



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad De Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,
Oceánicas y Recursos Naturales

“INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DE HUMBOLDT EN LA
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y ABUNDANCIA DE CLOROFILA *a*
EN EL PACÍFICO ECUATORIAL ESTE”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERA OCEÁNICA AMBIENTAL

RUTH LISBETH RAMOS BAYAS

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos primero a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría necesaria para culminar una etapa más de mi vida académica, a mi familia porque siempre están y estarán allí en todo momento, y especialmente a mi compañero de vida por motivarme y ayudarme a crecer como persona día a día.

Extiendo mis mayores agradecimientos al Dr. rer. nat. Rafael Bermúdez M. por permitirme aportar con el presente estudio a uno de sus proyectos de investigación “Efecto de un potencial evento La Niña en la biomasa de organismos picoplanctónicos y sus consecuencias en la calidad nutricional de los productores primarios”

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi abuelita materna, por permitirme disfrutar de su compañía y sus sabios consejos.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Dr. rer. nat. Rafael Bermúdez M.

PROFESOR EVALUADOR

MSc. Luis Altamirano P.

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me(nos) corresponde exclusivamente; y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Ruth Ramos Bayas

RESUMEN

En este proyecto, se relacionó la influencia de las variables fisicoquímicas de la Corriente de Humboldt en la abundancia y distribución espacial de la clorofila *a* con los datos obtenidos en el Crucero Regional XIX a bordo del BAE “Orión” organizado por el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) para el monitoreo de las condiciones océano – atmosféricas, durante el mes de septiembre del 2016, época en la que la corriente de Humboldt tiene gran influencia en el Pacífico Ecuatorial Este. Se realizó gráficas espaciales de la concentración de la clorofila *a* (Chl *a*, mg/m³), con las cuales se pudo observar que a 20 metros de profundidad existen los mayores valores de clorofila *a*. La influencia de variables físicas (temperatura (Temp), salinidad (Sal)) y químicas (nitrato (NITRA), fosfato (P), nitrito (NITRI), silicato (Si) y oxígeno disuelto (O₂)) en la abundancia de la Chl *a*, se determinó mediante el análisis de componentes principales y un modelo estadístico multivariado de efecto mixto que las variables químicas influyen significativamente en la Chl *a*.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3.1 Objetivo General.....	1
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Justificación y/o Importancia.....	2
1.4 Zona de Estudio.....	2
CAPÍTULO 2.....	3
2. METODOLOGÍA APLICADA.....	3
2.1 Obtención de los datos.....	3
2.2 Distribución espacial de la Chl <i>a</i>	4
2.3 Influencia de las variables físicas y químicas en la Chl <i>a</i>	4
CAPÍTULO 3.....	6
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	6
3.1. Distribución espacial de la Chl <i>a</i>	6
3.2. Influencia de las variables físicas y químicas en la Chl <i>a</i>	10
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	13
BIBLIOGRAFÍA.....	15
ANEXOS.....	16

ÍNDICE DE TABLAS

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

Tabla 1: Porcentajes que cada variable contribuye a cada uno de los componentes principales.	10
Tabla 2: Valores de p-value de variables físicas	12
Tabla 3: Valores de p-value de las variables químicas.....	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: CTD Seabird-SBE19-Plus V2. Fuente: www.seabird.com/sbe19plusv2-seacat-ctd	3
Figura 2.2: Estaciones clasificadas en transectas.....	5
Figura 3.1: Distribución espacial de la Chl a.....	6
Figura 3.2: La Chl a distribuida espacialmente a los 10 m de profundidad.	7
Figura 3.3: La distribución espacial de la Chl a en el veril de 20 m de profundidad.	7
Figura 3.4: La distribución espacial de la Chl a a una profundidad de 30 m.....	8
Figura 3.5: La distribución espacial de la Chl a a los primeros 40 m de profundidad.	8
Figura 3.6: La distribución espacial de la Chl a en el veril de 50 m de profundidad.	8
Figura 3.7: La distribución espacial de la Chl a en el nivel de los 75 m de profundidad.	9
Figura 3.8: Círculo de correlaciones de las variables con los componentes 1 y 2.....	10
Figura 3.9: Representación de los datos individuales en los componentes principales categorizados por las transectas.	11

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La Corriente de Humboldt formada por aguas frías y profundas, ricas en nutrientes, provenientes del extremo sur de América; estas por efecto de surgencia suben hacia la superficie del océano frente a las costas de Chile, Perú y Ecuador. [1]

"Los sistemas de surgencias se caracterizan por una alta concentración de nutrientes inorgánicos, tales como nitratos (NO_2^-), fosfatos (PO_4^{3-}) y silicatos (SiO_2^{+4}) [2]" en combinación con las condiciones ambientales óptimas, existirá un aumento de productividad biológica.

En el Pacífico Ecuatorial Este debido a las surgencias que produce la Corriente de Humboldt existen zonas de mayor productividad biológica, en [3] se señala que esta corriente aportaría con nutrientes al margen continental del Golfo de Guayaquil y levemente a las Islas Galápagos.

1.1 Definición del Problema

Existen muy pocos trabajos dedicados explícitamente al análisis de la afectación de la variabilidad oceánica a un indicador biológico tan sensible y cambiante como lo es la clorofila *a*, conocer dicha influencia nos ayudará a determinar el comportamiento de este indicador biológico cuando sea sometido a cambios extremos en las corrientes oceánicas, ya que este estudio será el punto de partida para comenzar ajustar un modelo que analice la influencia de variables físicas y químicas en la clorofila *a*.

1.2 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la distribución espacial y el efecto de las variables físicas (temperatura (Temp), salinidad (Sal)) y químicas (nitrato (NITRA), fosfato (P),

nitrito (NITRI), silicato (Si) y oxígeno disuelto (O_2) en la clorofila *a* (Chl *a*, mg/m^3), durante el mes de septiembre del 2016.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la distribución espacial de la clorofila *a* en el Pacífico Ecuatorial Este durante el mes de septiembre del 2016.
- Determinar la influencia de las variables físicas y químicas en la concentración de la Chl *a* en el Pacífico Ecuatorial Este durante el mes de septiembre del 2016.

1.3 Justificación y/o Importancia

La clorofila *a* es un indicador biológico de la magnitud de productividad de una zona determinada en el océano, por tal motivo también es un medidor de la salud ecosistémica. Entonces es de vital importancia para el equilibrio de la cadena trófica comprender el comportamiento y analizar los efectos de las surgencias en la clorofila *a*.

Además, este estudio es una aportación significativa al proyecto de investigación “Efecto de un potencial evento La Niña en la biomasa de organismos picoplanctónicos y sus consecuencias en la calidad nutricional de los productores primarios”, ya que se ha trabajado simultáneamente con el mismo.

1.4 Zona de Estudio

La zona de estudio se sitúa entre el perfil costero continental hasta el oeste de las Islas Galápagos, exactamente dentro del área comprendida entre el meridiano $82^{\circ}W$ y $92^{\circ}W$ y los paralelos $2^{\circ}N$ y $3^{\circ}S$. La zona de estudio tiene estaciones de muestreo georreferenciadas con anterioridad por el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), tal como se observa en la Figura 2.2.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA APLICADA

2.1 Obtención de los datos

En el Crucero Regional XIX a bordo del BAE “Orión” durante el mes de septiembre del 2016, época en la que la corriente de Humboldt tiene gran influencia en el Pacífico Ecuatorial Este, se utilizó el CTD Seabird-SBE19-Plus V2 equipado con un sensor WetLABS FLNTURTD con un láser de 455 nm de longitud de onda (Ver Figura 2.1) calibrado para cuantificar la concentración de Chl *a* de la columna de agua hasta los 100 metros de profundidad en cada una de las estaciones georreferenciadas (Ver Figura 2.2).



Figura 2.1: CTD Seabird-SBE19-Plus V2. Fuente: www.seabird.com/sbe19plusv2-seacat-ctd

Además, el uso del CTD Seabird-SBE19-Plus V2 permitió adquirir datos de la temperatura, salinidad y de oxígeno disuelto de la columna de agua de los primeros 100 metros de profundidad de cada estación.

Para las mediciones de los factores químicos (NITRA, P, NITRI, Si), primero se realizó el lanzamiento de botellas Van Dorn con una capacidad de 6 litros a profundidades de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75 y 100 metros de profundidad en cada una de las estaciones completas. Luego cada una de las muestras fueron

colocadas en “botellas de polietileno de capacidad de 500 ml envejecidas y filtradas con filtros millipor de 0.45 μ , analizadas inmediatamente por los métodos descritos en el manual de Strickland & Parsons y leídas en el espectrofotómetro Génesis 10 [3].”

2.2 Distribución espacial de la Chl *a*

A 0, 10, 20, 30, 40, 50 y 75 metros de profundidad fue graficada espacialmente la distribución de la Chl *a*, para esto se utilizó el software Ocean Data View (ODV) [4] con interpolación DIVA gridding. “Mediante la interpolación DIVA los datos son analizados e interpolados buscando una malla óptima donde se tienen en cuenta las líneas costeras y las características de batimetría para estructurar y subdividir el dominio en el que se realiza la estimación [5].”

Con dicha interpolación la distribución espacial de la Chl *a* fue visualizada con la mejor aproximación e interpretada de manera correcta.

2.3 Influencia de las variables físicas y químicas en la Chl *a*

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) que nos permitió determinar el conjunto de variables que están estrechamente correlacionadas con la concentración de Chl *a*, para representar gráficamente se realizó un círculo de correlaciones con el fin de una mejor visualización de la correlación existente con la Chl *a*.

Se clasificó las estaciones completas se las clasificó en transectas (Trans) de este a oeste (Costera, Oceánica, Insular 1 e Insular 2), esta clasificación se puede observar en la Figura 2.2. Se graficó los datos individuales en los componentes principales categorizados por las transectas.

La influencia de las variables físicas (Temp, Sal) y las variables químicas (NITRA, P, NITRI, Si, O₂) sobre la Chl *a* fue determinada utilizando un modelo estadístico multivariado de efecto mixto (MEM), en [6] se encontró que este modelo analiza la relación entre una o más variables independientes categóricas con una variable dependiente o también llamada variable respuesta, las variables independientes también llamadas variables

explicativas categóricas. Dichas variables pueden ser de 2 tipos: efectos fijos y efectos aleatorios [7]. “Los efectos fijos son constantes desconocidas que pueden ser estimadas a partir de los datos. Los efectos aleatorios gobiernan la estructura varianza-covarianza de la variable de respuesta [7, p. 627].”

La función lme de la librería “nlme” del software estadístico R [6] se ajusta al modelo de efectos mixtos, para las variables físicas se creó el siguiente modelo: $\text{Chl } a \sim \text{O}_2 * \text{NITRA} * \text{NITRI} * \text{P} * \text{Si} * \text{Trans}$ y el modelo para las variables físicas es el siguiente $\text{Chl } a \sim \text{Temp} * \text{Sal} * \text{Temp} * \text{Trans}$.

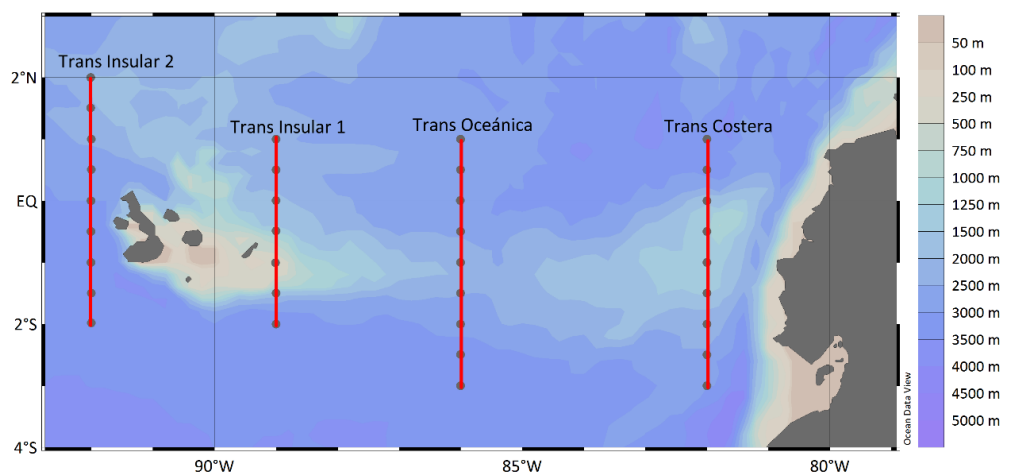


Figura 2.2: Estaciones clasificadas en transectas.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Distribución espacial de la Chl a

En la distribución superficial (0 m) se observó la concentración más alta de Chl a con un rango de (2-2-5 mg/m³) desde el margen continental correspondiente a la provincia Santa Elena hasta aproximadamente los 90°W alrededor de los 3°S y al Suroeste de la Isla Isabela se evidenció valores de 2 mg/m³ mientras que la concentración más baja (< 0.5 mg/m³) se visualizó desde el margen continental centro-norte hasta los aproximadamente los 87° W, tal como se observa en la Figura 3.1.

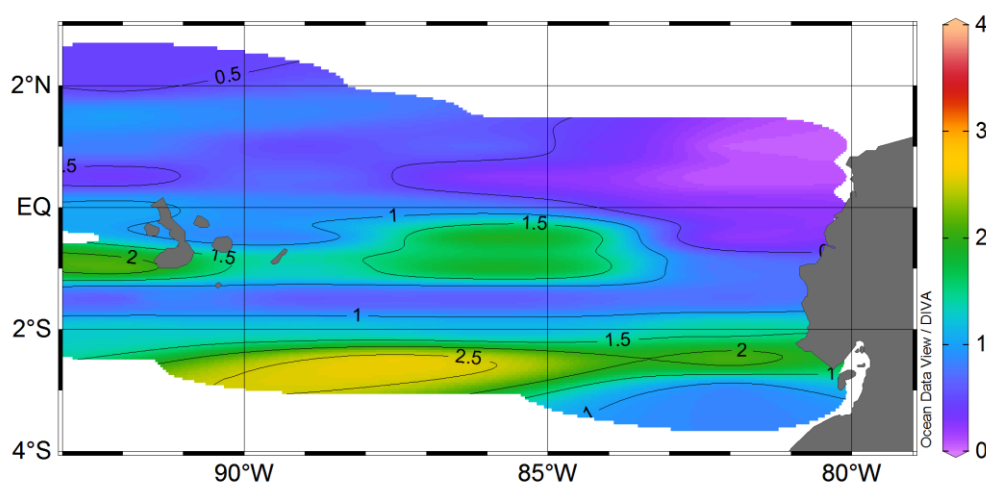


Figura 3.1: Distribución espacial de la Chl a.

A los 10 m de profundidad, en la parte central de la zona de estudio cerca de 1°S se observó un núcleo con un valor de concentración de Chl a de 2.5 mg/m³. Al oeste de las Islas Galápagos se observó un núcleo de 3 mg/m³ y cerca del noreste un núcleo de la más baja concentración de Chl a de 0.5 mg/m³. (Ver Figura 3.2)

Desde el estuario exterior del Golfo de Guayaquil hasta los 85°W se observó la máxima concentración de Chl a de 3 mg/m³ en el veril de 20 m de profundidad y la concentración más baja se visualizó en la parte norte del perfil costero continental con concentraciones de Chl a (< 0.5 mg/m³), también se

observó núcleos (2- 2.5 mg/m³), en la parte central de la zona de estudio cerca de 1°S, tal como se observa en la Figura 3.3.

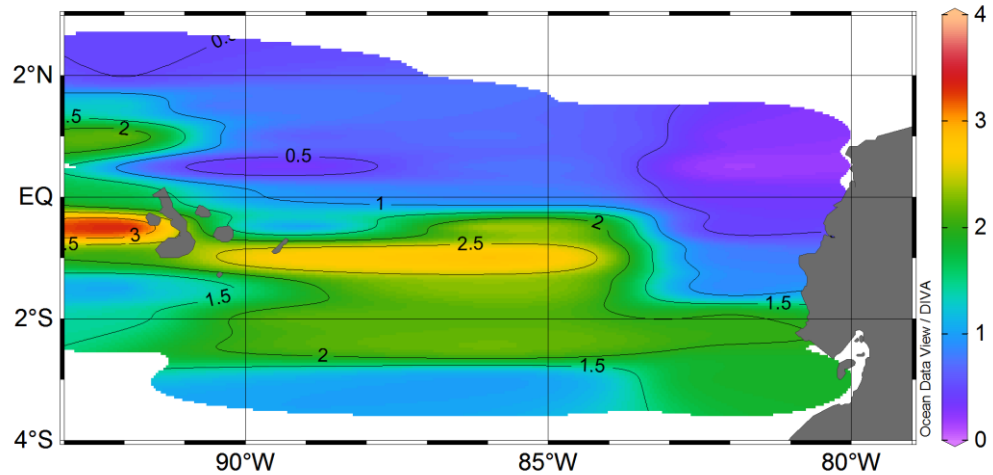


Figura 3.2: La Chl a distribuida espacialmente a los 10 m de profundidad.

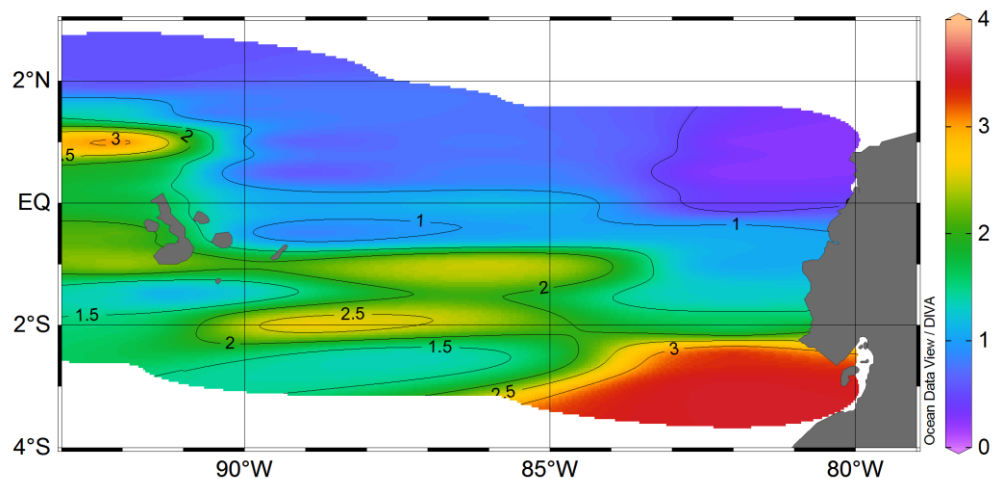


Figura 3.3: La distribución espacial de la Chl a en el veril de 20 m de profundidad.

En la Figura 3.4 se visualizó que en el veril de 30 m existen 3 núcleos con la mayor concentración de Chl a en este veril de 2.5 mg/m³, un núcleo se situó por debajo de los 2°S y alrededor de los meridianos 85°W y 90°W, los 2 núcleos restantes se ubican al sureste de la Isla Isabela expandiéndose aproximadamente hasta los 87°W y al noroeste de la misma.

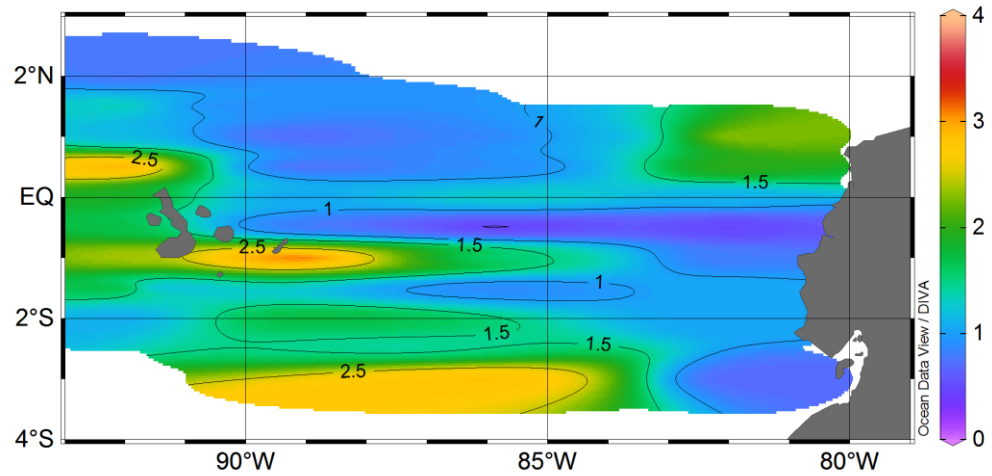


Figura 3.4: La distribución espacial de la Chl a a una profundidad de 30 m.

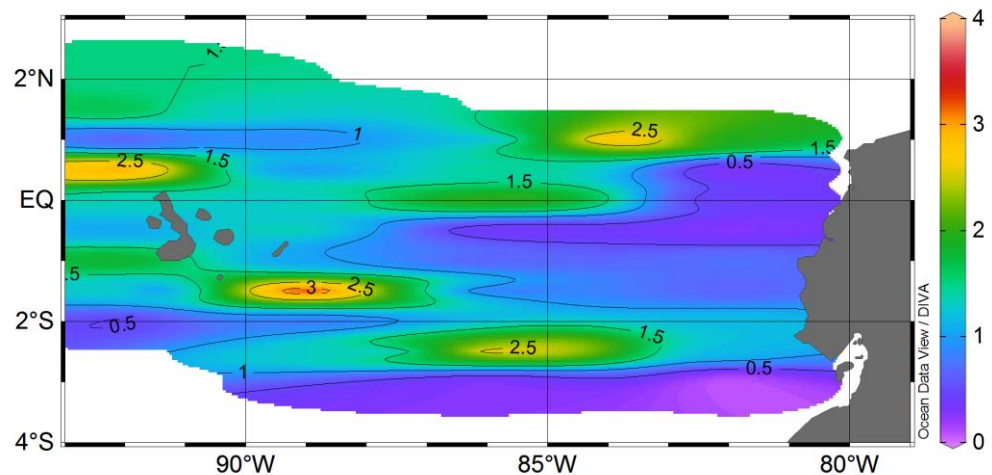


Figura 3.5: La distribución espacial de la Chl a a los primeros 40 m de profundidad.

A los 40 m se notó que por debajo de la línea equinoccial y próximo al sureste de las Islas Galápagos existe un núcleo de 3 mg/m^3 siendo este de máxima concentración de Chl a y la mínima concentración es de 0.5 mg/m^3 visualizada desde el estuario exterior del Golfo de Guayaquil hasta el meridiano 90°W en alrededor de los 3°S , tal como se observa en la Figura 3.5.

En la Figura 3.6, se notó 2 núcleos de 1.5 mg/m^3 , un núcleo se situó próximo a los 2°S en el meridiano 85°W y el otro núcleo en el mismo meridiano pero en 1°N , alrededor de las Islas Galápagos se visualizó núcleos de 1.5 mg/m^3 .

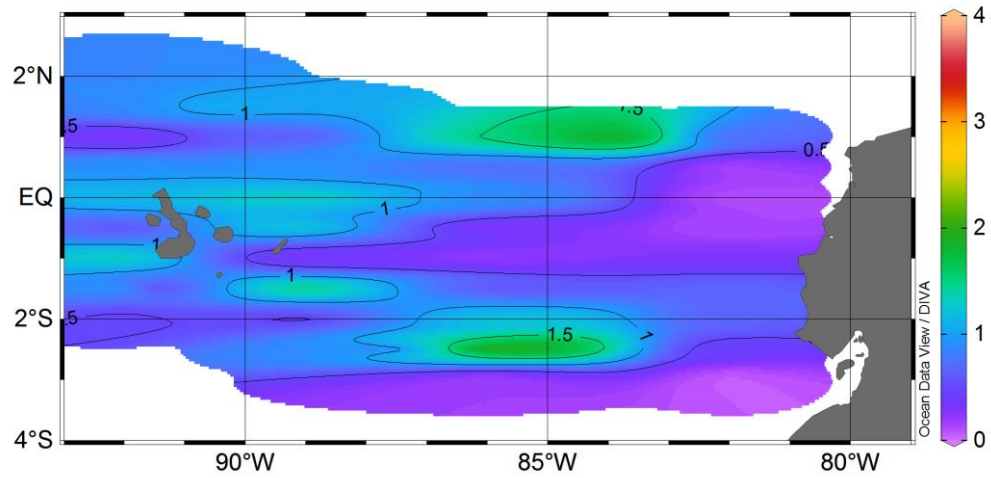


Figura 3.6: La distribución espacial de la Chl *a* en el veril de 50 m de profundidad.

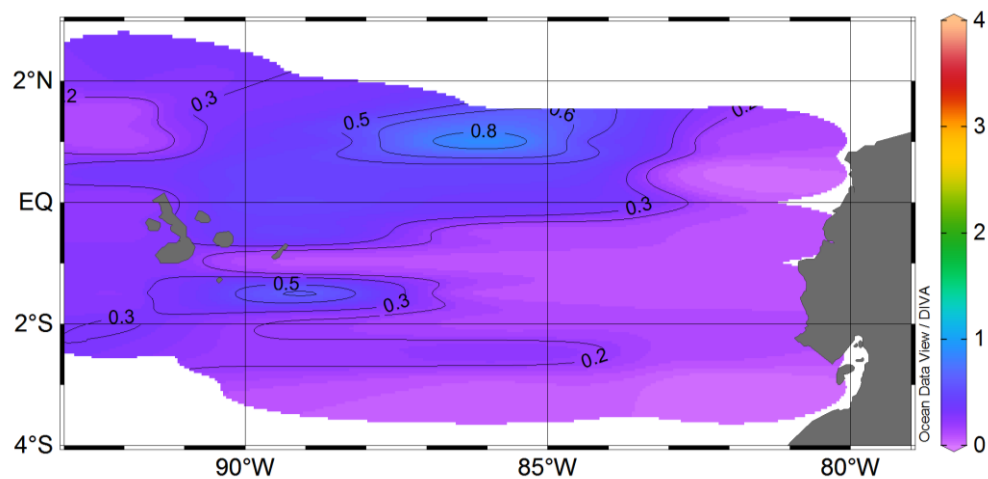


Figura 3.7: La distribución espacial de la Chl *a* en el nivel de los 75 m de profundidad.

En el nivel de los 75 m de profundidad se observó que la concentración de Chl *a* es menor a 1 mg/m^3 en toda la zona de estudio, se pudo observar un núcleo de 0.8 mg/m^3 en 1°N próximo al meridiano 86°W y otro núcleo de 0.5 mg/m^3 al sureste de las Islas Galápagos, estas son las máximas concentraciones observadas. (Ver Figura 3.7).

3.2. Influencia de las variables físicas y químicas en la Chl a

El componente principal (PC1) está representado por la temperatura de la columna del agua (Temp) seguido del Oxígeno Disuelto (O2), mientras que el componente principal (PC2) está representado por el nitrito (NITRI) siendo estas 2 variables químicas. Las variables que representan cada componente principal se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Porcentajes que cada variable contribuye a cada uno de los componentes principales.

Variables	PC1 (%)	PC2 (%)	PC3 (%)
O ₂	81.28	2.98	0.48
NO ⁻³	77.49	0.02	5.91
NO ⁻²	5.53	60.65	20.69
PO ₄ ⁻³	41.79	7.12	29.94
SiO ₂ ⁺⁴	66.44	5.34	0.30
Temperatura	90.19	0.04	4.07

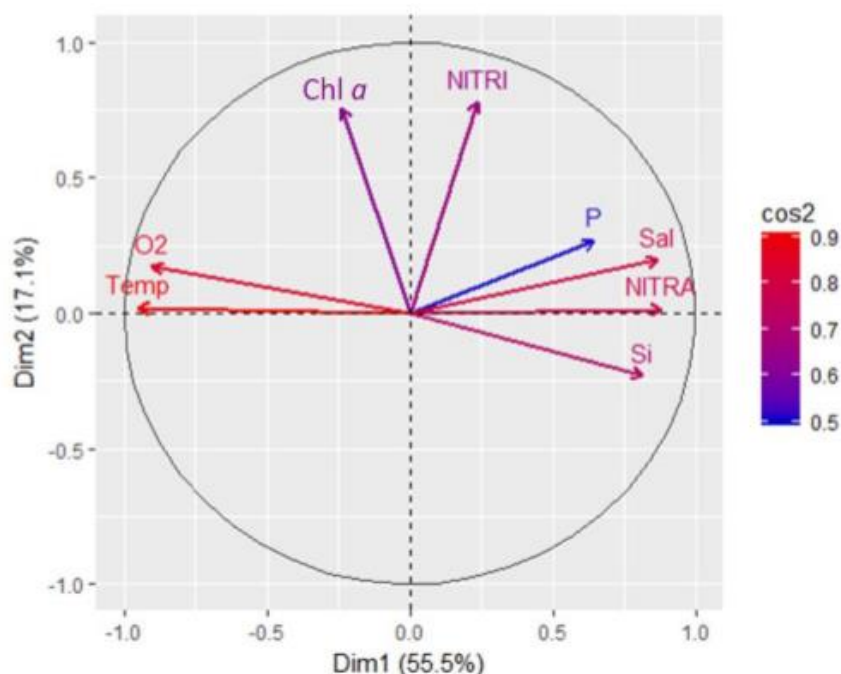


Figura 3.8: Círculo de correlaciones de las variables con los componentes 1 y 2.

En la Figura 3.8 gráficamente se representó la correlación existente que cada variable física posee con la Chl *a* y en cuanto cada variable aporta a los componentes 1 y 2 (Dim 1 y Dim 2, respectivamente), se observó una correlación de 0.7 entre el nitrito y la Chl *a* aproximadamente.

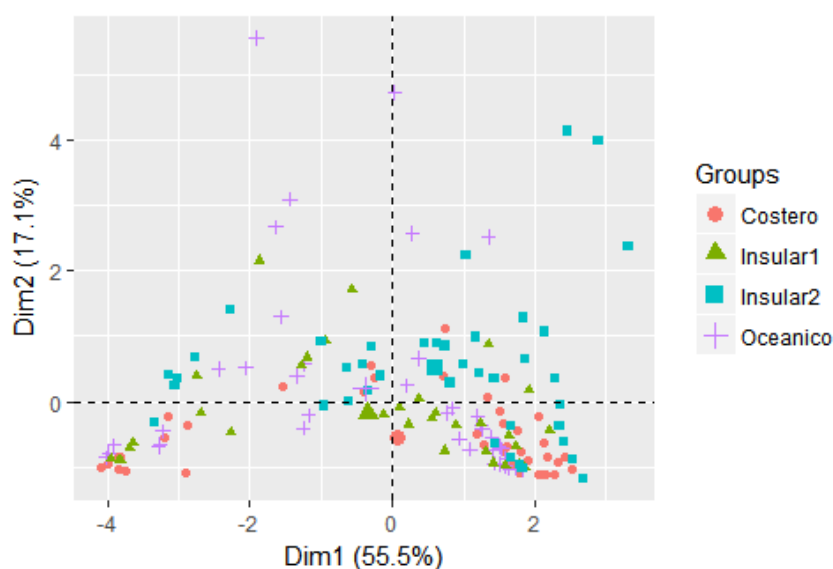


Figura 3.9: Representación de los datos individuales en los componentes principales categorizados por las transectas.

El porcentaje de la variabilidad total de los datos es explicada por un 72.6% por los componentes 1 y 2, los datos individuales categorizados en transectas están estrechamente agrupados el cuadrante positivo del componente 1 y cuadrante negativo del componente 2, tal como se puede observar en la Figura 3.9.

En el Modelo de Efecto Mixto (MEM) se observó que las variables físicas no poseen influencia significativa en ninguna transecta. (Ver Tabla 2). La concentración de la Chl *a* en la Transecta Oceánica influye significativamente las variables químicas dado que se observa un $p\text{-value} < 0.05$ (Ver Tabla 3).

Tabla 2: Valores de p-value de variables físicas

Transecta	Intercepto	p-value
	Sal:Temp	0.0101
Insular 1	Sal	0.9997
	Temp	0.9602
	Sal:Temp	0.9554
Insular 2	Sal	0.6022
	Temp	0.5959
	Sal:Temp	0.595
Oceánica	Sal	0.1409
	Temp	0.2878
	Sal:Temp	0.3107

Tabla 3: Valores de p-value de las variables químicas.

Transecta	Intercepto	p-value
Oceánica	O2	0.006
	NITRI	0.0063
	P	0.0474
	O2:NITRI	0.0052
	NITRA:NITRI	0.0029
	O2:P	0.0652
	NITRA:P	0.0097
	NITRI:P	0.0036
	O2:NITRA:NITRI	0.0024
	O2:NITRA:P	0.0082
	NITRA:NITRI:P:Si	0.0249
	O2:NITRI:P	0.0031
	NITRA:NITRI:P	0.001
	O2:NITRA:NITRI:P	0.0006
	O2:NITRA:NITRI:Si	0.0384
	NITRA:NITRI:P:Si	0.0249
O2:NITRA:NITRI:P:Si	0.0383	
Insular 1	O2:NITRA:NITRI:P:Si	0.5784
Insular 2	O2:NITRA:NITRI:P:Si	0.3875

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Las concentraciones máximas de Chl *a* se observaron a la profundidad de 20 metros con valores de 2.5-3 mg/m³ alrededor de las Islas Galápagos y por debajo de los 0° en toda la parte central de la zona de estudio se observó un gran núcleo de 2 a 2.5 mg/m³ siendo que la mayor abundancia de la Chl *a* se desplazaba al oeste del Golfo de Guayaquil.
2. La influencia de la Corriente de Humboldt se evidenció espacialmente como un afloramiento debido a que se observó que la abundancia de la Chl *a* aumentaba conforme disminuía la profundidad sin embargo la máxima abundancia se visualizó a los 20 m de profundidad.
3. La temperatura explica un 90% al componente 1 mientras que el nitrito representa mejor al componente 2 con un 61%, gráficamente se obtuvo que existe una afectación significativa del Nitrito en la abundancia de la Chl *a*.
4. Un 73% de la variabilidad ambiental de los datos observada en la zona de estudio son explicadas por las componentes 1 y 2.
5. Las variables químicas influyen significativamente ($p\text{-value} < 0.05$) en la Transecta Oceánica mientras que las variables físicas no poseen influencia significativa en ninguna transecta.
6. Por lo tanto, la Corriente de Humboldt influye significativamente en la parte central del Pacífico Ecuatorial Este, al venir de las costas peruanas aumenta la abundancia de la Chl *a* en la zona del estuario exterior del Golfo de Guayaquil desplazándose hacia el oeste del margen costero.

Recomendaciones

1. Es imprescindible conocer el tipo de interpolación que ejecuta el software a los datos al momento de realizar gráficos de distribución espacial ya que esto altera notablemente la visualización y la interpretación de los gráficos realizados.
2. La validación de los datos es de vital importancia para el realizar un análisis correcto.

3. Para próximos estudios considerar una temporalidad más alta de las mediciones, para esto se podría solicitar al INOCAR los datos históricos de todos los cruceros regionales antes realizados incorporando también variables nuevas al Modelo de Efecto Mixto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Amestoy, «APROXIMACIÓN AL ESTUDIO DE LAS CORRIENTES OCEÁNICAS Y SU INFLUENCIA EN EL CLIMA. EL DENÓMENO DE LA CORRIENTE DE EL NIÑO,» *NIMBUS*, vol. 3, pp. 5-26, 1999.
- [2] M. I. Graco, J. Ledesma, G. Flores y M. Girón, «Nutrientes, oxígeno y procesos biogeoquímicos en el sistema de surgencias de la corriente de Humboldt frente a Perú,» *Rev. peru biol.*, vol. 14, nº 1727-9933, pp. 117-128, 2007.
- [3] G. Torres, «AREAS DE MAYOR PRODUCTIVIDAD BIOLÓGICA (CLOROFILA "a") EN EL PACÍFICO ECUATORIAL (82°W-92°W) DURANTE 1988-1999 Y SU RELACIÓN CON EVENTOS EL NIÑO,» *ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO*, vol. 13, nº 1, 2005-2006.
- [4] INSTITUTO OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA, «INFORME PRELIMINAR DE LAS CONDICIONES OCEANO-ATMOSFÉRICAS MONITOREADAS EN EL CRUCERO OCEANOGRÁFICO CR-XIX-16,» Guayaquil, 2016.
- [5] R. Schilitzer, «Ocean Data View,» 2016. [En línea]. Available: <http://odv.awi.de>.
- [6] I. Chamarro, «Controles de calidad y valores de referencia para datos de oceanografía química. El caso del Radial Profundo de Canarias,» UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, GANDÍA, 2015.
- [7] J. Seoane, «¿Modelos mixtos (lineales)? Una introducción para el usuario temeroso,» Dpto. Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2014.
- [8] M. J. Crawley, «Mixed-Effects Models,» de *The R Book*, Imperial College London at Silwood Park, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [9] R Core Team, «R: A Language and Environment for Statistical Computing,» RStudio: Integrated Development for R, Vienna, Austria 2006. [En línea]. Available: <https://www.R-project.org/>.

ANEXOS



Foto 1. Recolección de agua de la botella de Van Dorn en el Crucero Regional XIX a bordo del BAE "Orión".



Foto 2. En el laboratorio húmedo del BAE "Orión" se filtraban las muestras de agua recolectadas para su respectivo análisis.