

Variación del estado trófico durante el período 2010-2020 en el estuario interno, Canal Bocana de Balao - Golfo de Guayaquil

Variation of the trophic state during the period 2010-2020 in the inner estuary, Bocana de Balao Channel - Gulf of Guayaquil

Samantha Barreiro De La A

Bióloga
Universidad Estatal Península de Santa Elena
Santa Elena-Ecuador
samantha.barreirodelaa8930@upse.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5538-4951>

Freddy Hernández-Vaca

Doctor en Oceanografía
Universidad Estatal Península de Santa Elena
Santa Elena-Ecuador
f.hernandez@upse.edu.ec
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1923-9826>

Artículo

Acta Oceanográfica del Pacífico
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Acta Oceanográfica del Pacífico
DOI: <https://doi.org/10.54140/raop.v6i1.73>
Recibido 09 de marzo, 2024
Aceptado 03 de junio, 2024
Vol 6. No. 2 2024
ISSN: 1390-129X
ISSN: 2806-5522
Pg. 1-17

Resumen

El Golfo de Guayaquil es uno de los sitios más productivos en las costas sudamericanas, donde los estuarios representan un papel fundamental en la dinámica de los nutrientes y el desarrollo de la biodiversidad característica del área. El objetivo del estudio fue mediante el uso de información satelital, analizar el estado trófico de un punto del estuario interno del Golfo de Guayaquil, en el canal Bocana de Balao, aplicando índices de estado trófico, como el índice Karydis (1983) y el índice de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (1982), establecer las variaciones estacionales de los índices tróficos de los nutrientes para observar las relaciones con los periodos El Niño y La Niña, posteriormente obtener la tendencia estacional de los índices tróficos de los nutrientes analizados. El punto de estudio se localiza dentro del estuario interno del Golfo de Guayaquil analizando series temporales de los principales nutrientes como NO₃, PO₄ y SiO₄. Estos datos fueron obtenidos del servidor espacial marítimo COPERNICUS durante el período de estudio 2010 y 2020. Los resultados revelaron un estado oligo-mesotrófico para el punto de estudio, donde el SiO₄ está en un nivel mesotrófico mientras que el IK del PO₄ y NO₃ se presenta en un estado oligotrófico siendo equiparables al estado trófico de la clorofila, según el índice de la OCDE, durante el periodo de 11 años e independientemente de las estaciones climáticas. Asimismo, se identificaron correlaciones entre el IK y el ONI durante la temporada lluviosa de los años 2015 y 2016, lo cual se alinea con los eventos cálidos asociados al fenómeno de El Niño en esos años. Por otro lado, las series temporales de los índices de Karydis exhibieron variaciones con pendientes diversas según las estaciones climáticas, siendo la tendencia predominante

la permanencia del estado oligo-mesotrófico, pese a que se conoce de las constantes aportaciones de nutrientes de origen antropogénico, por lo cual se sugiere incorporar al estudio variables biológicas.

Palabras clave: Estado trófico, ciclo anual y estacional, ONI, nutrientes limitantes

Abstract

The Gulf of Guayaquil is one of the most productive sites on the South American coast, where estuaries play a fundamental role in nutrient dynamics and the development of the area's characteristic biodiversity. The objective of the study was to use satellite information to analyze the trophic level of a point of the internal estuary of the Gulf of Guayaquil, in the Bocana de Balao channel, applying trophic level's index, such as the Karydis index (1983) and The Organization for Economic Cooperation and Development index (OCDE, 1982), to establish the seasonal variations of trophic index of nutrients to preserve the relationships with the El Niño and La Niña periods. Subsequently, to obtain the seasonal trend of the trophic index of the nutrients analyzed. The point is located in the internal estuary of the Gulf of Guayaquil analyzing time series of the main nutrients such as NO₃, PO₄ and SiO₄. These data were obtained from the COPERNICUS maritime space server during the 2010 and 2020 study period. The results revealed an oligo-mesotrophic state for the study point, where SiO₄ is at a mesotrophic level while the IK of PO₄ and NO₃ are present in an oligotrophic, comparable to the trophic state of chlorophyll, according to the OECD index, during the 11-year period and regardless of climatic seasons. Correlations were also identified between IK and ONI during the rainy season of 2015 and 2016, which aligns with the warm events associated with the El Niño phenomenon in those years. On the other hand, the time series of the Karydis indices exhibited variations with different slopes according to the climatic seasons, with the predominant tendency being the permanence in an oligo-mesotrophic state, despite the fact that it is known of the constant nutrient's contribution of anthropogenic origin, so it is suggested to incorporate biological variables into the study.

Key words: Trophic state, annual and seasonal cycle, ONI, limiting nutrients.

Introducción

En Ecuador una de las mayores zonas de productividad marina-costera se encuentra en el Golfo de Guayaquil debido al aporte de nutrientes que recibe del río Guayas (Montaño & Sanfeliu, 2008; Hurtado, 2012). No obstante, Prado *et al.*, (2017) menciona que la zona estuarina del Golfo de Guayas posee un nivel mesotrófico; posiblemente por las aportaciones de las actividades

antropogénicas que caracterizan a la zona de estudio (Torres *et al.*, 2015).

El aumento de las concentraciones de nutrientes fundamentales como nitrógeno y fósforo, que generalmente resultan de la actividad antrópica, son el origen de las condiciones de eutrofización, siendo uno de los problemas medioambientales más frecuentes en aguas continentales (OCDE, 1982). Estas variaciones de nutrientes pueden ser definidas mediante índices que describen

el estado trófico, basados en las concentraciones de los nutrientes (Carlson, 1977).

Bajo el contexto anterior, el uso de teledetección se ha convertido en una herramienta para mejorar la comprensión del sistema climático y el monitoreo de eventos climatológicos como ENOS, recabando una gran cantidad de datos de la superficie de la tierra, el océano y la atmósfera a varias escalas espacio-temporales, contribuyendo a las proyecciones climáticas y los productos de reanálisis meteorológico, utilizados para estudios de cambio y variabilidad climática (Herrera & Morales, 2009; Yang, 2013; Purkis, 2018).

El estuario interno del Golfo de Guayaquil presenta concentraciones significativamente más altas de nutrientes en comparación con el estuario externo Prado, *op cit.*, lo cual puede relacionarse con el efecto directo de las actividades antrópicas, como el incremento poblacional, expansión de áreas de urbanización, actividad marítima, sobreexplotación de recursos, contaminación del agua por actividades industriales o de producción, así como los efectos directos e indirectos del cambio climático (Feota & Bazzani, 2002; Martínez, 2010).

La implementación de estudios sobre el estado trófico de los nutrientes en estas áreas, es crucial para identificar los efectos negativos que influyen en la vulnerabilidad de los ecosistemas estuarinos, entre los principales problemas se encuentra el deterioro de la calidad del agua debido al exceso de aportaciones de nutrientes. Estas investigaciones proporcionan herramientas valiosas para establecer medidas de control y seguimiento en la gestión de ecosistemas costeros estuarinos (Martínez, 2010).

El objetivo de este trabajo es analizar el estado trófico de un punto del estuario interno del Golfo de Guayaquil, en el canal Bocana de Balao, aplicando índices del estado trófico, como el índice Karydis (1983) que mide el estado trófico de un nutriente en un área y durante un periodo de tiempo determinado. Por otro lado, el índice de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) el cual categoriza el estado trófico de un cuerpo de agua en función de los valores medios anuales de la clorofila-*a*, posteriormente establecer las variaciones estacionales de los índices tróficos de los nutrientes y observar las relaciones con los periodos El Niño y La Niña, finalmente obtener la tendencia estacional de los índices tróficos de los nutrientes analizados.

Materiales y métodos

El golfo de Guayaquil presenta una plataforma continental con una profundidad que va desde 180 m en el borde occidental hasta menos de 20 m en la parte interior. Además, descargan 24 cuencas hidrográficas, siendo la más importante la del Río Guayas, cuyo río se forma de la confluencia del Daule y Babahoyo (Montaño & Sanfeliu, 2008).

El estuario exterior está conformado por las bocas de los canales El Morro y Jambelí. Mientras que el interior es conocido como río Guayas el cual presenta aportes del estero Salado, los ríos Taura y Churute (Twilliey, 2001).

El área de estudio se encuentra en el estuario interior, entre el canal Bocana de Balao e isla Puná, donde se realizó el análisis de 1 punto de estudio correspondiente a las siguientes coordenadas 2°89'1S y 79°95'3 W (Figura 1).

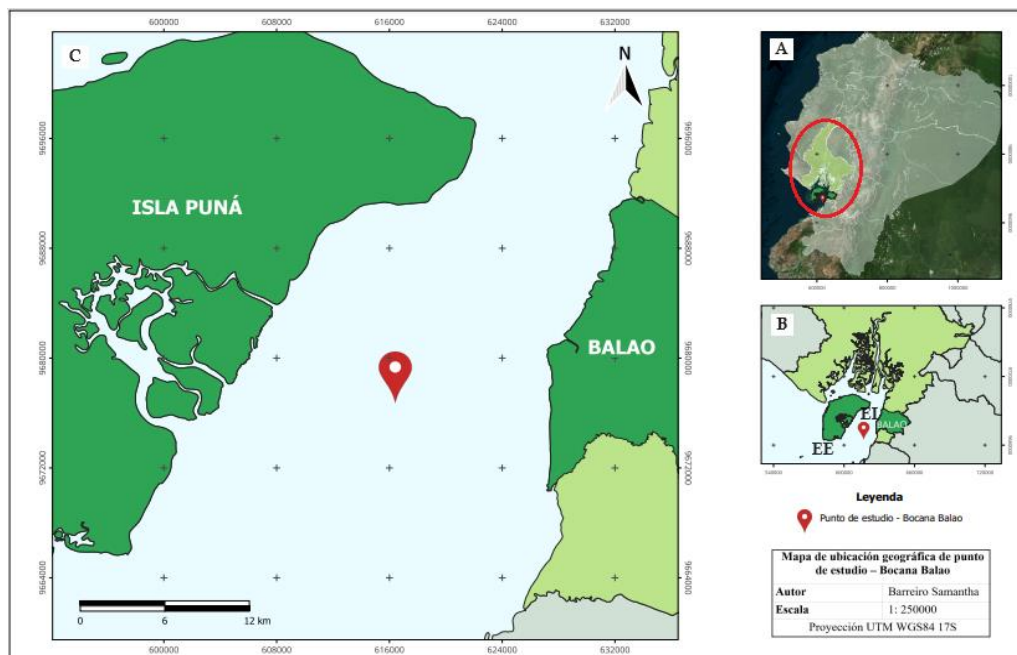


Figura 1. Área de estudio. a) Ecuador continental la elipse representa la Cuenca del Río Guayas. b) Golfo de Guayaquil, Estuario Exterior (EE), Estuario Interior (EI), c) Marcador de color rojo representa el punto de estudio dentro del EI Golfo de Guayaquil.

Se obtuvieron los datos diarios superficiales de las variables: Clorofila-a (Chl), nitrato (NO₃), fosfato (PO₄), silicato (SiO₄), Temperatura Superficial del Mar

(TSM) y Oxígeno Disuelto (OD), desde el 1 de enero del 2010 al 31 de diciembre del 2020, el detalle de la información se encuentra en la (Tabla 1).

Tabla 1. Información adicional de los datos obtenidos de Copernicus Marine Service.

Variable	Resolución espacial	Fuente/DOI	Resolución temporal	Unidad
Chl	0,25° × 0,25°	https://doi.org/10.48670/moi-00019	Diaria	mg/m ³
OD	0,25° × 0,25°	https://doi.org/10.48670/moi-00019	Diaria	m mol /m ³
NO ₃	0,25° × 0,25°	https://doi.org/10.48670/moi-00019	Diaria	m mol /m ³
PO ₄	0,25° × 0,25°	https://doi.org/10.48670/moi-00019	Diaria	m mol /m ³
SiO ₄	0,25° × 0,25°	https://doi.org/10.48670/moi-00019	Diaria	m mol /m ³
TSM	0,25° × 0,25°	https://doi.org/10.48670/moi-00052	Diaria	°C

Análisis de datos

La información original fue sometida a pruebas de normalidad para conocer la distribución de los datos, previamente se eliminó información atípica de todas las variables.

Se realizó una prueba de Anderson-Darling, posteriormente una prueba de igualdad de varianzas de Levene (homocedasticidad). Luego, para comparar las medias se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal - Wallis en donde con $p < 0.05$ como valor significativo (Zar, 1996; Sheskin, 2004).

Una vez corroborada la normalidad de los datos, se estimó la sumatoria de las concentraciones por cada mes de nitrato (NO₃), fosfato (PO₄), silicato (SiO₄). Por otro lado, se obtuvieron series de tiempo con los promedios mensuales de Chl, TSM y OD

Índice Karydis

El índice Karydis (IK) corresponde a una estimación del estado trófico por nutriente y por localidad en un cuerpo de agua, el mismo no depende del tamaño ni el número de estaciones (Karydis, 1983). Los resultados obtenidos son interpretados en unidades

Karydis y categorizados en bajo el siguiente rango de referencia según Karydis (1992): <3 Oligotrófico; 3-5, Mesotrófico; >5, Eutrófico. El IK se estimó con las series mensuales de nitrato (NO₃), fosfato (PO₄) y silicato (SiO₄), aplicando la siguiente fórmula:

$$IK = \frac{C}{C - \text{Log} x} + \text{Log} A$$

Donde:

IK es el índice de eutrofización de nutrientes.

C es la sumatoria de la concentración total de un nutriente determinado en el área.

x es la concentración total del nutriente en el área.

A el número de estaciones.

Índice de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE).

El índice OCDE (1982) es un referente para la clasificar el estado trófico de cuerpos de agua, en función de las concentraciones de clorofila-a (mg/m³), los rangos se dividen en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación trófica en función de la concentración de clorofila-a.

	Categoría trófica	Clorofila-a (mg/m ³)
Índice OCDE (1982)	Ultraoligotrófico	< 1
	Oligotrófico	1 a 2.5
	Mesotrófico	7.9 a 25
	Eutrófico	>25
	Hipertrófico	359.20

Periodos El Niño/La Niña

Los periodos El Niño o La Niña son definidos por el Índice El Niño Oceánico (ONI) el cual es una medida de la condición de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en sus fases cálidas (El Niño) y fría (La Niña), donde se monitorea la variación de temperatura

promedio de la superficie del mar durante un periodo de 3 meses en el Pacífico tropical centro-oriental, específicamente entre 120°-170°W, cerca de la línea de cambio de fecha internacional. Cuando estas temperaturas son más altas de lo normal, se considera que hay condiciones de El Niño en el océano, identificadas por un valor de ONI en la región

Niño-3.4 de +0,5 o superior. Esto indica que las aguas superficiales en esta región del Pacífico están al menos 0,5 grados Celsius más cálidas de lo habitual. Por otro lado, cuando el ONI es de -0,5 o menor, se dice que hay condiciones de La Niña, lo que significa que la región está al menos 0,5 grados Celsius más fría de lo habitual (CPC, 2017). Se calcularon los valores del índice ONI para cada año de estudio a partir del siguiente producto: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

Análisis de series de tiempo

Series anuales fueron obtenidas de cada IK y Chl y posteriormente analizadas en periodos de tres años. Las series de tiempo de los índices IK, ONI y de las variables: Chl, TSM y OD fueron separadas por estaciones climáticas. Se consideró estación seca desde mayo a noviembre y lluviosa desde diciembre a abril de cada año.

Se emplearon análisis de Clúster Jerárquico mediante el uso de dendogramas de similitud para las diferentes variables durante el periodo de estudio. Esta metodología permite crear dendogramas de similitud con el fin de realizar conglomerados/agrupaciones por núcleos (Broncano, 2018). Con las series climáticas (estacionales) se realizaron los siguientes análisis:

Análisis Clúster jerárquico estacional

IK vs clorofila

Se determinaron los promedios estacionales tanto de los IK como de la clorofila para luego obtener un dendograma de similitud y observar posibles patrones en las agrupaciones de las variables en estación seca como lluviosa.

IK vs TSM, OD Clorofila

Se calcularon los promedios estacionales de los IK y Chl, y se agregaron los promedios estacionales de las variables TSM y OD. El objetivo fue analizar cómo responden los IK y Chl con las variables físico-químicas adicionales. Esto se llevó a cabo mediante

análisis de similitud para identificar patrones de comportamiento conjunto.

Análisis de correlación estacional

IK vs ONI

Las series mensuales de IK y del ONI fueron separadas en periodos de estación seca y lluviosa. Con cada "juego" de datos se realizó el análisis de componentes principales a partir de la matriz de correlación (Sheskin, 2004), para establecer la relación entre el estado trófico y El Niño / La Niña.

En primer lugar, el análisis de componentes principales (PCA) se utiliza para reducir la dimensionalidad de los datos y encontrar patrones subyacentes en un conjunto de variables relacionadas, examinando la relación entre los componentes principales resultantes de ambos conjuntos de datos, para evidenciar si existe asociación entre el estado trófico del cuerpo de agua y las condiciones climáticas asociadas con El Niño (estación seca) y La Niña (estación lluviosa).

Con el uso de la matriz de correlaciones se identifican los coeficientes significativos para determinar la intensidad de las asociaciones de los IK para la estación seca y lluviosa. El coeficiente de correlación oscila entre -1 y +1, el valor 0 que indica que no existe asociación lineal entre las dos variables en estudio (Abraira & Pérez, 1996).

Tendencia estacional del estado trófico

Durante el período de estudio, se llevó a cabo un análisis de la tendencia del IK con la información anual por estación climática (seca o lluviosa) Para ello, se empleó un modelo de regresión lineal, para evaluar la tendencia de las variables en el tiempo (Limeres, 2011; Lim & Choi, 2015).

Resultados

El análisis de varianza de la información original de NO₃, PO₄ y SiO₄ mostró un p value menor a 0.05 entre los 11 años de estudio indicando que no hay diferencias significativas en la varianza de los datos.

Variación anual del Índice Karydis y Variación anual de clorofila

Los promedios del IK de cada variable están agrupados cada 3 años según las diferentes categorías del Índices Karydis. (Oligotrófico,

Mesotrófico, Eutrófico). La categoría trófica de la Chl se asimila a la de los IK de NO₃ y PO₄. Por el contrario, el IK de SiO₄ presenta un estado mesotrófico con unidades Karydis > 3.

Tabla 3. Promedios durante los 11 años de data, en intervalos de 3 años para los IK de cada nutriente con su respectiva categoría. En el canal Bocana de Balao.

AÑOS		2010-2012	2013-2015	2016-2018	2019-2020	2010-2012	2013-2015	2016-2018	2019-2020	2010-2012	2013-2015	2016-2018	2019-2020
Nutrientes		PO ₄				SiO ₄				NO ₃			
IK	Olig	1,98	1,85	1,89	1,63	3,7	3,7	3,68	3,32	1,94	1,95	1,95	2,07
	Mes												
	Eutr												

Tabla 4. Promedios durante los 11 años de data, en intervalos de 3 años para el Índice OCDE con respecto a la concentración de clorofila y su categorización. En el canal Bocana de Balao.

		Categoría trófica Clorofila-a			
Periodos		2010-2012	2013-2015	2016-2018	2019-2020
OCDE	Ultra oligotrófico				
	Oligotrófico	2,00	1,97	2,01	1,96
	Mesotrófico				
	Eutrófico				
	Hipertrófico				

El análisis de similitud (Clúster Jerárquico) de los IK con la Chl refleja un conglomerado cercano entre el IK del NO₃ y PO₄ con la clorofila durante la estación seca (Figura 2 A). Por otra parte, durante la estación lluviosa el IK del PO₄ tiene mayor

distancia del núcleo formado por el IK del NO₃ y la Chl (Figura 2 B). El comportamiento del SiO₄ es el mismo para ambas estaciones al no relacionarse cercanamente con los conglomerados anteriores (Figura 2 A y B).

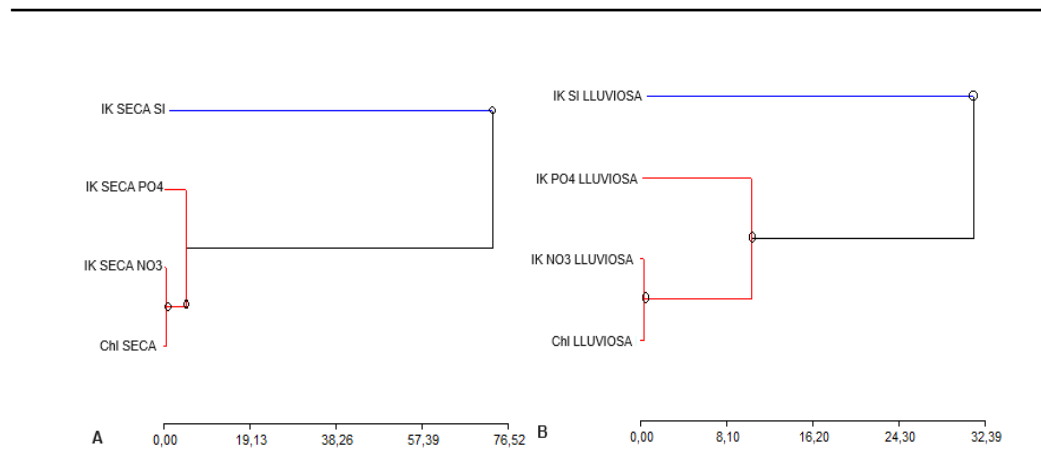


Figura 2. Relación de los IK por nutriente con la Chl. Dendrograma de similitud tipo Clúster con distancia euclídea² categorizado por estaciones: A) seca y B) lluviosa del período de estudio.

Se evidencia un conglomerado cercano entre los IK del NO₃ y PO₄ de la clorofila durante la estación seca; El SiO₄ es el mismo para ambas estaciones y no se relaciona con los otros conglomerados. En el canal Bocana de Balao. En el análisis Clúster se obtuvo un dendrograma con 2 conglomerados tanto para la estación seca como lluviosa (Figura 3). Para la estación seca el primer conglomerado estuvo conformado por: TSM los IK y la Chl, el OD representa un conglomerado aislado (Figura 3 A), mientras que para la estación

lluviosa el primer conglomerado está formado por: TSM, OD, Chl y el segundo conglomerado agrupa a los IK (Figura 3 B).

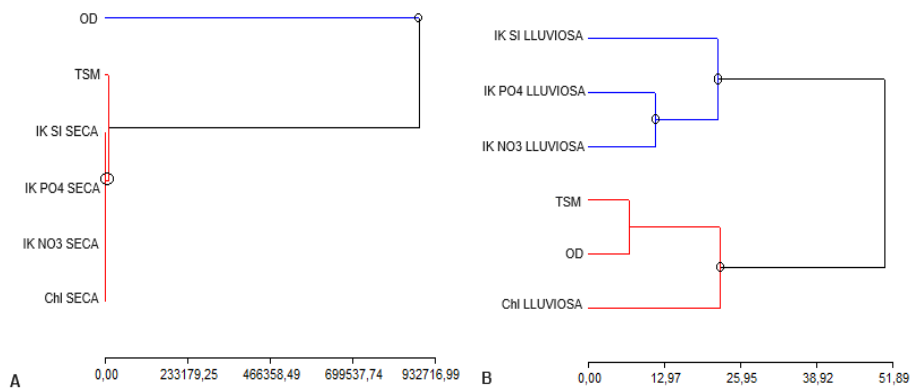


Figura 3. Relación de los IK por nutriente con la Chl y parámetros físico-químicos como temperatura y oxígeno. Dendrograma de similitud tipo Clúster con distancia euclídea² categorizado por estaciones A) seca y B) lluviosa del período de estudio. Se demuestra que para la estación seca el conglomerado está formado por los IK y la TSM, en época lluviosa los IK forman agrupaciones distantes de las variables físicoquímicas y la Chl. En el canal Bocana de Balao.

Correlación estacional entre el IK y ONI

El análisis de correlación entre los datos de estacionalidad anual del IK y el ONI muestra el IK del SiO₄ durante 2011, 2012, 2013, 2014 y 2018 se comporta de una manera similar, y tiene una relación fuerte negativa con el ONI durante los años 2015, 2016 y 2017 siendo el coeficiente de correlación -0.580. En este

sentido el CP1 tuvo una variabilidad explicativa relativamente mayor en comparación con el CP2 y el mayor peso, con el índice el ONI para los años 2015, 2016, 2017 (Figura 4).

Por otro lado, en estación lluviosa los IK de NO₃ y PO₄ poseen una fuerte correlación con el año 2010 con un coeficiente de 0.428.

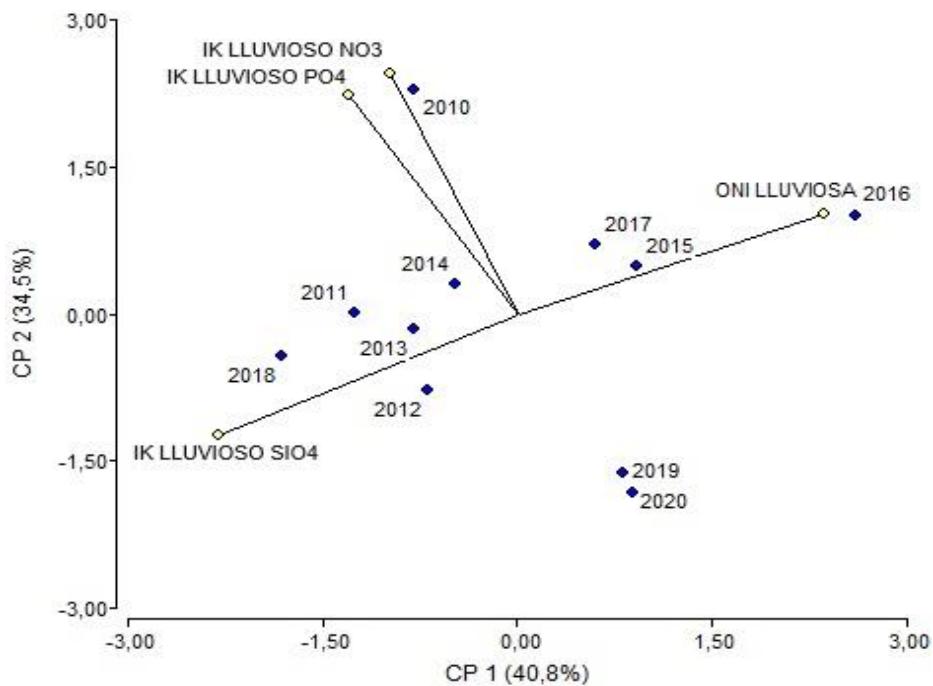


Figura 4. Expresión ortogonal de la correlación entre los IK y el ONI en estación lluviosa expresando los años de evaluación mediante biplots.

Para la estación seca el CP1 tuvo la mayor variabilidad con más del 50% y con los mayores pesos para los IK del PO₄, SiO₄ y el ONI de la estación seca. El ONI muestra una correlación positiva con los IK del PO₄ con el coeficiente de correlación de 0.133, el valor de

SiO₄ fue más bajo. No obstante, el PO₄ y el SiO₄ presentan una correlación fuerte positiva entre sí con un valor de 0.894, siendo inversos al IK del NO₃ los cuales presentan coeficientes negativos (Figura 5).

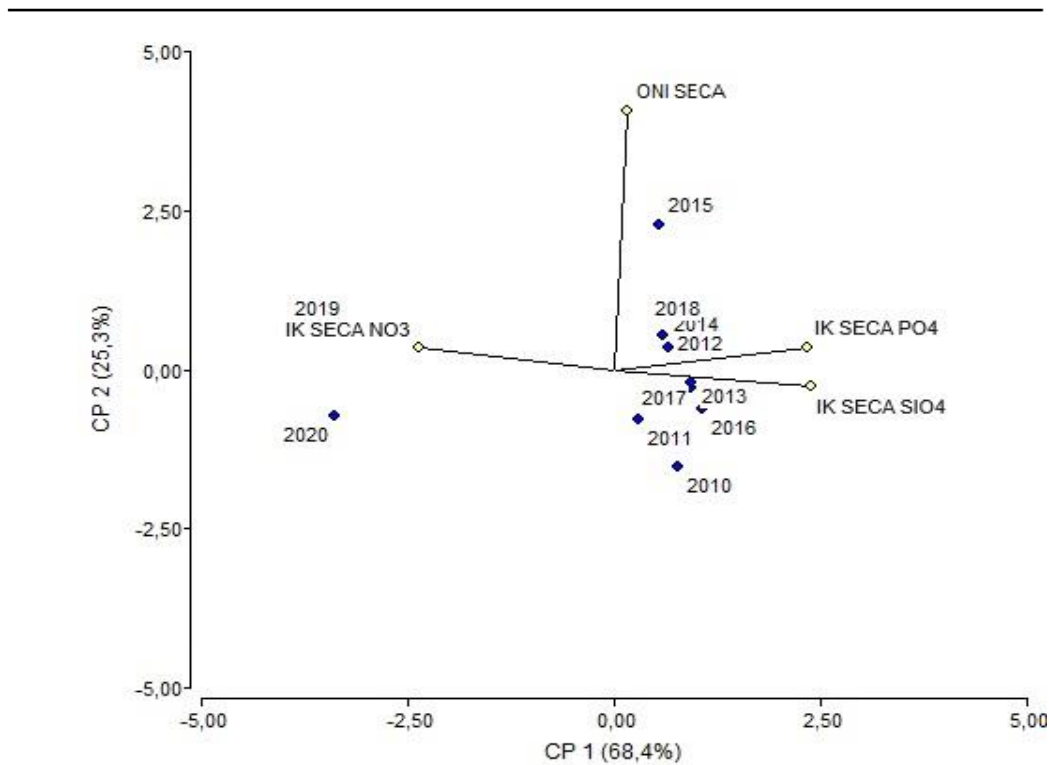


Figura 5. Expresión ortogonal de la correlación entre los IK y el ONI en estación lluviosa expresando los años de evaluación mediante biplots.

Tendencia de los IK y la Chl

Las series de tiempo estacionales de los IK (de los diferentes nutrientes) se muestra en la (Figura 6). El IK de NO₃ muestra rangos entre 2.35 y 2.55 para la estación lluviosa y entre 1.3 y 1.9 para la estación seca. La tendencia en ambas estaciones climáticas es contraria, siendo 2.16 veces mayor el IK de la estación seca que el IK de la estación lluviosa (Figura 6 A y B).

Para el caso del IK del PO₄ presenta pendientes negativas para ambas estaciones y la diferencia entre ambas pendientes está en el orden de la milésima (0.002). En la estación seca en 9 de los 11 años se presentaron valores de entre 2.0 a 2.2 (Figura 6 C y D).

El IK del SiO₄ durante la estación lluviosa presenta una pendiente negativa con una disminución entre 4.1 y 3.50. El valor de R para el modelo del IK seca del SiO₄ fue de 0.7%, siendo el más bajo entre los modelos anteriormente presentados, que oscilan entre valores de R del 23% al 59% (Figura 6 E y F).

En las series de tiempo del IK de PO₄ y SiO₄ durante la estación seca se observa que los años 2019 y 2020 son los datos más dispersos hacia el eje negativo de los demás años influyendo en la pendiente resultante. Por otro lado, el NO₃ muestra la misma dispersión, pero hacia el lado positivo.

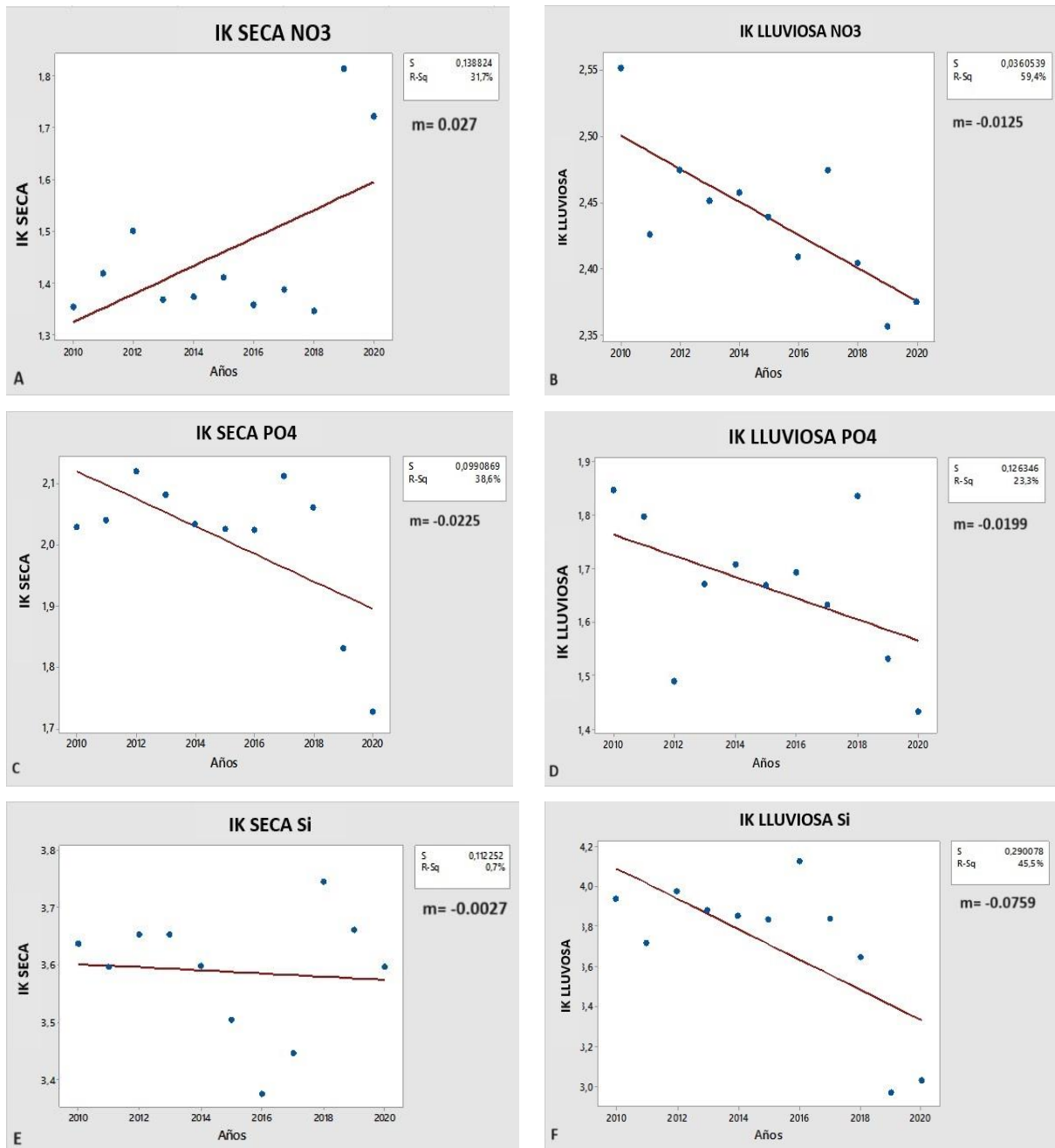


Figura 6. Serie de tiempo de los IK de cada nutriente, divididos por estación climática durante el periodo de estudio. La línea de color rojo es tendencia de cada serie (resultante del modelo de regresión lineal), en cada gráfico se presenta el error estándar de estimación S, R-sq el cual indica la cantidad proporcional de la variación y la pendiente (m). 5 pendientes, muestran tendencia a disminuir sus valores durante el tiempo de estudio, solo para el Ik de NO₃ la tendencia es positiva.

Discusiones

El Golfo de Guayaquil es uno de los sitios más productivos en las costas de Sudamericanas,

donde los estuarios representan un papel fundamental en la dinámica de los nutrientes

y el desarrollo de la biodiversidad característica del área de estudio.

El estado de oligotrófico para las variables nitrato, fosfato y para silicato mesotrófico; es característico de estas zonas costeras altamente productivas, influenciadas por procesos de mezcla y estratificación de la columna de agua controlados a su vez por los efectos de la estacionalidad de los vientos, cambios en los flujos de marea y topografía (De La Lanza & Flores, 1998).

Sobre la costa sur del Ecuador en el Golfo de Guayaquil, los vientos son más irregulares, ya que esta zona presenta más efectos locales, es decir vientos de carácter brisa de mar y brisa de tierra con intensidades alrededor de 3 m/s, flujos de viento predominantes del sur y componentes oeste que generan patrones en la dinámica de este ecosistema costero durante el año (Gálvez & Regalado, 2007). Lo descrito coincide con lo mencionado por López (2003) en el estudio de estado trófico de los nutrientes en ecosistemas estuarinos del Golfo de California, donde el índice trófico reveló la oligotrofia para fosfatos, nitratos y nitritos en estado dominante durante todo el año, pero con excepción de los períodos de transición, todo esto en condiciones de influencia de vientos con patrones de cambios anuales y estacionales.

La variación de los IK de NO₃ y SiO₄ concuerdan con lo descrito en la investigación de Prado, op. cit., quien menciona que para la estación de estudio Canal Bocana de Balao, el índice trófico del NO₃ se encuentra en 2.7 unidades Karydis (estado oligotrófico entrando a mesotrófico), para los SiO₄ se presenta en 4.5 unidades Karydis (estado mesotrófico). A su vez, este estudio indica que existe una correlación entre los nutrientes tanto en el estuario interno como en el externo en época seca. Sin embargo, en los resultados de esta investigación se observa que, para la época lluviosa, durante los 11 años de estudio, se correlacionan el NO₃ y PO₄, relacionándose con los efectos de las escorrentías y descargas de nutrientes, producto de procesos de precipitación (Hans, 2014) y aportes debido a las actividades

antropogénicas. (Martínez, 2010; Torres, op. cit).

En un panorama general la aplicación del IK muestra la categorización de los nutrientes durante un tiempo y espacio determinado, pero también puede estar relacionado con la disponibilidad de estos nutrientes. Los nutrientes limitantes son aquellos que influyen en el crecimiento de organismos fotosintéticos, tales como fosfatos, los cuales se encuentra de manera natural o por aportaciones externas, y en otros casos como en ecosistemas marinos el factor limitante es el nitrógeno para la mayoría de las especies Hans, op cit. Por otro lado, en ecosistemas estuarinos existe la incidencia de la co-limitación de compuestos nitrogenados (N) y fosforo (P), es decir la estimulación de la productividad primaria se realiza mediante la adición combinada de N y P potenciando mayormente a la producción primaria que por sí solos (Lewis, 2011).

La Chl es el parámetro que provee una medida indirecta de la biomasa de algas y también es un indicador del estado trófico en cuerpos de agua (Carson & Simpson, 1996). Los resultados de los análisis de similitud entre los IK y la Chl muestran a los NO₃, PO₄ y la Chl como variables con correlación en época seca y lluviosa por lo cual se puede inferir que el desarrollo del componente biomasa en estos tipos de ecosistemas y en ambas épocas climáticas es influenciado por la variación de estos nutrientes inorgánicos, tales como la disponibilidad del nitrógeno y el fósforo (Mariñelarena & Gómez, 2008). Bajo este contexto Prado, op. cit., mencionan que en el estuario interior del Golfo de Guayaquil existe una correlación positiva entre especies de microalgas como diatomeas con nutrientes tales como fosfatos, nitratos y silicatos durante los 2 años de su estudio.

El efecto de los eventos de El Niño y La Niña, en escalas de tiempo estacional, se encuentra estrechamente relacionados con el aumento de las precipitaciones asociadas al cambio climático, ya que aumentarían los procesos de erosión y carga de nutrientes. Sin embargo, en el área de estudio existe una dinámica

constante de las corrientes circundantes, en cuanto al equilibrio en el ingreso y salida de nutrientes (Allauca, 1990). Pese a lo anteriormente descrito, en los ciclos anuales existen variaciones de los nutrientes, dependientes de la época del año. Por ejemplo, en época seca, la disminución de los aportes crea un escenario altamente favorable para el surgimiento de microorganismos que aprovechan las condiciones, tales como cianobacterias las cuales son características por el consumo de nitrógeno del medio acuático como del ambiente (Rosso, 2021), así también el aumento de materia orgánica y nutrientes en períodos de lluvia (Gálvez & Regalado, 2007; López, 2003)

También es necesario considerar que alrededor del 70% de los cuerpos de agua continentales desembocan en la zona costera destacándose el Golfo de Guayaquil (Rendón, 1983), el cual presenta constantes aportes de nutrientes provenientes de las aguas residuales sin tratamiento de origen agrícola, pecuario, doméstico, industrial y de acuicultura siendo factores independientes de la época del año que inciden en la concentración de los nutrientes en el medio.

Los resultados descritos por Tapia (2008), Seisedo (2010), Prado, op cit., muestran concentraciones similares en cuanto a nutrientes y niveles del estado trófico representados mediante los IK con los resultados presentados mediante la información proveniente de servidores marítimos como Copernicus.

Desde hace 20 años atrás se reconoce la importancia de incorporar tecnologías satelitales (Donlon, 2004), ya que la nueva era tecnológica oceanográfica es desarrollar la aplicación de sensores remotos en el manejo costero integrado mediante imágenes satelitales para medir y predecir los cambios en ecosistemas marinos (Donlon, 2004). El uso de información continua permite tener proyecciones de los posibles cambios de los niveles tróficos del Estuario Interior del Golfo de Guayaquil.

Conclusiones

El estado de los nutrientes en un cuerpo de agua puede categorizarse como oligotrófico, mesotrófico y eutrófico y se explica cómo los diferentes niveles de disponibilidad de nutrientes, productividad biológica o primaria en el ecosistema acuático. Oligotrófico con bajos niveles de nutrientes, mesotróficos con niveles moderados de nutrientes y productividad biológica, eutróficos con altos niveles de nutrientes y alta productividad primaria (Pereira, 2020).

Con la medida del IK nitrato y fosfato se evidencia que el área de estudio se encuentra en el rango de oligotrófico al igual que la clorofila usando el índice OCDE, a diferencia del IK de SiO₄ el cual está en una categoría superior es decir en un nivel mesotrófico, siendo posible mencionar que el área de estudio se mantuvo en un nivel Oligo-mesotrófico en el período de esta investigación. Ambos niveles no se encuentran dentro de la categoría Karydis. No obstante, indica que existieron nutrientes al límite de pasar del estado oligotrófico al mesotrófico siendo un aspecto importante de considerar. Por lo que se recomienda el uso de categorías intermedias tales como Oligo-mesotrófico y Meso-eutrófico, ya que el índice Karydis maneja solo 3 niveles (Herrera & Morales, 2009; Troccoli & Pardo, 2017).

En el análisis estacional mostrado por el dendograma de similitud el IK del nitrato mantiene similitud con la clorofila en ambas estaciones climáticas, lo cual indica la posible relación entre procesos de aporte de nutrientes al sistema dado por las descargas del río Guayas y de actividades antrópicas hacia el área de estudio (Prado, op cit.) Mientras que el índice del silicato no presenta similitud en ninguna estación climática, mostrando una independencia en el ciclo estacional indicando que los aportes de las precipitaciones pueden no ser la única fuente de enriquecimiento.

Los IK muestran patrones similares en ambas estaciones climáticas, también se evidenció que la TSM se relaciona con los IK y la Chl en la estación seca. en otras palabras, están

dentro de conglomerados, con lo cual es posible determinar que la temperatura fue la principal variable que ejerció influencia en sobre los nutrientes y la clorofila durante la época seca.

Durante la época lluviosa los IK forman conglomerados indicando la similitud de estos valores, puesto que durante esta época existen factores que influyen en la aportación de nutrientes en el medio. Factores tales como las escorrentías y aportaciones fluviales característicos de la estación climática.

En cuanto al análisis de correlación estacional entre el ONI y los IK entre el periodo y lugar de estudio, se infiere que las concentraciones del IK de los nutrientes estuvieron influenciadas por el ONI en la estación lluviosa durante los años 2015, 2016, lo cual concuerda con los eventos calientes productos de El Niño originado durante periodos de esos años.

Los modelos de regresión lineal muestran la tendencia del comportamiento de los nutrientes en el tiempo de estudio, mediante el valor de la pendiente (m). En este sentido es posible determinar que el NO₃ en época lluviosa presentó rangos más elevados con tendencia a disminuir con rapidez, pero en época seca tienen rangos inferiores, pero con tendencia a aumentar. El PO₄ durante época seca tiende a disminuir más rápido, pero presenta rangos superiores a la época lluviosa la cual tiene una pendiente negativa. El SiO₄ a diferencia de los demás nutrientes presenta rangos superiores a 3 unidades Karydis en época lluviosa con tendencia más rápida en disminuir.

Todos los IK de NO₃ y SiO₄ presentan tendencias de disminución rápida para la época lluviosa, con lo cual se puede aducir a que ambos nutrientes estarían representando un estado de co-limitación para la producción primaria según el principio operativo de Liebig (Brown, 1942), denominada "Ley del mínimo" el cual indica que el crecimiento de organismos vivos no está controlado por la cantidad total de los recursos disponible sino por el recurso más escaso.

Agradecimiento

Agradezco sinceramente a mi asesor de tesis de maestría, Freddy Hernández Vaca, por su invaluable orientación y apoyo durante mi carrera académica. También, agradezco a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación por su generosidad y confianza al otorgarme la beca que hizo posible mi logro académico.

Referencias

- Astor, Y. 2013. *Manual de métodos para el análisis de parámetros oceanográficos*. Fundación La Salle de Ciencias Naturales .
- Abraira, V & Pérez, A. 1996. *Métodos Multivariantes en Bioestadística*. ED. Centro de Estudios Ramón Areces. España:1996. Disponible en: < http://www.hrc.es/bioest/Reglin_1.html.
- Allauca, S. 1990. *Presencia de la Corriente Costanera Ecuatoriana*. Acta Oceanográfica del Pacífico, 6(1). p. 10-17.
- Bonansea, M. 2007. *Evaluación de la calidad del agua y estado trófico del embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina*. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Broncano, G. 2018. *Aplicación de análisis Cluster Jerárquicos al proceso de estimación de tráficos por el método de exposición cuasi-inducida*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Brown, C. 1942. "Justus von Liebig—Man and teacher." and "Liebig and the Law of the Minimum". In *Liebig and After Liebig: a century of progress in agricultural chemistry*. American Association for the Advancement of Science.
- Carlson, R. 1977. *A Trophic State Index for Lakes*. Limnology and Oceanography, 22(2). p. 361-369.

- Carson, R. & Simpson, J. 1996. *A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods*. North American Lake Management Society. p.96.
- CPC. 2017. *Description of Changes to Ocean Niño Index (ONI)*. NOAA Center for Weather and Climate Prediction. Climate Prediction Center. 5830 University Research Court.
- De La Lanza, G. & Flores, F. 1998. *Nutrient fluxes in sediment (NH₄⁺ and PO₃-3) in N.W. coastal lagoon Mexico associated with an agroindustrial basin*. Water, Air, and Soil Pollution. p. 107: 105-120.
- Donlon, C. 2004. *The UNESCO Bilko project: developing training capability for coastal and marine remote sensing. Proceedings of the color of ocean data " Symposium, Brussels, November 2002*. Flanders Marine Institute (VLIZ): Oostende, Belgium. xi, 93 p.
- Espinoza, T. & Valdez, J. 2007. *Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. Lima-Perú*. Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional La Molina.
- Feota, G., & Bazzani, R. 2002. *Desafíos y estrategias para la implementación de un enfoque ecosistémico para la Salud Humana en los países en desarrollo: Reflexiones a propósito de las consultas regionales*.
- Gálvez, H. & Regalado, J. 2007. *Característica de las precipitaciones, la temperatura del aire y los vientos en la costa Ecuatoriana*. Acta Oceanográfica del Pacífico, 14(1). p. 201-205.
- Hans, W. 2014. *Evolving Paradigms and Challenges in Estuarine and Coastal Eutrophication Dynamics in a Culturally and Climatically Stressed World*. Coastal and Estuarine Research Federation. DOI: 10.1007/s12237-014-9773-x.
- Herrera, J. & Morales, S. 2009. *Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation*. ELSEIVER. Marine Pollution Bulletin. 59 (2009). p.72-86.
- Hurtado, M. 2012. *Fondo de Agua para la Cuenca del Guayas*. Informe a TNC: Fondo de Agua Guayas.
- IPCC. 2019. *Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. ISBN 978-92-9169-351-1.
- Karydis, M. 1983. *An Index associated with Nutrient Eutrophication in the Marine Environment*. Estuarine, Coastal and Shelf Science. p.16: 339-344.
- Lewis, W. 2011. *Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus in inland waters*. Environmental Science & Technology. p.45: 10030–10035.
- Lim, J & Choi, M. 2015. *Assessment of water quality based on Landsat 8 operational land imager associated with human activities in Korea*. Environmental Monitoring and Assessment . Environmental Monitoring and Assessment DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4616-1>.
- Limeres, C. 2011. *Regresión lineal simple*. Universidad de Santiago de Compostela, p. 2-31.
- López, D. 2003. *Variabilidad del estado trófico y la biomasa del fitoplancton de Bahía Concepción, Golfo de California (1997-1999)*. Ciudad de México : Hidrobiológica vol.13 no.3 .
- MAATE. 2022. *4ta Comunicación Nacional y 2do Informe Bienal de Actualización del Ecuador a la Convención Marco de las*

- Naciones Unidad sobre el Cambio Climático*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE).
- Mancini, M. (2010). *Cyanobacterial bloom and animal mass mortality in a reservoir from Central Argentina*. Brazilian Journal of Biology, v 70, p. 841-845.
- Mariñelarena, J. & Gómez, S. (2008). *Eutrofización en las Lagunas Pampeanas. Efectos Secundarios sobre los Peces*. Biología Acuática. 24:43-48.
- Martinez, R. (2010). *Análisis Oceanográfico y estimación de la vulnerabilidad para la gestión de riesgo y adaptación en el Pacífico Oriental*. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/255731573>.
- Montaño, M. & Sanfeliu, T. (2008). *Ecosistema Guayas Ecuador: Medio ambiente y sostenibilidad*. Rev. Tecnol. ESPOL, 211: 1-6.
- Nadal, G. (2022). *Agua dulce, ¿un recurso en peligro?*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya BarcelonaTECH.
- Nelson, J. (2015). *Drivers of spatial and temporal variability in estuarine food webs*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 533: 67-77.
- OCDE. (1982). *Eutrophication des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte*. DOI: <https://doi.org/10.1002/iroh.19840690206>
- Pereira, R. (2020). *Eutrophication influences biodiversity, ecological status and ecosystem functioning in shallow freshwater ecosystems*. Science of The Total Environment, 738, 139850.
- Prado-España, M. Troccoli-Ghinaglia, L. Cajas-Flores, J. (2017). *Análisis del estado trófico y microfitoplancton de la zona costera de la provincia del Guayas, Ecuador*. Instituto de Investigaciones Marinas Costeras. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras. ISSN 0122-9761.46 (2), 91-114.
- Purkis, S. 2018. *Remote Sensing Tropical Coral Reefs: The View from Above*. Annual Review of Marine Science, 10(1), 149-168.
- Quiroz, R. 2008. *La eutrofización en aguas occidentales de Argentina*. Universidad de Buenos Aire.
- Rendón, M. 1983. *Estudio preliminar de los ríos de la región litoral de Ecuador*. Rev. Cienc. Mar Limnol. INP. Ecuador, 21:179-222. .
- Rosso, L. 2021. *Factores ambientales y antrópofenicos que afectan la formación de floraciones de cianobacterias y cianobacterias*. Repositoria Institucional CONECIT digital.
- Seisdedo, M. P. 2010. *Análisis comparativo del estado trófico de las aguas en la costa oriental de la provincia de Cienfuego*. Cuba: Rev. Invest. Mar., 312: 124-130. .
- Sheskin, D. 2004. *Parametric and nonparametric statistical procedures*. Boca Raton. Fla. Chapman y Hall. 423 pp.
- Tapia, F. H. 2008. *Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula*. Est. Coast. Shelf Sci., 76: 418-430.
- Torres, G. 2006. *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 Oceanografica del Pacífico. VOL 13(1), 2005-2006.
- Torres, G. Recalde, S. Narea, R. Renterira, W. Troccoli, L. & Tinoco, O. 2015. *Variabilidad espacio-temporal del fitoplancton y variables oceanográficas en El Golfo de Guayaquil durante el 2013-15*. Rev. del Instituto de

Investigación. vol 20 n° 40, 2017: 70 - 79. Issn-l:1561-0888.

- Troccoli, L. & Pardo, M. 2017. Estado trófico y estructura comunitaria del microfitoplancton en un sector del golfo de Guayaquil, Ecuador. *Biota Colombiana* .
- Twilley, R. 2001. *The Gulf of Guayaquil and the Guayas river estuary, Ecuador: . Ecuador: In: Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Springer, Berlin Heidelberg, 245-263.*
- UINC. 2021. "El Valor del Agua". <https://www.iucn.org/es/news/americadel-sur/202103/elvalor-del-agua>.
- Val, R. 2006. *Alteración que presenta la temperatura del agua por la existencia de embalses*. Cataluña: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Yang, J. 2013. El papel de la teleobservación por satélite en los estudios sobre el cambio climático. *Naturaleza Cambio climático*, vol. 13.
- Zar, J. 1996. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall. New Jersey. USA.940 pp.