el año 2015.

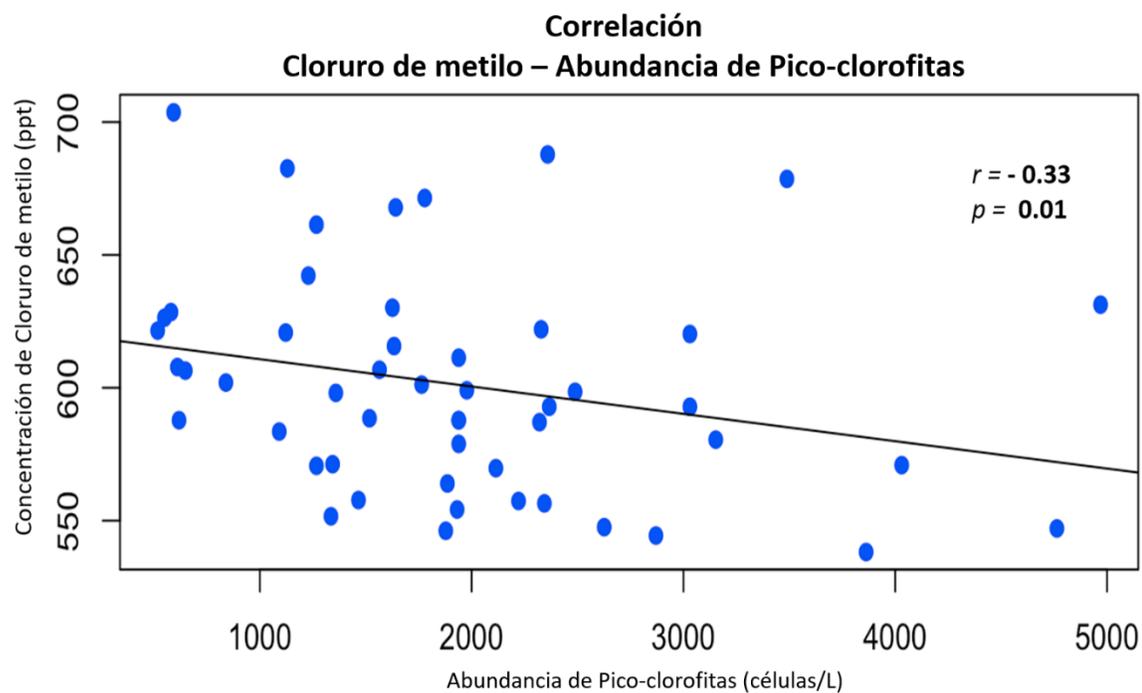


Figura 60. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la abundancia de Pico-clorofitas durante el año 2015.

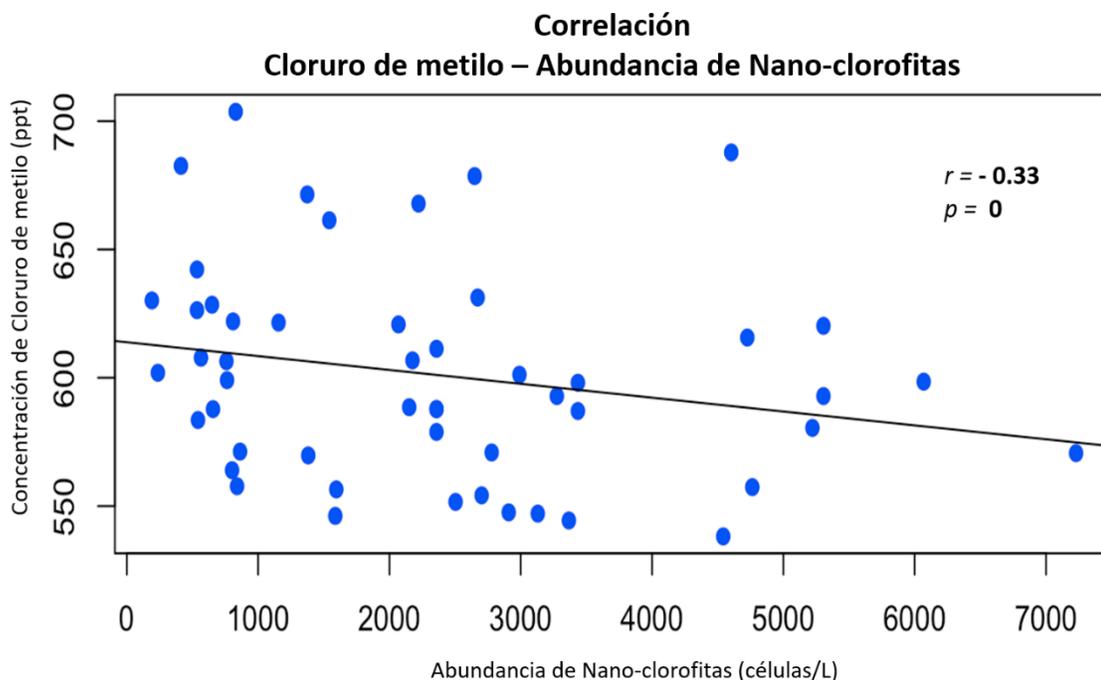


Figura 61. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y la abundancia de Nano-clorofitas durante el año 2015.

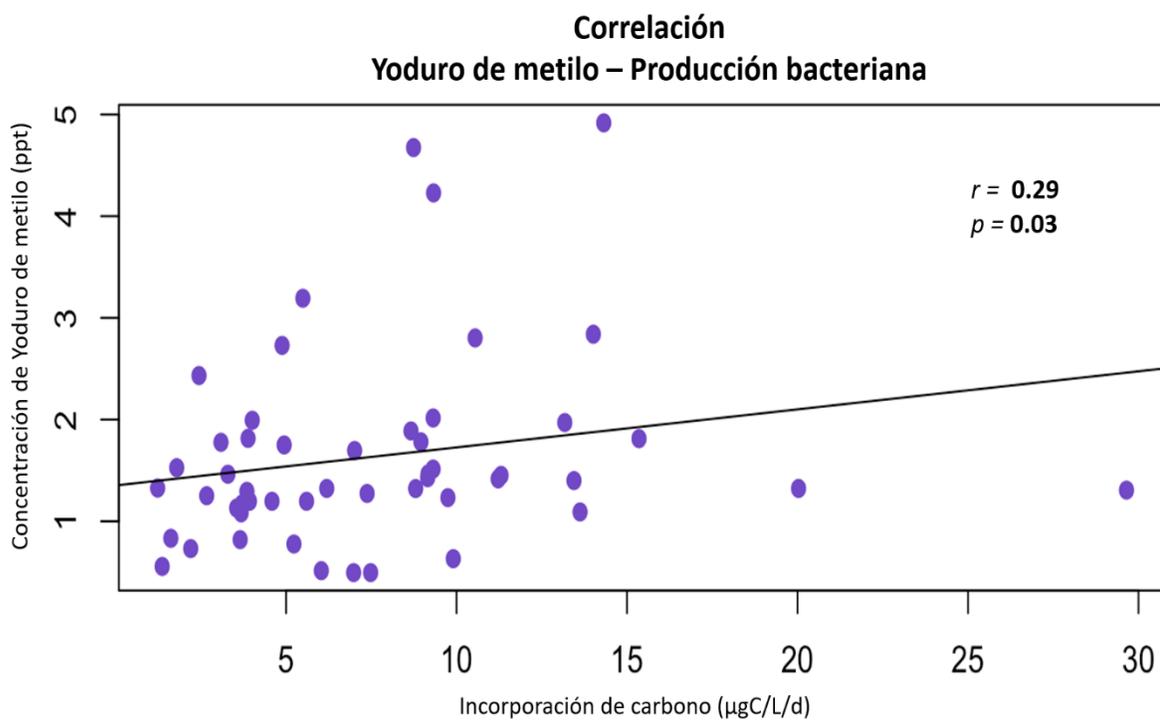


Figura 62. Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y la producción bacteriana durante el año 2015.

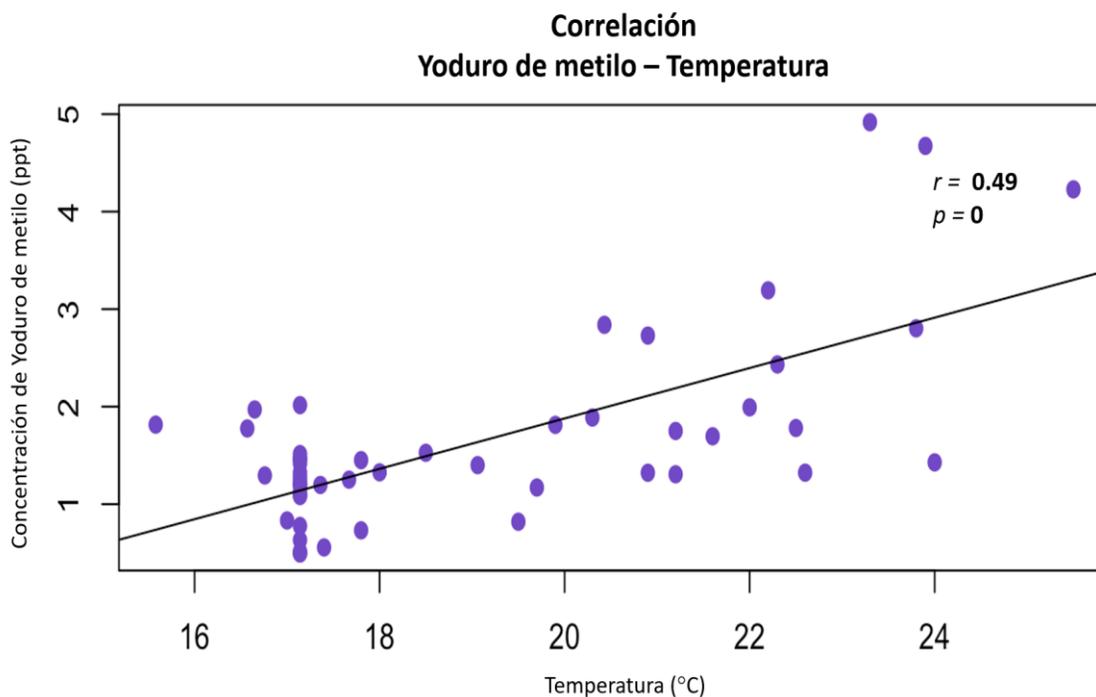


Figura 63. Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y la temperatura durante el año 2015.

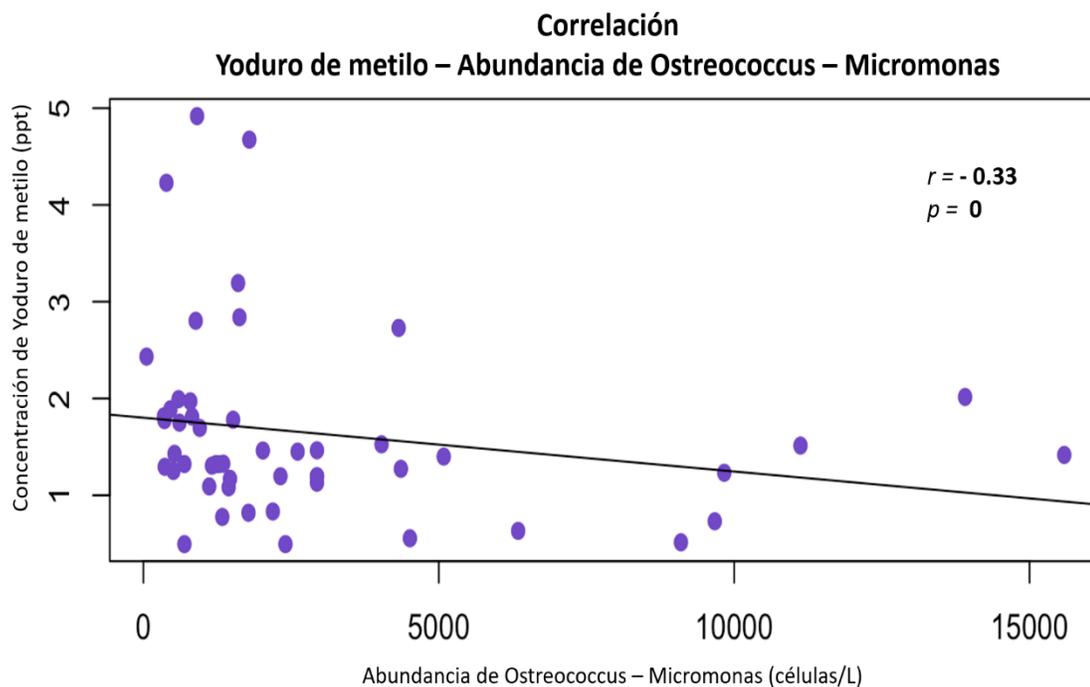


Figura 64. Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y la abundancia de Ostreococcus y Micromonas durante el año 2015.

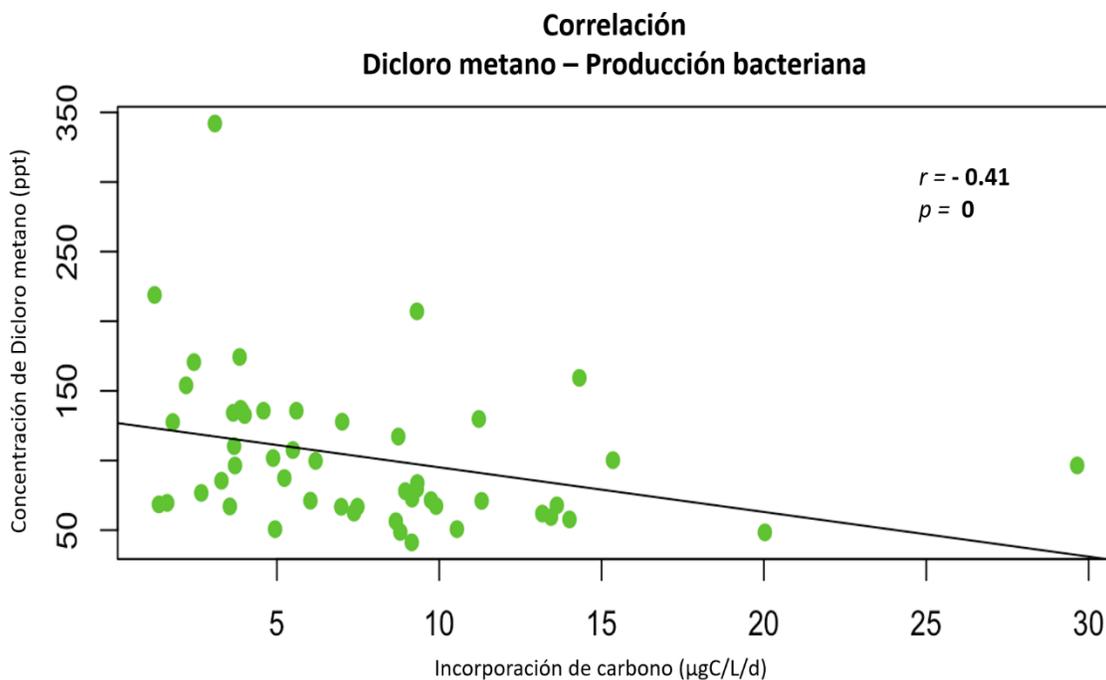


Figura 65. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la producción bacteriana durante el año 2015.

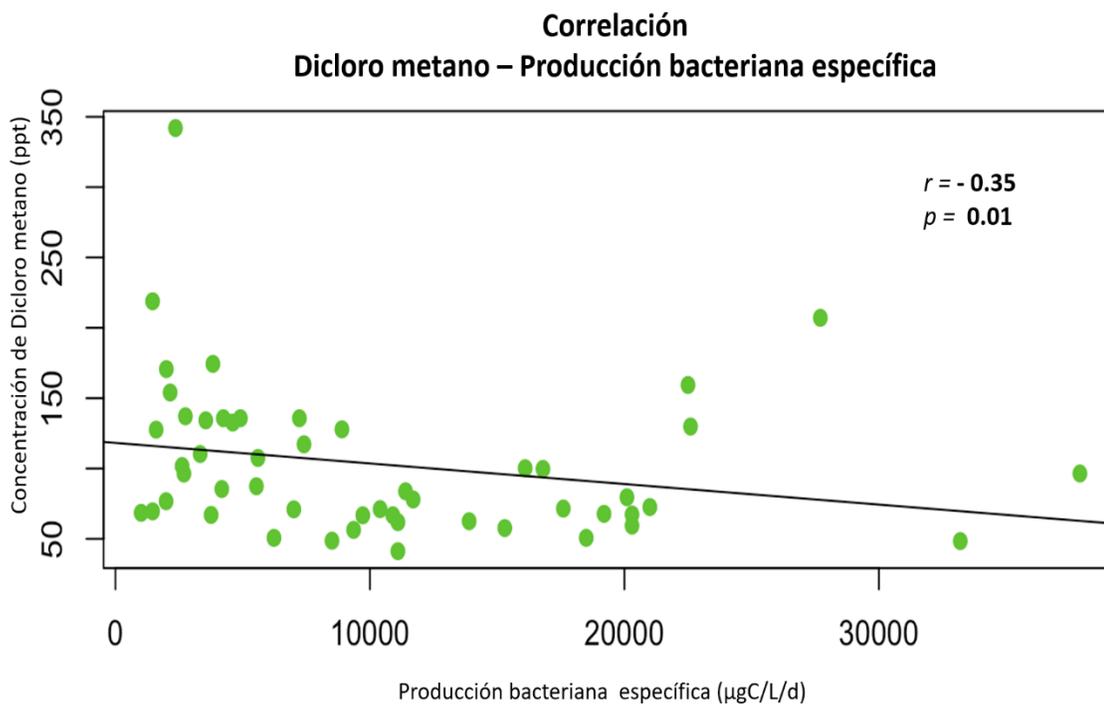


Figura 66. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la producción bacteriana específica durante el año 2015.

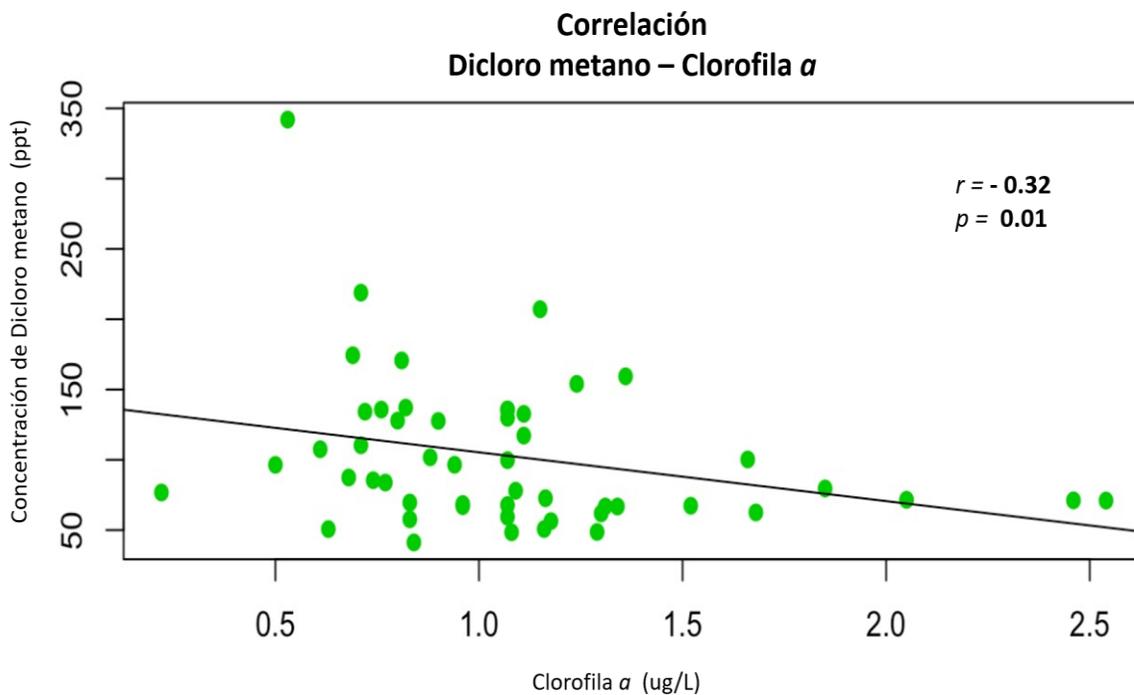


Figura 67. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y clorofila a durante el año 2015.

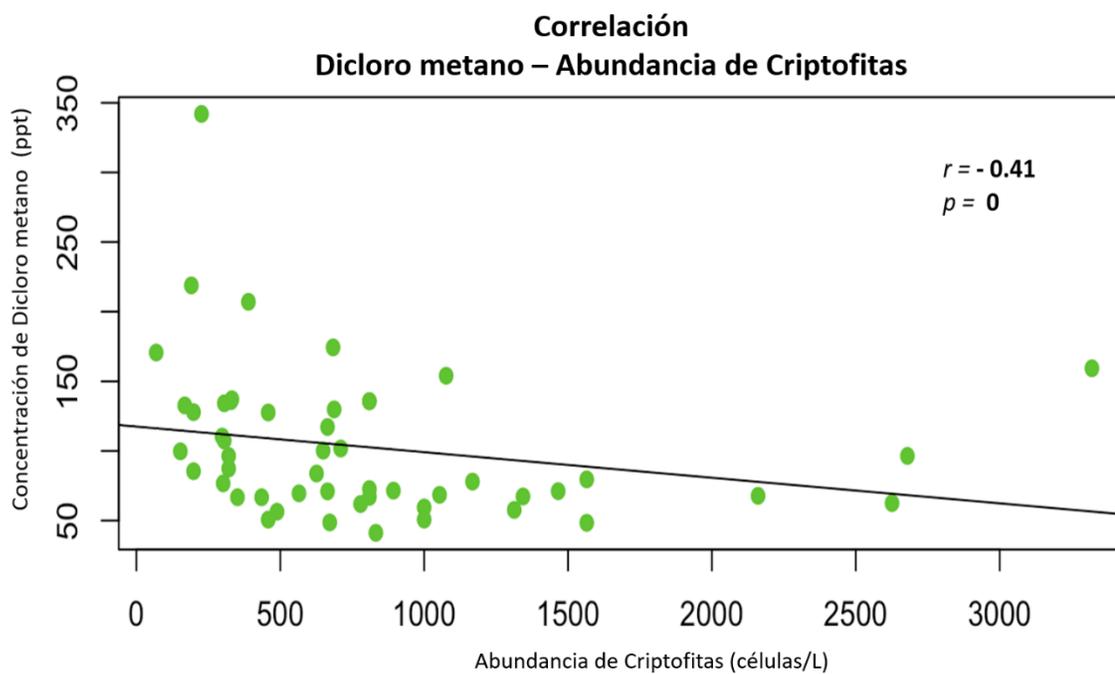


Figura 68. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la abundancia de Criptofitas durante el año 2015.

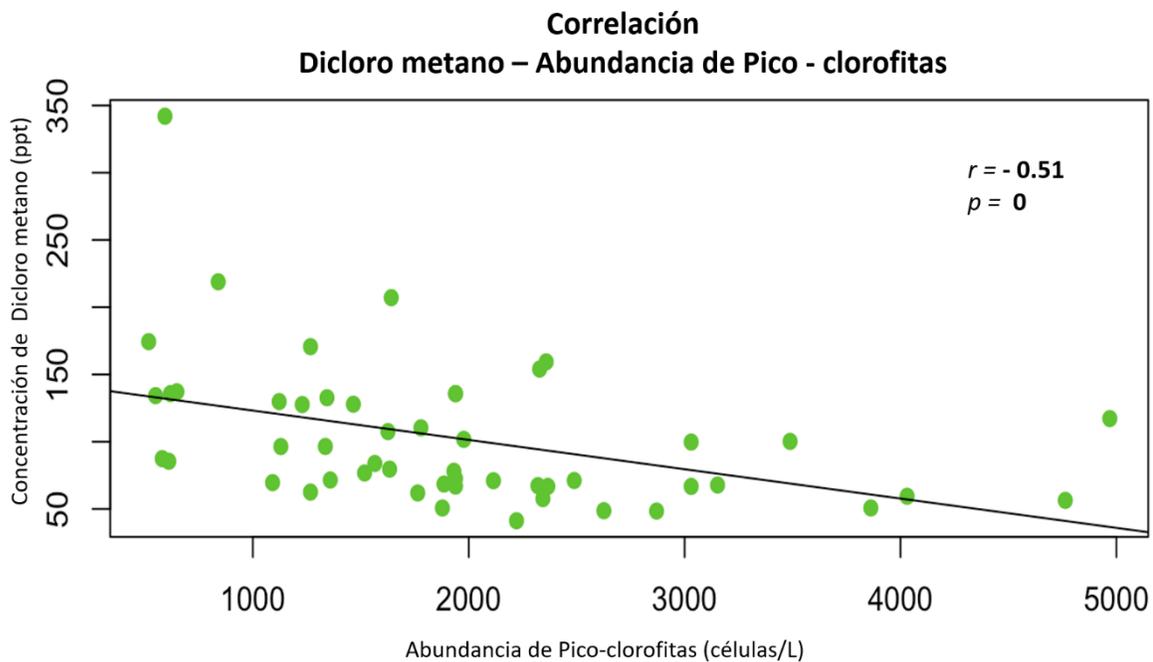


Figura 69. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la abundancia de Pico-clorofitas durante el año 2015.

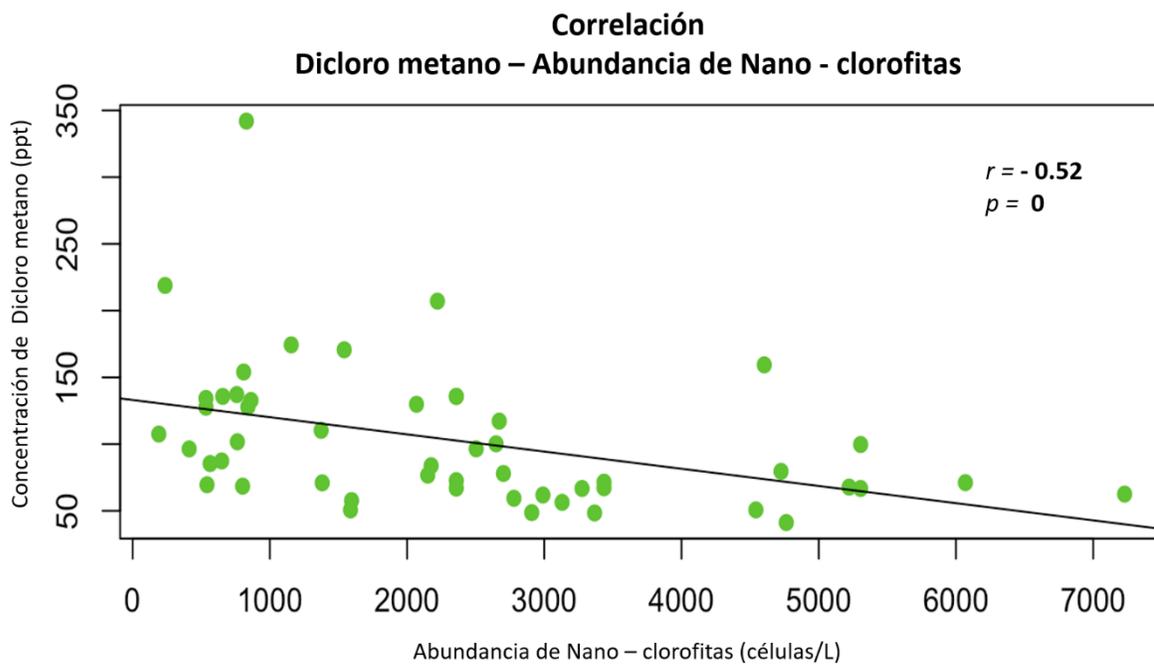


Figura 70. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y la abundancia de Nano-clorofitas durante el año 2015.

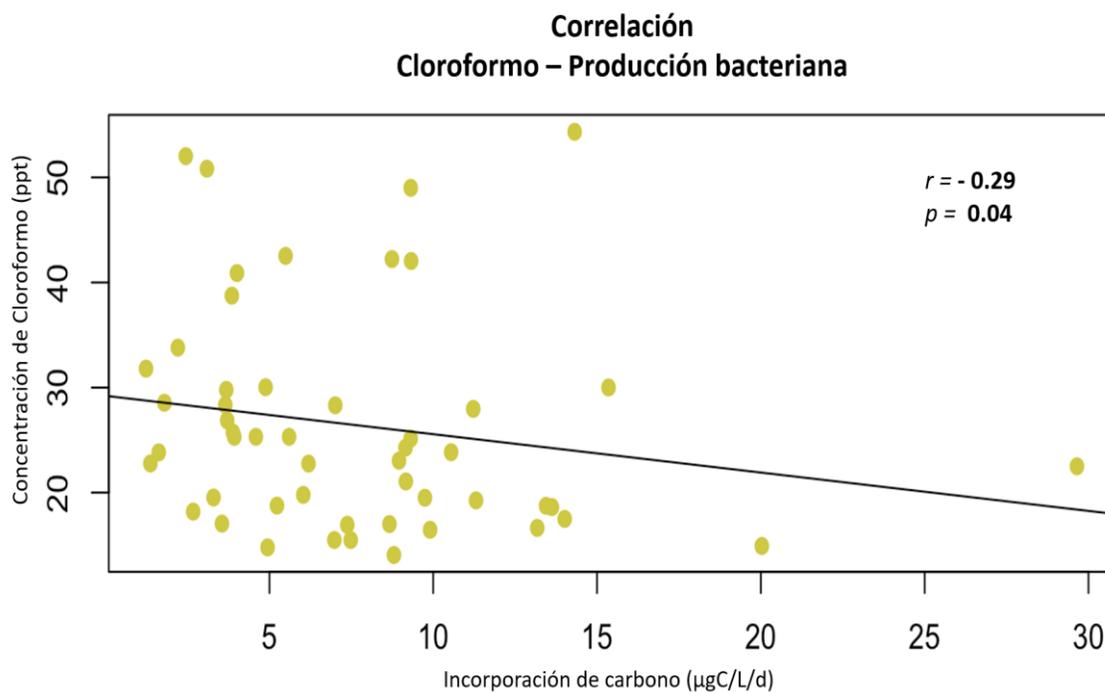


Figura 71. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la producción bacteriana durante el año 2015.

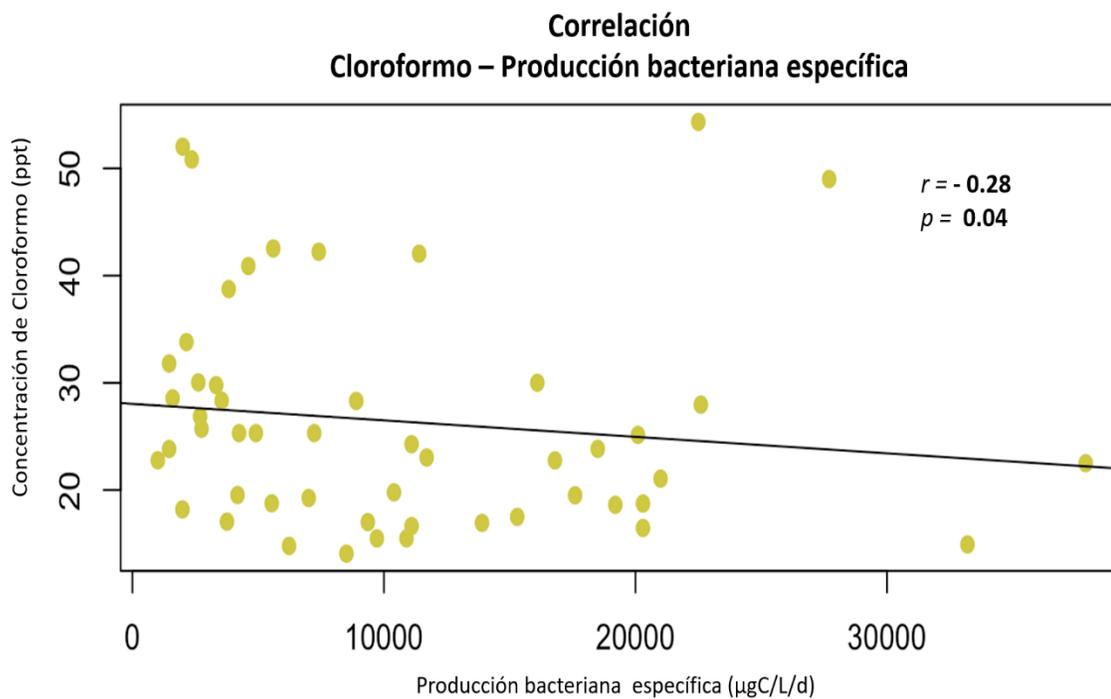


Figura 72. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la producción bacteriana específica durante el año 2015.

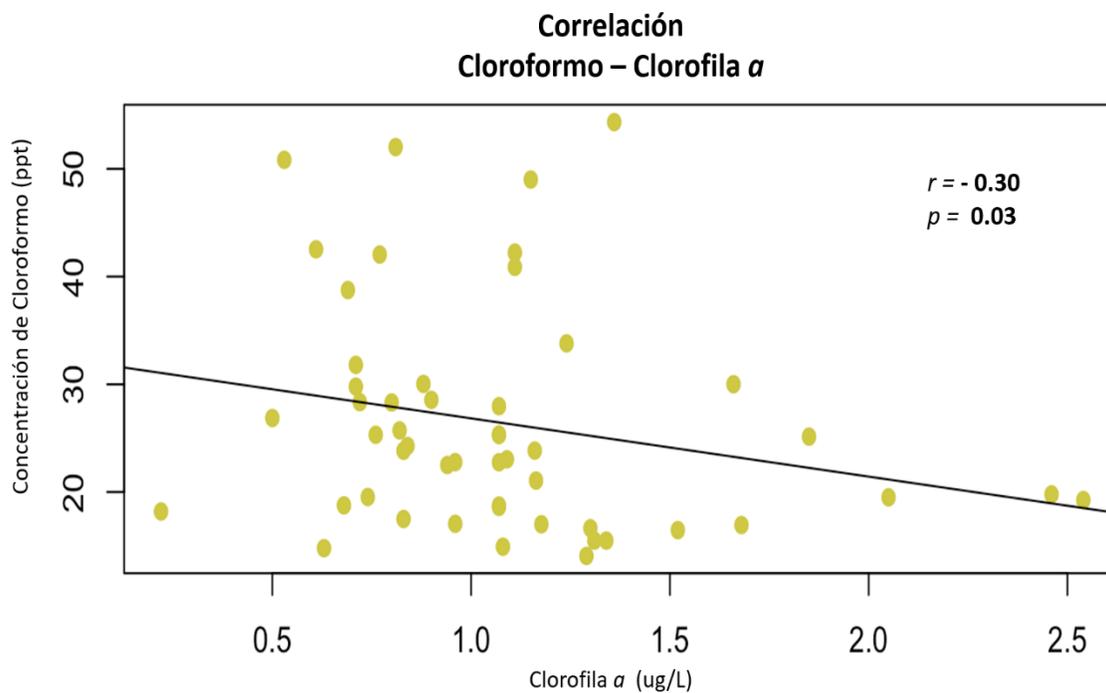


Figura 73. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y Clorofila a durante el año 2015.

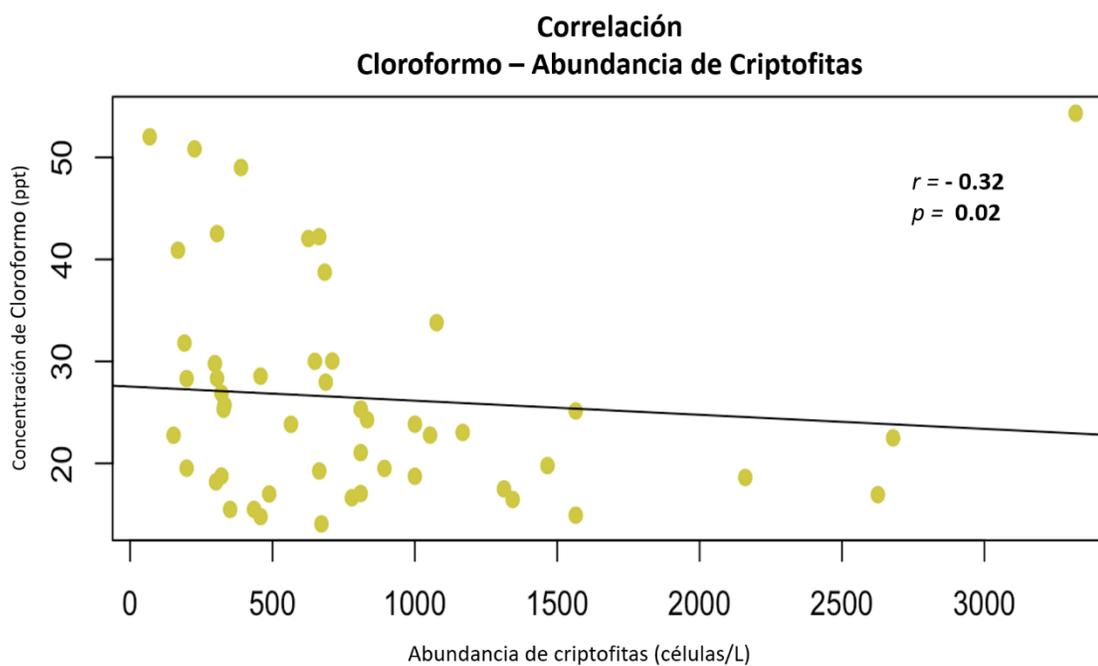


Figura 74. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la abundancia de Criptofitas durante el año 2015.

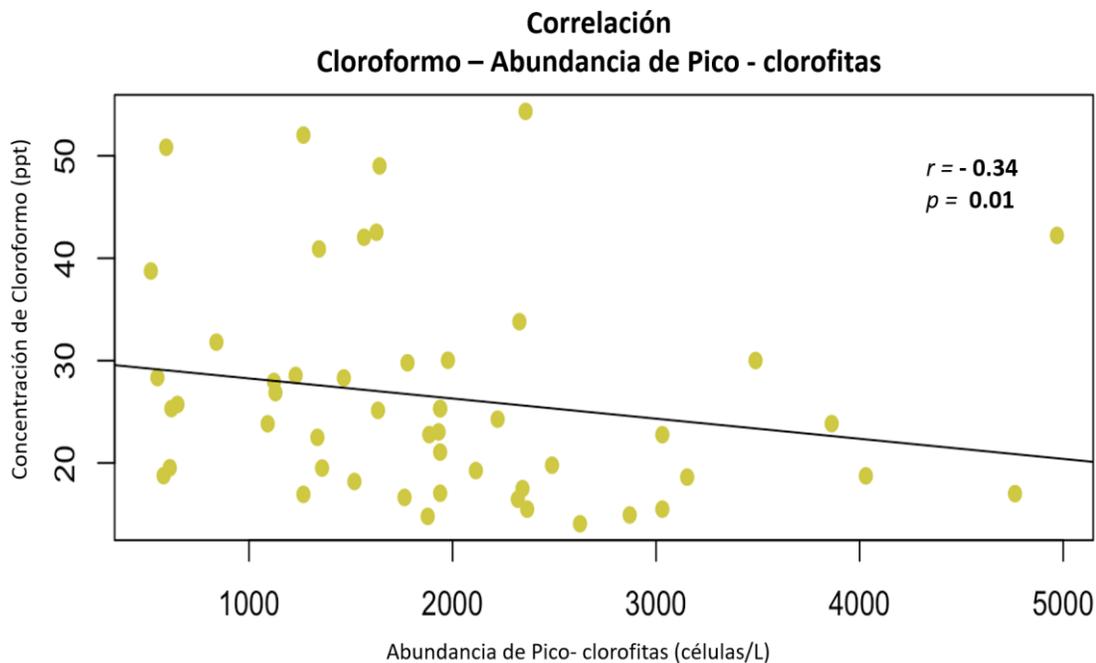


Figura 75. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la abundancia de Pico-Clorofitas durante el año 2015.

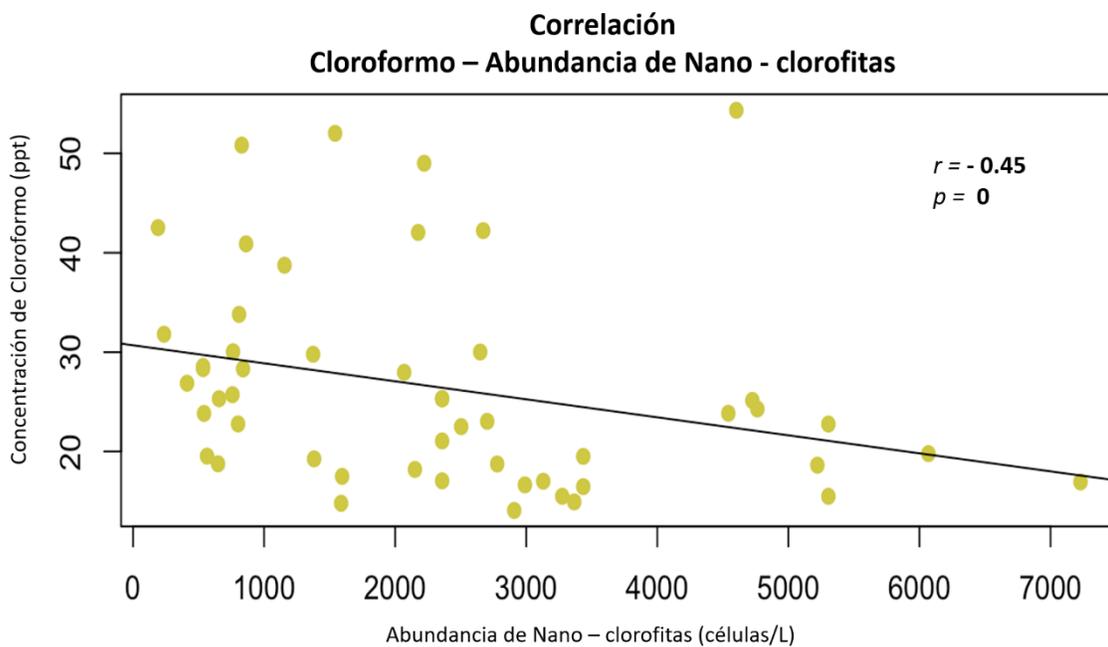


Figura 76. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y la abundancia de Nano-Clorofitas durante el año 2015.

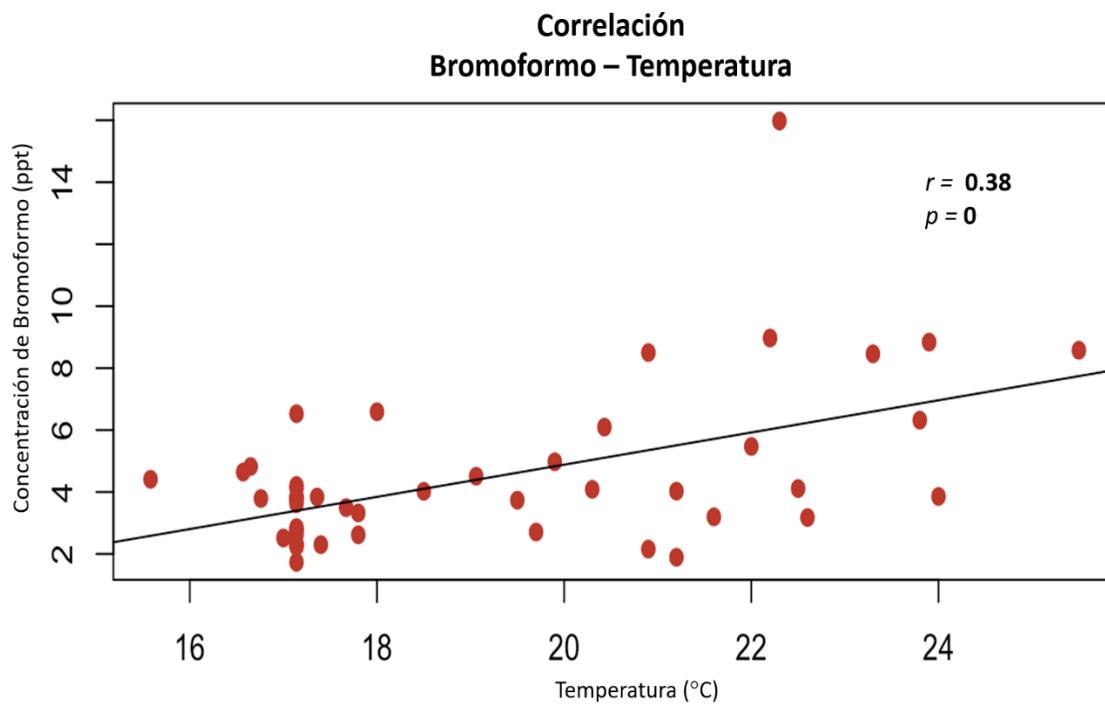


Figura 77. Gráfico de dispersión, correlación entre bromoformo y la temperatura durante el año 2015.

ANEXO B.

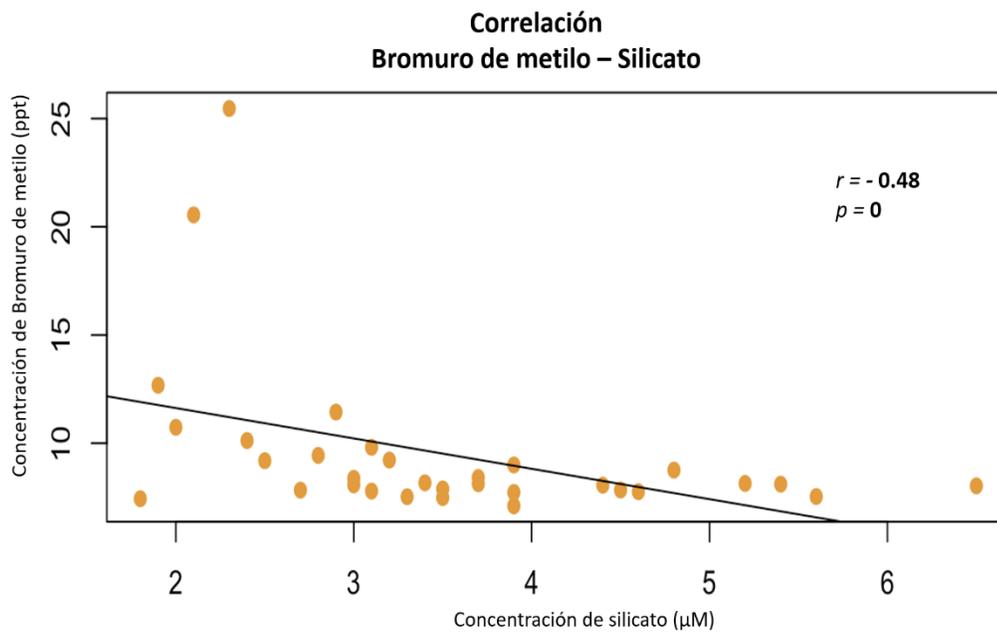


Figura 78. Gráfico de dispersión, correlación entre bromuro de metilo y silicato durante el año 2015.

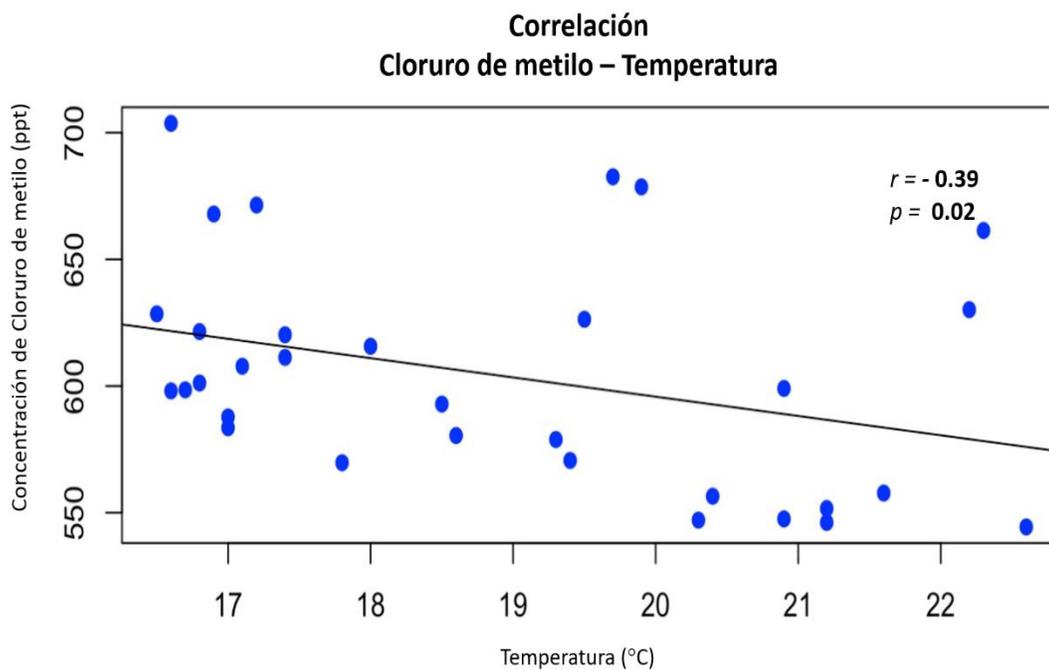


Figura 79. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y temperatura durante el año 2015.

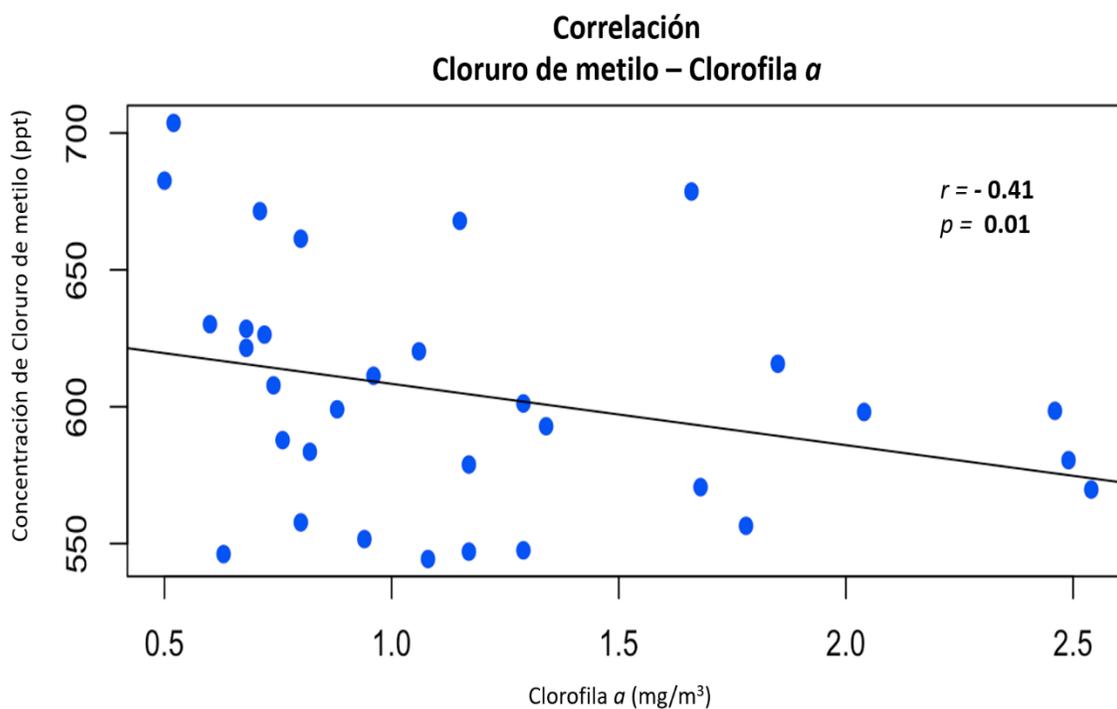


Figura 80. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y clorofila a durante el año 2015.

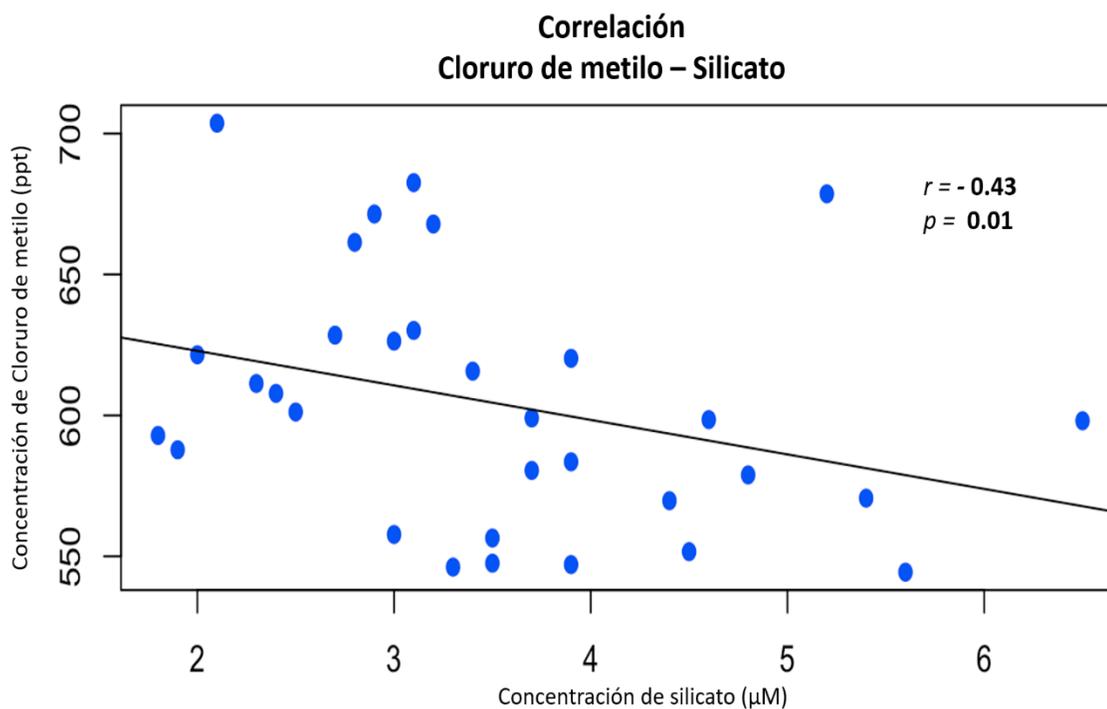


Figura 81. Gráfico de dispersión, correlación entre cloruro de metilo y silicato durante el año 2015.

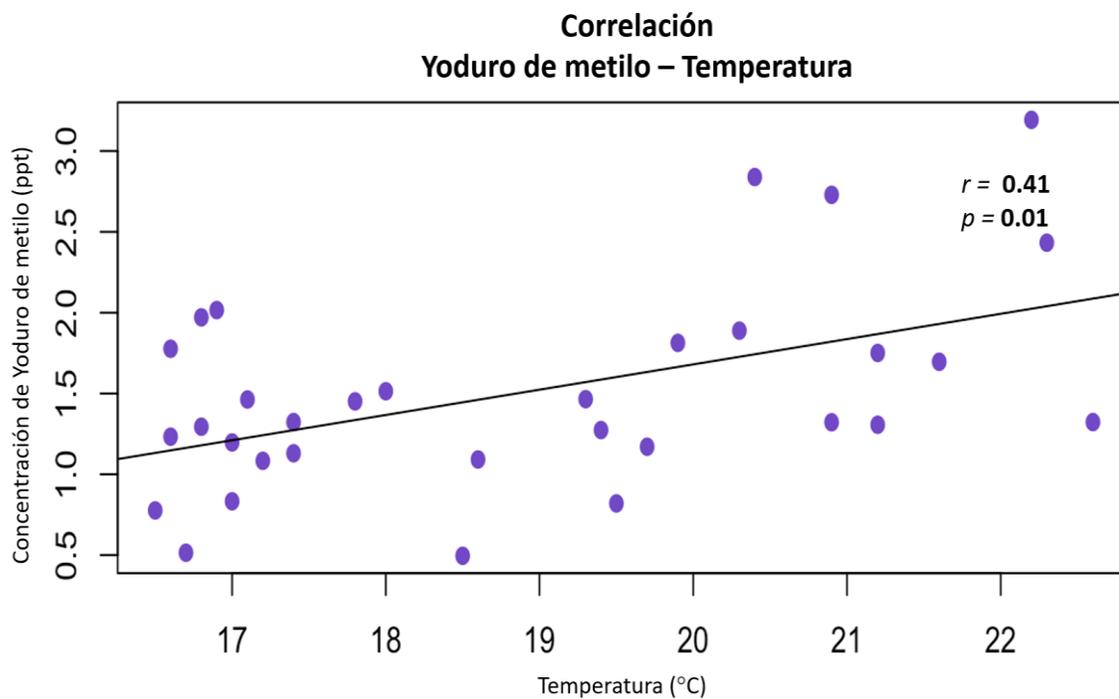


Figura 82. Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y temperatura durante el año 2015.

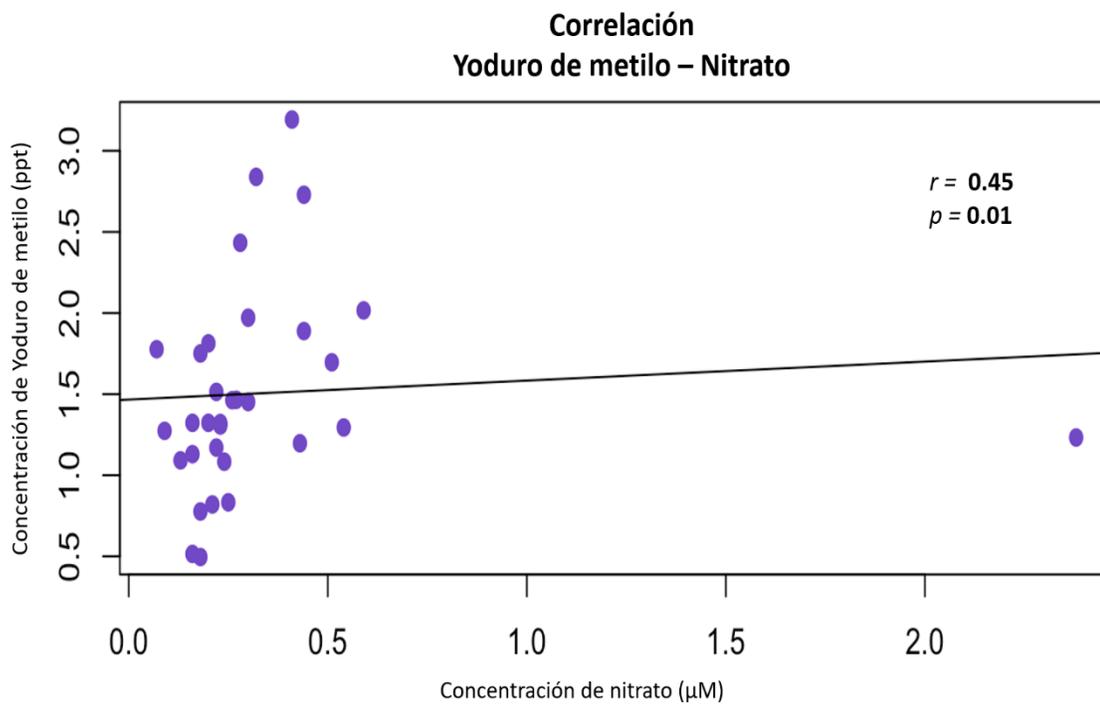


Figura 83. Gráfico de dispersión, correlación entre yoduro de metilo y nitrato durante el año 2015.

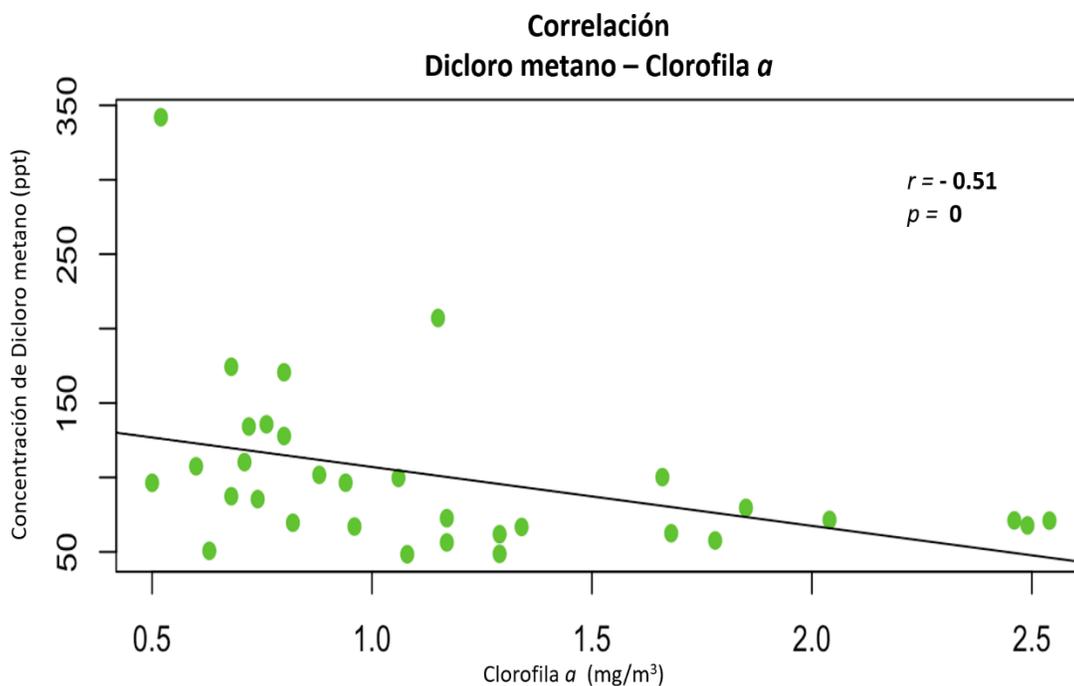


Figura 84. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y clorofila a durante el año 2015.

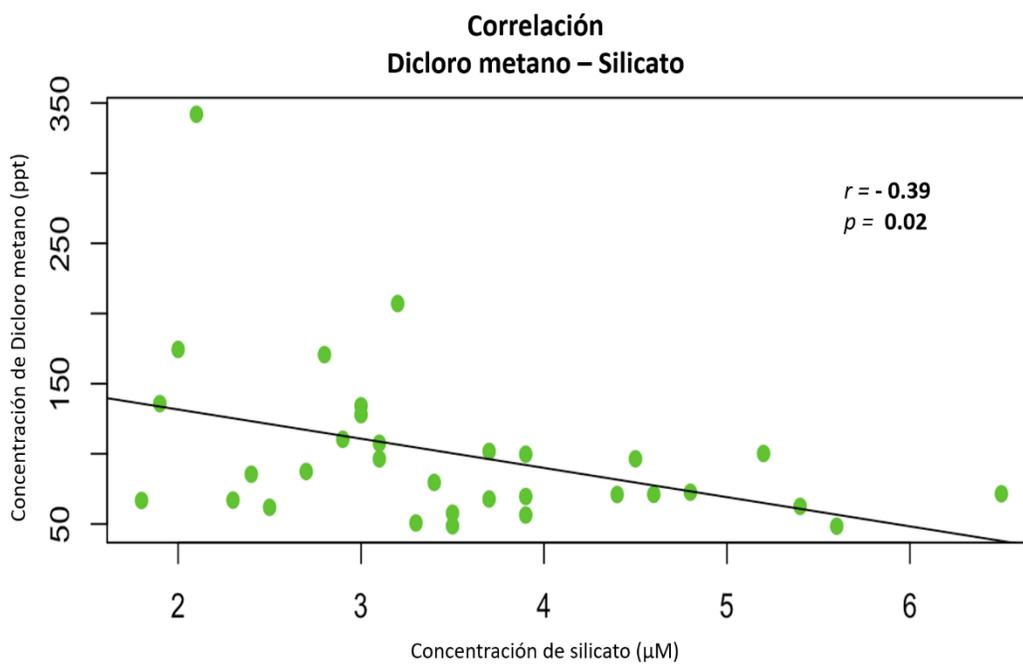


Figura 85. Gráfico de dispersión, correlación entre dicloro metano y silicato durante el año 2015.

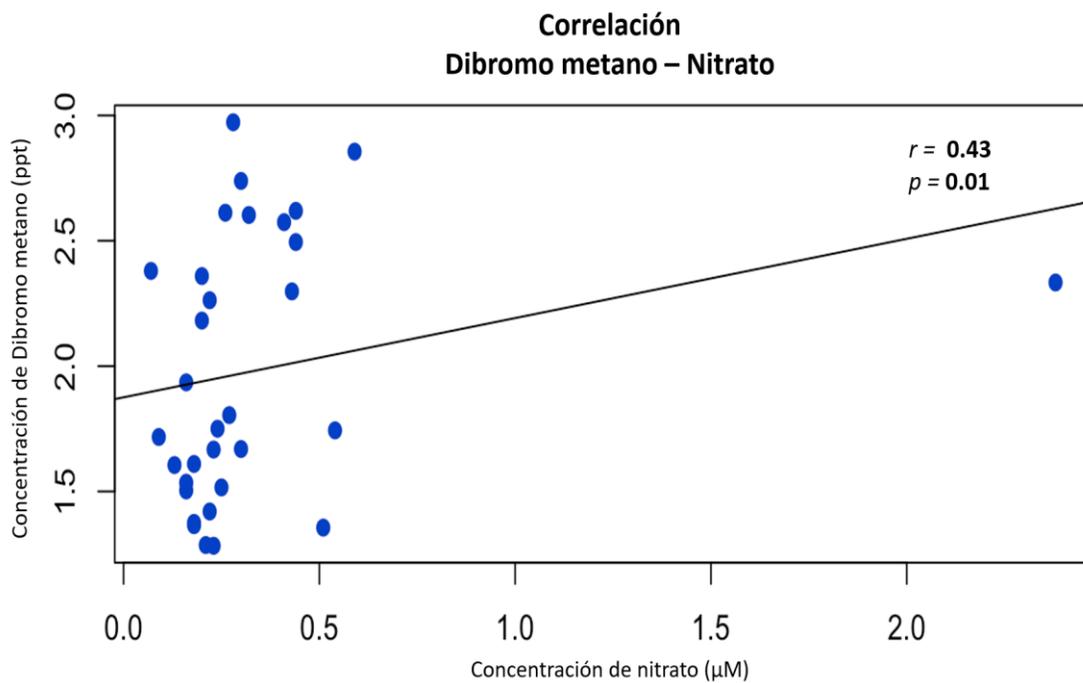


Figura 86. Gráfico de dispersión, correlación entre dibromo metano y nitrato durante el año 2015.

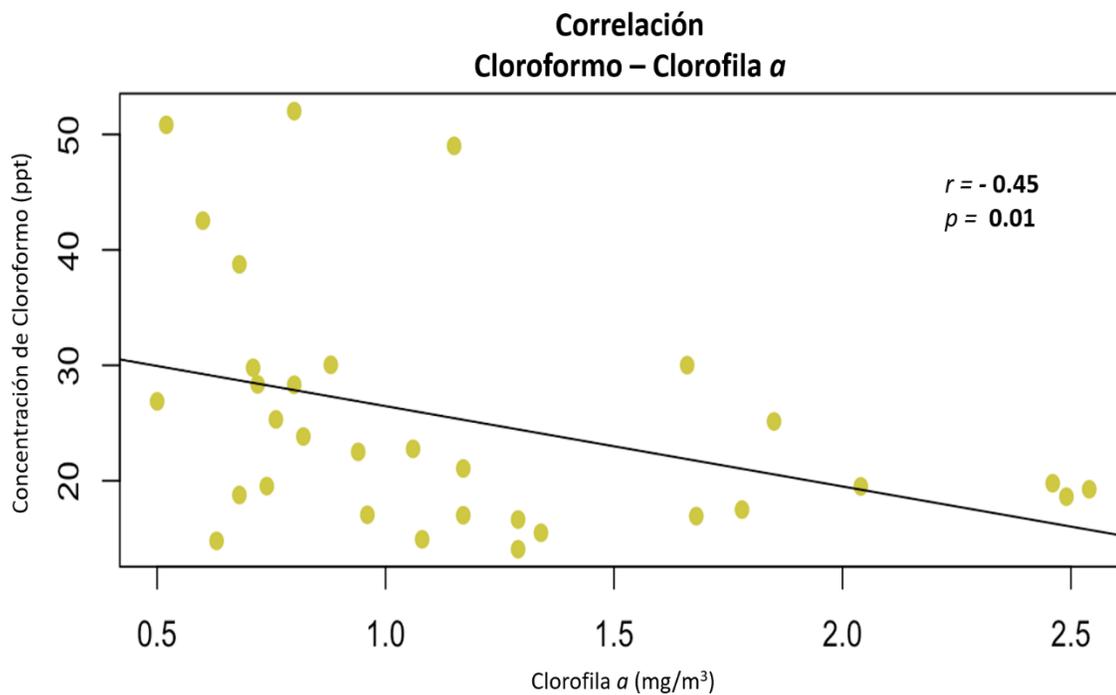


Figura 87. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y clorofila a durante el año 2015.

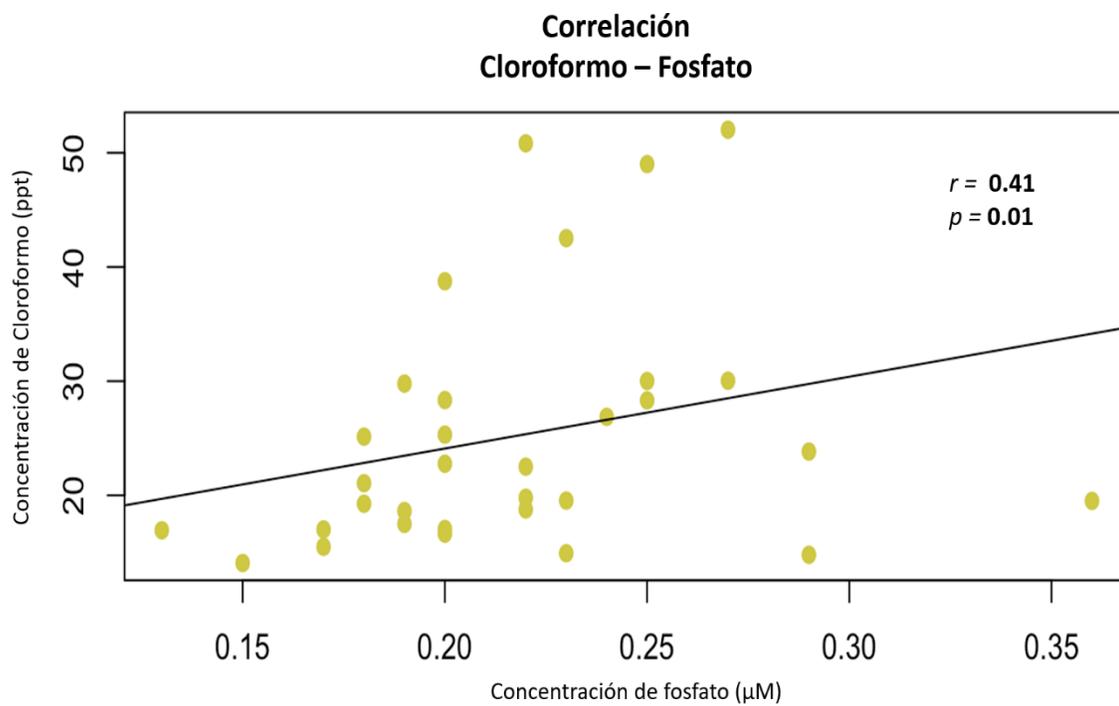


Figura 88. Gráfico de dispersión, correlación entre cloroformo y fosfato durante el año 2015.

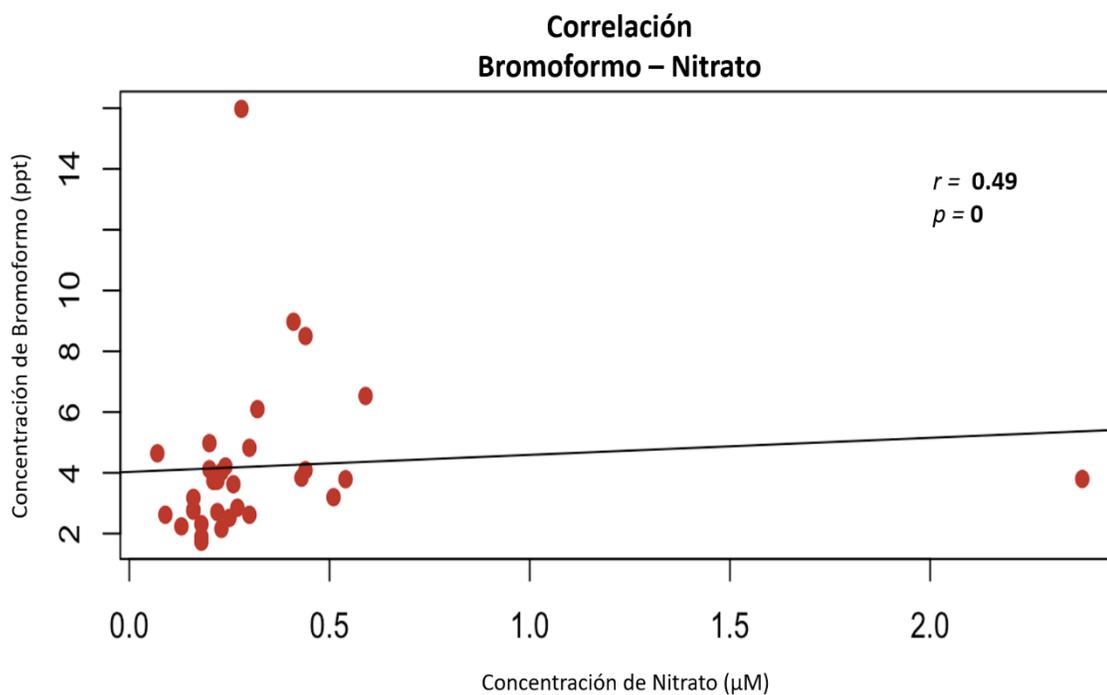


Figura 89. Gráfico de dispersión, correlación entre bromoformo y nitrato durante el año 2015.

ANEXO C.

Tabla 3. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Bromuro de metilo	-0.45	0.16
Cloruro de metilo	-0.54	0.28
Yoduro de metilo	-0.20	0.87
Dicloro metano	-0.68	0.22
Dibromo metano	-0.29	0.74
Cloroformo	-0.60	0.64
Bromoformo	-0.41	0.78
Producción bacteriana	0.67	0.41
Abundancia bacteriana	0.57	0.20
Producción bacteriana específica	0.74	0.41
Temperatura	0.02	0.63
Clorofila <i>a</i>	0.65	0.05
Abundancia de HNF	0.66	0.37
Abundancia de Cianobacterias	0.19	-0.29
Abundancia de Criptofitas	0.60	0.32
Abundancia de Pico- clorofitas	0.49	0.35
Abundancia de Nano- clorofitas	0.73	0.23
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.31	-0.05

Tabla 4. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negrita.

Variable	CP 1	CP 2
Bromuro de metilo	-0.31	-0.03
Producción bacteriana	0.75	-0.36
Abundancia bacteriana	0.68	0.31
Producción bacteriana específica	0.86	-0.11
Temperatura	0.15	-0.72
Clorofila <i>a</i>	0.67	0.35
Abundancia de HNF	0.76	-0.01
Abundancia de Cianobacterias	0.11	0.60
Abundancia de Criptofitas	0.69	-0.13
Abundancia de Pico- clorofitas	0.51	-0.46
Abundancia de Nano- clorofitas	0.77	-0.08
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.39	0.74

Tabla 5. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negrita.

Variable	CP 1	CP 2
Cloruro de metilo	-0.30	0.37
Producción bacteriana	0.76	-0.33
Abundancia bacteriana	0.67	0.36
Producción bacteriana específica	0.86	-0.06
Temperatura	0.16	-0.70
Clorofila <i>a</i>	0.66	0.34
Abundancia de HNF	0.76	0.02
Abundancia de Cianobacterias	0.10	0.54
Abundancia de Criptofitas	0.70	-0.10
Abundancia de Pico- clorofitas	0.53	-0.45
Abundancia de Nano- clorofitas	0.78	-0.06
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.37	0.76

Tabla 6. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Yoduro de metilo	0.17	0.71
Producción bacteriana	0.76	0.29
Abundancia bacteriana	0.67	-0.33
Producción bacteriana específica	0.87	0.05
Temperatura	0.19	0.83
Clorofila <i>a</i>	0.65	-0.38
Abundancia de HNF	0.76	0.02
Abundancia de Cianobacterias	0.09	-0.53
Abundancia de Criptofitas	0.70	0.09
Abundancia de Pico- clorofitas	0.52	0.39
Abundancia de Nano- clorofitas	0.77	-0.03
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.37	-0.67

Tabla 7. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Dicloro metano	-0.47	0.28
Producción bacteriana	0.75	-0.31
Abundancia bacteriana	0.66	0.38
Producción bacteriana específica	0.85	-0.03
Temperatura	0.17	-0.70
Clorofila <i>a</i>	0.66	0.34
Abundancia de HNF	0.76	0.01
Abundancia de Cianobacterias	0.11	0.55
Abundancia de Criptofitas	0.69	-0.08
Abundancia de Pico- clorofitas	0.54	-0.47
Abundancia de Nano- clorofitas	0.79	-0.06
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.36	0.77

Tabla 8. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Cloroformo	-0.25	-0.18
Producción bacteriana	0.75	-0.37
Abundancia bacteriana	0.68	0.28
Producción bacteriana específica	0.86	-0.13
Temperatura	0.12	-0.77
Clorofila <i>a</i>	0.67	0.36
Abundancia de HNF	0.75	-0.02
Abundancia de Cianobacterias	0.12	0.61
Abundancia de Criptofitas	0.69	-0.13
Abundancia de Pico- clorofitas	0.51	-0.44
Abundancia de Nano- clorofitas	0.78	-0.07
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.39	0.70

Tabla 9. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Dibromo metano	0.06	-0.32
Producción bacteriana	0.75	-0.34
Abundancia bacteriana	0.69	0.30
Producción bacteriana específica	0.87	-0.10
Temperatura	0.15	-0.73
Clorofila <i>a</i>	0.66	0.35
Abundancia de HNF	0.76	-0.01
Abundancia de Cianobacterias	0.10	0.61
Abundancia de Criptofitas	0.70	-0.10
Abundancia de Pico-clorofitas	0.51	-0.46
Abundancia de Nano- clorofitas	0.77	-0.07
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.39	0.71

Tabla 10. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 1. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Bromoformo	-0.11	0.59
Producción bacteriana	0.75	0.34
Abundancia bacteriana	0.69	-0.27
Producción bacteriana específica	0.86	0.12
Temperatura	0.12	0.82
Clorofila <i>a</i>	0.67	-0.33
Abundancia de HNF	0.75	0.07
Abundancia de Cianobacterias	0.12	-0.59
Abundancia de Criptofitas	0.70	0.10
Abundancia de Pico- clorofitas	0.50	0.43
Abundancia de Nano-clorofitas	0.78	0.05
Abundancia de <i>Ostreococcus</i> – <i>Micromonas</i>	0.40	-0.64

Tabla 11. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para los halometanos y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Bromuro de metilo	0.44	-0.50
Cloruro de metilo	0.72	-0.25
Yoduro de metilo	0.56	0.54
Dicloro metano	0.81	-0.27
Dibromo metano	0.64	0.42
Cloroformo	0.91	0.02
Bromoformo	0.75	0.44
Temperatura	0.00	0.40
Salinidad	0.08	0.06
Clorofila <i>a</i>	-0.52	0.29
Fosfato	0.28	0.56
Silicato	-0.47	0.61
Amonio	-0.08	0.39
Nitrato	0.01	0.63

Tabla 12. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromuro de metilo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas

Variable	CP 1	CP 2
Bromuro de metilo	-0.49	0.61
Temperatura	-0.03	-0.70
Salinidad	-0.08	-0.24
Clorofila <i>a</i>	0.50	-0.28
Fosfato	0.57	0.33
Silicato	0.73	-0.46
Amonio	0.59	0.45
Nitrato	0.78	0.36

Tabla 13. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloruro de metilo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Cloruro de metilo	-0.22	0.74
Temperatura	-0.13	-0.50
Salinidad	-0.15	0.03
Clorofila <i>a</i>	0.50	-0.53
Fosfato	0.57	0.49
Silicato	0.68	-0.50
Amonio	0.63	0.32
Nitrato	0.83	0.27

Tabla 14. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el yoduro de metilo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Yoduro de metilo	-0.05	0.75
Temperatura	-0.24	0.72
Salinidad	-0.16	0.41
Clorofila α	0.45	-0.45
Fosfato	0.62	0.50
Silicato	0.61	0.09
Amonio	0.66	-0.05
Nitrato	0.85	0.17

Tabla 15. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el bromoformo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Bromoformo	-0.10	0.74
Temperatura	-0.25	0.54
Salinidad	-0.17	0.42
Clorofila α	0.46	-0.55
Fosfato	0.60	0.63
Silicato	0.61	-0.05
Amonio	0.66	-0.02
Nitrato	0.84	0.24

Tabla 16. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dicloro metano y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Dicloro metano	-0.40	0.67
Temperatura	-0.11	-0.36
Salinidad	-0.15	0.07
Clorofila α	0.57	-0.56
Fosfato	0.50	0.62
Silicato	0.73	-0.41
Amonio	0.60	0.37
Nitrato	0.77	0.42

Tabla 17. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el cloroformo y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Cloroformo	-0.28	0.70
Temperatura	-0.21	-0.01
Salinidad	-0.20	0.30
Clorofila <i>a</i>	0.55	-0.65
Fosfato	0.51	0.71
Silicato	0.68	-0.29
Amonio	0.63	0.24
Nitrato	0.80	0.37

Tabla 18. Resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA) mostrando las cargas de los dos componentes con mayor varianza explicada (CP1 y CP2) para el dibromo metano y las variables ambientales 2. Las cargas mayores a 0.50 se señalan en negritas.

Variable	CP 1	CP 2
Dibromo metano	0.33	-0.44
Temperatura	-0.23	0.14
Salinidad	-0.17	-0.19
Clorofila <i>a</i>	0.38	0.78
Fosfato	0.65	-0.41
Silicato	0.53	0.66
Amonio	0.68	-0.20
Nitrato	0.87	-0.11