

Desarrollo de un Índice Numérico de Calidad de Agua Marina para la pesca y maricultura en la costa central del Perú

Development of a Numerical Index of Marine Water Quality for fishing and mariculture on the central coast of Peru

Rita Esther Orozco Moreyra¹, Lizbeth-Janet Vivas-Aguas², Alejandro Alcantara Boza³

Recibido: 03/08/2022 - Aprobado: 09/12/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo, desarrollar un índice numérico integrado de calidad de agua de mar para los usos de pesca y maricultura ICAM_{PA} para la zona marina costera de Supe, considerada entre las siete bahías más importantes de la actividad pesquera en el Perú. En el área de estudio, se evaluaron 15 estaciones a nivel de superficie y fondo. Se seleccionaron 10 parámetros que fueron definidos por su nivel de importancia y que definen la calidad acuática ambiental de esta área que es importante para la extracción de recursos hidrobiológicos. Los valores obtenidos utilizando el índice, desarrollado en la presente investigación para pesca y maricultura en la bahía de Supe, evidenció que la zona centro ubicada frente a la desembocadura del río Pativilca y la zona sur se encuentran afectadas por las plantas pesqueras industriales presentes en esta área. Se concluye que el ICAM_{PA} obtenido es estadísticamente significativo y adecuado para el desarrollo de las actividades de pesca y maricultura en la bahía de Supe y puede ser aplicable a otras zonas costeras del litoral peruano donde se desarrollen estas actividades. De esta manera se constituye en una herramienta útil para la gestión y manejo sostenible de las zonas costeras.

Palabras claves: Índice de calidad de agua marina, conservación de ecosistemas marinos, pesca y maricultura.

ABSTRACT

The objective of the study was to develop an integrated numerical index of seawater quality for fishing and mariculture using ICAM_{PA} for the coastal marine area of Supe, considered among the seven most important bays for fishing activity in Peru. In the study area, 15 stations were evaluated at the surface and bottom levels. 10 parameters were selected that were defined by their level of importance and that define the aquatic environmental quality of this area, which is important for the extraction of hydrobiological resources. The values obtained using the index, developed in the present investigation for fishing and mariculture in Supe Bay, showed that the central area located in front of the mouth of the Pativilca River, and the southern area are affected by the industrial fishing plants present in this area. It is concluded that the ICAM_{PA} obtained is statistically significant and adequate for the development of fishing and mariculture activities in Supe Bay and can be applied to other coastal areas of the Peruvian coast where these activities are carried out. In this way, it constitutes a useful tool for the management and sustainable management of coastal zones.

Keywords: Marine water quality index, conservation of marine ecosystems, fishing, and mariculture.

1 Instituto del Mar del Perú, Calidad ambiental, Esquina Gamarra y General Valle. Chucuito Callao

Autor para correspondencia: ritaoro@imarpe.gob.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8948-7374>

2 Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés –INVEMAR. Santa Marta, Colombia.

E-mail: bjanet.vivas@invemar.org.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1810-6631>

3 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú

Docente. E-mail: falcantarab@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9127-4450>

I. INTRODUCCIÓN

El empleo del uso del índice de calidad del agua ha ganado la aceptación desde hace muchos años, como una herramienta para optimizar la comprensión de los problemas de calidad del agua que permiten integrar datos complejos que describen la calidad del agua (Nguyen et al., 2013). Los conceptos calidad y gestión del agua han sido tratados en forma separada, por lo que son pocos los estudios que los han integrado (Giannuzzo, 2010; Paredes Arquiola, 2008), cuando deberían considerarse en una estrategia integral. Una forma de expresar información de calidad de aguas, de manera integrada, es utilizando índices, los cuales son herramientas que sintetizan la información proporcionada con una gran cantidad de parámetros en una expresión sencilla, generan un valor numérico que permite evaluar la calidad del agua de un sistema hídrico a lo largo del espacio y el tiempo (Alves et al., 2014; Torres et al., 2009).

Los índices de calidad de agua (ICA) fueron desarrollados por primera vez por Brown et al. (1970), para evaluar aguas continentales (ríos, lagunas, lagos, humedales, entre otros), para implantar un método uniforme con el cual se midiera la calidad de agua y que permitiera evaluar los cambios de la calidad asociados a las características de esta. Existen estudios en aguas dulces, como el realizado por Tyson & House (1989), para catalogar la calidad del agua de los ríos en el Reino Unido en un sistema de cinco clases desarrollado por la North West Water Authority (NWC), y basado en el ICA que utiliza nueve parámetros fisicoquímicos y biológicos. El River Pollution Index (RPI) (Barokah et al., 2017), desarrollado para el río Keya, en Taiwán (Liou et al., 2004), utiliza 13 variables, las cuales se categorizaron considerando tres componentes (orgánicos, partículas y microorganismos). En el ecosistema acuático del Lago de Dokan, Kurdistán (Irak), se aplicó el Water Quality Index (WQI) utilizando 10 parámetros fisicoquímicos de calidad acuática (Jawad Alobaidy et al., 2010). En otros casos, se trabaja con la combinación estadística de parámetros de calidad acuática, según lo propuesto por Samboni Ruiz et al. (2007) y Castro et al. (2014). En México se construyó un índice para obtener valores de calidad de agua para diferentes usos para agua potable, agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreativo, en la cuenca hídrica de Lerma y Chapala (León-Vizcaíno, 2014). En Nueva Zelanda, se realizó una adaptación del método DELPHI para precisar los parámetros a emplear en su ICA (Nagels et al., 2001); teniendo como objetivo que el uso de las aguas era destinado para recreación utilizando datos microbiológicos y fisicoquímicos.

Todos los índices mencionados fueron desarrollados y validados para las condiciones propias de una región o un país, y a partir de estos estudios, los organismos gubernamentales han realizado modificaciones para adaptarlos a cada ecosistema hídrico en particular, ya sean continentales o marinos. Tal como, el índice MWCI (Marine Water Condition Index), desarrollado por el Washington State Department of Ecology en 2012; el índice de calidad acuática para aguas marinas de uso recreativo-ICAg (Miravet et al., 2009) y el índice de calidad de aguas marinas y costeras para la preservación de flora y fauna ICAMPFF (Vivas Aguas & Navarrete Ramírez, 2014).

Debido a la funcionalidad de los Índices de Calidad Acuática Marina, permiten mostrar las tendencias temporales de una zona costera, ya sea debido a procesos naturales (como El Niño y La Niña) o los causados por actividades antropogénicas (pesca, maricultura, recreación, entre otras); además por su condición de valores relativos permiten contrastar diferentes casos a nivel nacional e internacional.

En el Perú, se han desarrollado investigaciones con fines de conservación de la zona marina y costera; así como estudios de evaluación ambiental, planes de manejo y otros trabajos puntuales. Estas investigaciones realizadas de forma fragmentada han generado información, no sistematizada ni actualizada. La bahía de Supe recibe el aporte de nutrientes de los ríos Fortaleza y Pativilca, así como significativos volúmenes de desembarque de la pesca industrial y artesanal que la ubican como una de las siete bahías más importantes para las actividades pesqueras (SINIA, 2016). Por estas características la bahía de Supe fue seleccionada para desarrollar aplicar el índice de calidad de agua de mar para la pesca y la maricultura en el Perú (ICAM-_{PA}). Este estudio contribuirá con el conocimiento sobre las características ambientales de las aguas marinas de la bahía de Supe y aportará insumos para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos en la política de Perú hacia el 2030 (MINAM, 2016), y apoyar la gestión ambiental de otras áreas costeras peruanas. El objetivo de este estudio fue desarrollar un índice numérico integrado de calidad de agua marina para los usos de pesca y maricultura, y validarlo en la zona costera central del Perú.

II. MÉTODOS

2.1. Formulación del índice de calidad de aguas marinas para usos de pesca y maricultura -ICAM_{PA}

Para formular el ICAM_{PA} para los usos de pesca y maricultura se siguió la metodología básica para el desarrollo de índices según la literatura y se utilizó como modelo el Índice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras – ICAM_{PPF} propuesto por Vivas Aguas & Navarrete Ramírez (2014), el cual brinda información resumida sobre las características de las aguas marinas y costeras de Colombia para la preservación de la flora y la fauna.

2.1.1. Selección de parámetros

Se identificaron a través de la literatura los parámetros más utilizados en diferentes índices de calidad de aguas, aquellos índices usados exclusivamente para aguas marinas (Tabla 1) y además se usaron como referencia los parámetros medidos en el monitoreo de calidad de aguas marinas en la bahía de Supe que realiza el Instituto del Mar del Perú - IMARPE. Se seleccionaron los parámetros de oxígeno disuelto, pH, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, sulfuros, nitratos, fosfatos, DBO₅, coliformes termotolerantes y contaminantes orgánicos (hidrocarburos de petróleo), en laboratorio siguiendo la metodología de la Standard Methods (2005a, 2005b, 2012).

2.1.2. Ponderación

Los pesos de los parámetros se determinan dependiendo de si tienen efectos directos o indirectos en el ecosistema

Tabla 1. Índices de calidad del agua más utilizados

ICA	Formula	Parámetros	Metodología	Autor
ICA-NSF	$WQI = \sum_{i=1}^n wiqi$	T°, pH, OD, DBO, SDT, Tur, CF, NO3, PO	Agregación: Promedio ponderado (aritmético o geométrico). Para agua	(Brown et al., 1970)
ICAA	$ICAA = \sum_{i=1}^9 (Subi * wi)$	DBO, SDT, NTU, CF, pH, NO3, T°C OD, PO4-	Agregación del producto ponderado. Para agua.	(Samboni Ruiz et al., 2007)
ICA Nueva Zelanda*	$ICAg = \sum_{i=1}^9 qi fi$	CF, Ecoli, pH, color, Tur, SST, DBO, PO4 nitrógeno inorgánico disuelto.	promedio	(Nagels et al., 2001)
ICAMPFF	$ICAMPFF = \left(\prod_{i=1}^n Xi^{wi} \right) \frac{1}{\sum iwi}$	Ph, OD, SST, NO3, PO4, DBO, HAT, CTT	Agregación: Promedio aritmético ponderado. Para agua de mar	(Vivas Aguas & Navarrete Ramírez, 2014)

(Nguyen et al., 2013). Para el $ICAM_{PA}$ se tuvo en cuenta la relación entre parámetros y las características del agua marina para los usos de pesca y acuicultura en Perú Decreto Supremo N° 004 (MINAM, 2017), considerando los posibles cambios de condiciones de tiempo y espacio que teóricamente se pueden presentar en el ambiente (Calvo-Brenes, 2013; Singh & Saxena, 2018; Sutadian et al., 2017), sin embargo, se asumió que en el índice todos los parámetros tienen el mismo peso relativo como valor de importancia de 0,1 y la suma de los pesos de todos los parámetros es igual a uno (1,0).

2.1.3. Transformación de parámetros en subíndices

De acuerdo con las cinco categorías ya definidas para el índice (Tabla 1), se transformaron las concentraciones de los parámetros a una escala común adimensional de 0 a 100, teniendo en cuenta que los valores se expresan en diferentes unidades (mg/L, NMP/100 mL, etc.), además tienen diferentes comportamientos en el ambiente, por ejemplo, el oxígeno disuelto puede oscilar de 0 a 10 mg/L, mientras que los sólidos suspendidos totales pueden variar entre 0 a 100 mg/L o más.

Para determinar los rangos de calidad de cada parámetro en las cinco categorías, se hizo el análisis estadístico descriptivo de las concentraciones de cada uno de los parámetros, utilizando los datos disponibles del muestreo en la bahía de Supe, se clasificaron considerando los estándares de calidad de la normativa peruana Decreto Supremo N° 004 (MINAM, 2017) en algunos parámetros se tuvo en cuenta las curvas documentadas en la literatura. Luego, se definieron las funciones matemáticas de los parámetros seleccionados para integrar el $ICAM_{PA}$ utilizando las curvas de mejor ajuste del programa de cómputo Table Curve 2D, para su transformación en los subíndices.

En el caso de curvas basadas en ecuaciones matemáticas: fórmula matemática con series de datos. Los subíndices son las ecuaciones para transformar las concentraciones a escala adimensional de 0-100. Para la determinación de los pesos relativos de cada parámetro, se asignaron pesos específicos a cada parámetro según su

nivel de importancia dentro del conjunto agregado. Aquí el rango corresponde a lo que cada parámetro indica con su concentración y presencia de afectación o condición buena o mala del agua para el uso que se está evaluado importancia del parámetro sobre el riesgo. los pesos suman 1.

2.1.4 Selección de fórmula de agregación

Se seleccionó la fórmula de promedio geométrico ponderado (Ecuación 1) muy utilizada en estudios anteriores (ICA Brown et al., 1970; ICA Dinius, 1987; ICAMPFF Vivas Aguas & Navarrete Ramírez, 2014), donde mostró una mayor sensibilidad a los cambios generados por los parámetros, que al aplicar este modelo los resultados de calidad del agua obtenidos corresponden a las condiciones de calidad observadas en los cuerpos de agua (Calvo-Brenes, 2019).

$$ICAM_{PA} = \left(\prod_{j=1}^m q_j^{w_j} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^m w_j}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde,

i = parámetros que integran el índice y que toma valores entre 1 y n

m = cantidad de variables

q_j = valor del subíndice de calidad de cada parámetro j

w_j = factor de ponderación (peso) de cada subíndice por parámetro j

Las escalas de calidad permitieron definir el valor obtenido del índice integrado por la fórmula de agregación y son la base para transformar en un dato cualitativo, la calidad del cuerpo de agua evaluado (Torres et al., 2009) antes de construir las ecuaciones de las curvas de calidad de los subíndices. Para el $ICAM_{PA}$ se utilizó la escala de clasificación de Vivas Aguas & Navarrete Ramírez (2014), que define cinco categorías para valorar las características

Tabla 2. Escala de calidad, categorías y descripción de la valoración del índice de calidad de aguas marinas y costeras ICAM_{PA}

Escala de calidad	Color	Categorías	Descripción
Óptimo	Azul	100-90	Calidad excelente del agua
Adecuada	Verde	90-70	Agua con buenas condiciones para la vida acuática
Aceptable	Amarillo	70-50	Agua que conserva buenas condiciones y pocas restricciones de uso
Inadecuada	Naranja	50-25	Agua que presenta muchas restricciones de uso
Pésima	Rojo	25-0	Agua con muchas restricciones que no permiten un uso adecuado

Tomado de (Vivas Aguas & Navarrete Ramírez, 2014)

del agua marina entre óptima, adecuada, aceptable, inadecuada y pésima, con un rango entre 0 y 100 (Tabla 2).

2.2. Aplicación del ICAM_{PA} en la evaluación de aguas marinas en zonas costeras del Perú

Para la validación el ICAM_{PE} se utilizó la bahía de Supe en la zona central de Perú, ubicada entre 10° 50' - 10° 38' S y 77° 54' - 77° 42' W donde se recolectaron muestras de agua en superficie y fondo en 15 estaciones de monitoreo distribuidas en esta área (Figura 1), que se caracteriza por presentar condiciones oceanográficas con influencia de aguas costeras frías de la corriente de Humboldt, que proporcionan buenas condiciones para el desarrollo de la pesca artesanal (Baldeón, 2000; INEI, 2016).

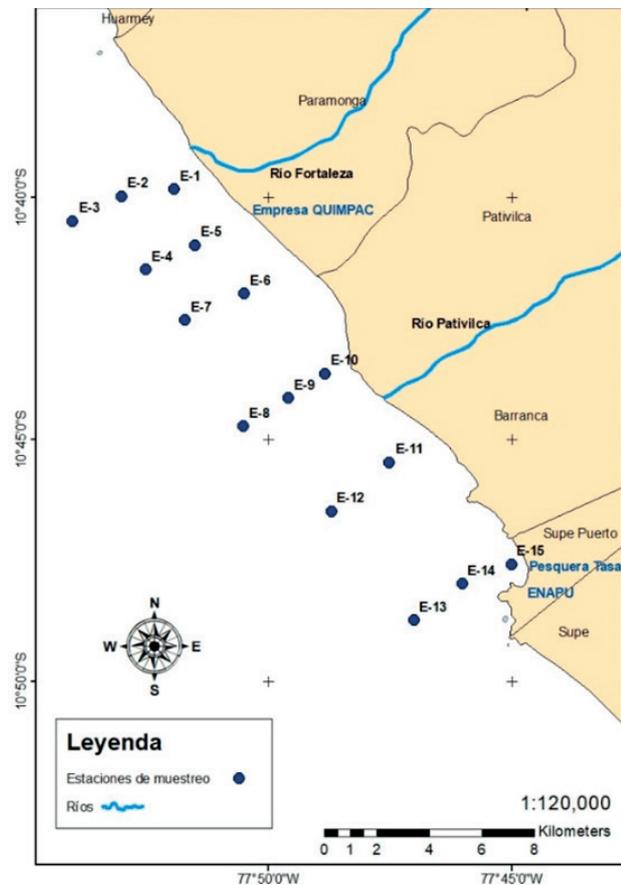


Figura 1. Área de estudio con la distribución de estaciones de muestreo en la bahía de Supe, Perú.

2.2.1 Análisis de datos

Con los resultados del cálculo del ICAM_{PA} para el año 2008 se elaboraron mapas de visualización geográfica en la bahía de Supe zona central del Perú. Se les aplicó la prueba no paramétrica Kruskal - Wallis para evaluar las diferencias entre estaciones y profundidades. La variación espacial se representó utilizando el programa ArcGIS Versión 10.3, para interpolar los resultados del ICAM_{PA} en una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada (IDW), las estaciones de monitoreo en la bahía de Supe para generar la capa vectorial, de acuerdo a la clasificación de los rangos de calidad y colores del índice, de manera que permitió identificar gráfica y espacialmente las áreas de mayor afectación de la calidad del agua.

III. RESULTADOS

3.1 Formulación del ICAM_{PA}

De acuerdo a los criterios de selección utilizados para el desarrollo del ICAM_{PA} se utilizaron diez parámetros clasificados por características fisicoquímicas (pH, sólidos suspendidos totales), indicadores de estado trófico (sulfuros, nitratos, fosfatos) oxigenación (oxígeno disuelto y DBO₅) y contaminantes orgánicos (aceites y grasas e hidrocarburos de petróleo disueltos y dispersos), que aportan información en la comprensión de la calidad del agua marina para los usos de pesca y acuicultura.

3.1.1 Sub-índices

Los subíndices se construyeron con curvas de calidad para transformar los parámetros, de acuerdo con las escalas de clasificación para aguas marinas de Perú, considerando criterios para los usos de pesca y maricultura (Tabla 3). El valor del subíndice se calculó con las ecuaciones matemáticas (Tabla 4) de las curvas de calidad (Figura 2). En consecuencia, si la concentración de un parámetro está en el rango del valor establecido en la categoría óptima, el subíndice será "100".

3.1.2 Función de agregación

En este estudio se utilizó la función de agregación de la media geométrica ponderada como una de las funciones más ampliamente utilizadas para desarrollar WQI en todo el mundo, la cual es sensible a los pequeños cambios en la calidad del agua. A continuación, se presenta la ecuación

Tabla 3. Clasificación para los subíndices (qj) de calidad de cada parámetro del ICAM_{PA} para los usos de pesca y maricultura

Escala	Subíndice (qj)	pH	OD (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	CTE (NMP/100mL)	AYG (mg/L)	SULF (mg/L)	NO ₃ ⁻ (µg/L)	PO ₄ ³ (µg/L)	HPDD (mg/L)
Óptimo	90-100	7,8 - 8,5	7,0 - 8,5	0 -10	<2	<2	0,34	0 - 0,06	0 - 15	0 - 10	0,0060
Adecuada	70-90	7,4 - 7,8	6,0 - 7,0	10 - 25	2,0 - 4,0	14	0,67	0,06 - 0,065	15-30	10-20	0,0065
Aceptable	70-50	7,0 - 7,4	4,0 - 6,0	25 - 50	4,0 - 6,0	30	1,00	0,065 - 0,07	30-40	20-50	0,0070
Inadecuada	50-25	5,0 - 7,0	2,0 - 4,0	50 - 80	6,0 - 8,0	200	1,33	0,07 - 0,1	40-70	50-80	0,0100
Pésima	0-25	4,5 - 5,0	0,0 - 2,0	>100	>8,0	1000	1,66	>0,1	> 70	>80	0.1

Tabla 4. Ecuaciones matemáticas para determinar los subíndices de los parámetros del ICAM_{PA}

Parámetro	Función de Subíndice (qj)
pH	$Ln Q_{pH} = -0,0046(pH)^6 + 0,6046b(pH)^5 + -16,787(pH)^4 + 197,04(pH)^3 + -1126,5(pH)^2 + 3085,4(pH) + -3222,7$ R ² = 0,9762
Oxígeno Disuelto	$Q_{OD} = 0,0025(OD)^6 + -0,0718(OD)^5 + 0,7505(OD)^4 + -3,6881(OD)^3 + 9,4112(OD)^2 + 0,5998(OD) + 0,3385$ R ² = 0,9762
Sólidos Suspendedos Totales	$Q_{SST} = 1E-10(SST)^5 + 8E-08(SST)^4 + -5E-05(SST)^3 + 0,0102(SST)^2 + -1,207(SST) + 98,827$ R ² = 0,998
DBO ₅	$Ln Q_{DBO} = -0,0252(DBO)^5 + -0,1176(DBO)^4 + 4,7091(DBO)^3 + -22,767(DBO)^2 + 6,0583(DBO) + 99,403$ R ² = 0,9997
Coliformes termotolerantes	$Q_{CTE} = 5E-18(CTE)^6 + -5E-14(CTE)^5 + 2E-10(CTE)^4 + -5E-07(CTE)^3 + 0,0005(CTE)^2 + -0,3119(CTE) + 102,48$ R ² = 0,999
Aceites y Grasas	$Q_{AYG} = 4,6055 + 0,1369 (AYG) + -1,9241(AYG)^2 + 2,0663(AYG)^3 + -0,9878(AYG)^4$ R ² = 0,999
Fosfatos	$Q_{PO4} = -1E-09(PO4)^6 + 3E-07(PO4)^5 + -5E-05(PO4)^4 + 0,0038(PO4)^3 + -0,11520(PO4)^2 + -0,2198(PO4) + 100,81$ R ² = 0,9998
Nitratos	$Q_{NO3} = 4E-09(NO3)^6 + 1E-06(NO3)^5 + 8,00E-05(NO3)^4 + -0,0019(NO3)^3 + -0,0216(NO3)^2 + -0,2553(NO3) + 100,1$ R ² = 0,9998
Sulfuros	$Q_{SULF} = (1,0012E+02 + 2,7066E+3 (SULF) + 2,6588E+04(SULF)^2 + -1,0620E+05(SULF)^3 + 1,9087E+05 (SULF)^4 + -1,2663E+05 (SULF)^5) / (1 + -2,5198E+01(SULF) + 1,8647E+02(SULF)^2 + 9,2288E+01(SULF)^3 + -2,1897+03(SULF)^4 + 4,0659E+03(SULF)^5)$ R ² = 0,996
Hydrocarburos del Petróleo Disueltos y Dispersos	$Q_{HDD} = 0,0005(HDD)^5 + -0,015(HDD)^4 + 0,1386 (HDD)^3 + -0,0862(HDD)^2 + -10,33 (HDD) + 100,01$ R ² = 1,00

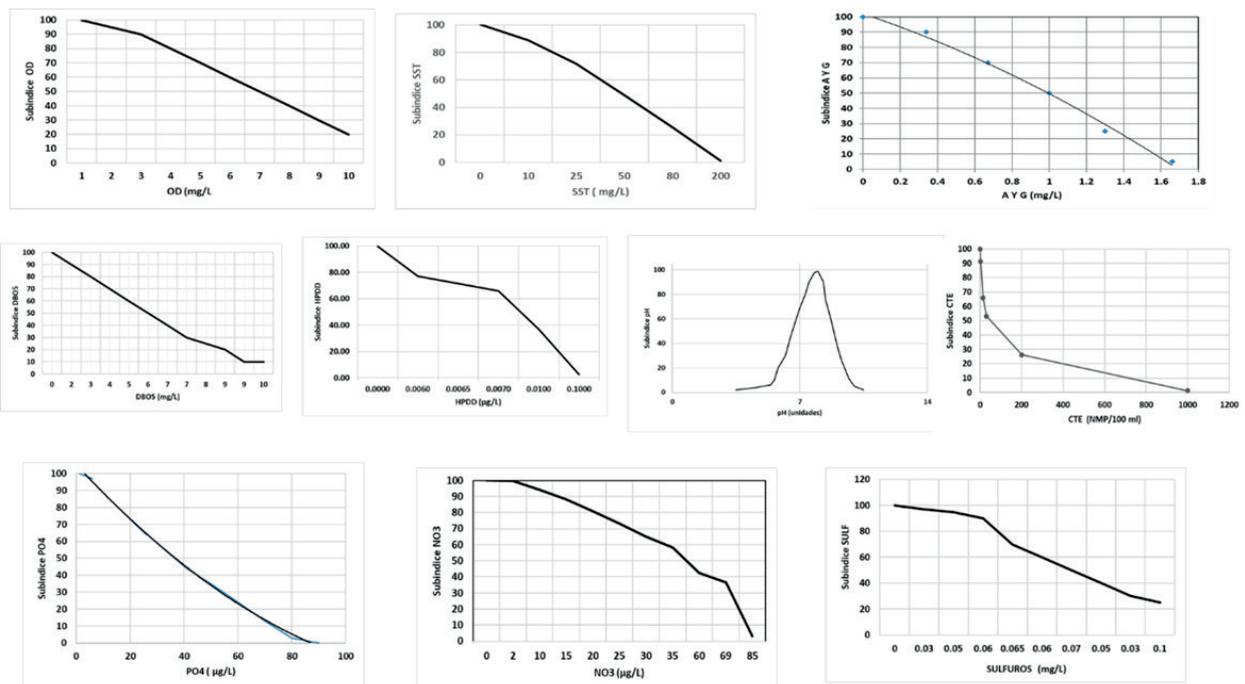


Figura 2. Curvas de calidad utilizados para la transformación de los parámetros en subíndices (qj) de calidad acuática para los usos de pesca y acuicultura para el ICAM_{PA}

organizada con los parámetros seleccionados para el ICAM_{PA} y sus ponderaciones:

$$ICAM_{PA} = [(Q_{OD})^{0,1} \times (Q_{pH})^{0,1} \times (Q_{SST})^{0,1} \times (Q_{DBO})^{0,1} \times (Q_{CTE})^{0,1} \times (Q_{HPDD})^{0,1} \times (Q_{NO3})^{0,1} \times (Q_{PO4})^{0,1} \times (Q_{SULF})^{0,1} \times (Q_{AYG})^{0,1}] / \sum_{j=1}^m W_j$$

3.2. Aplicación del ICAM_{PA} en la evaluación de la calidad del agua en la bahía de Supe

Los datos de monitoreo en 15 estaciones de la bahía Supe a nivel de superficie y fondo (Tabla 5), donde se presentan los resultados del ICAM_{PA} y la categoría por estación.

3.3. Análisis estadístico con el Índice de calidad de aguas marinas para los usos de pesca y maricultura-ICAM_{PA}

Los resultados del cálculo del ICAM_{PA} con los datos de 2008 mostraron que la calidad del agua en la bahía de Supe varió entre adecuada e inadecuadas características para el uso de pesca y maricultura, con valores que oscilaron entre 27,85 y 83,74, con un promedio de 65,55 ± 14.25. Sin diferencias significativas entre superficie y fondo (Kruskal Wallis p= 0,1013) ni entre estaciones de muestreo (Kruskal Wallis p= 0,6886). En superficie el ICAM_{PA} osciló entre 41,96 y 80,99 con un promedio de 70,10 ± 15,37, mientras que en fondo osciló entre 27,85 y 83,74 con un promedio de 62,59 ± 11,85 mostrando mejor calidad en superficie en comparación con el fondo de la bahía. En el análisis detallado de las concentraciones individuales

Tabla 5. Valores de concentración para cada parámetro medido en la bahía de Supe en el año 2008

Estación	Nivel	Prof. m	OD mg/L	pH	CTE NMP/100 mL	DBO mg/L	SST mg/L	SULF mg/L	AYG mg/L	HPDD mg/L	PO4 ug/L	NO3 ug/L	ICAM _{PA}	Categoría
E1	S	0,3	5,61	8,06	30	1,00	14,72		1,00		1,37	12,17	77,29	Adecuada
E2	S	0,3	5,34	8,04	30	1,00	134,37		0,50		1,03	10,93	58,52	Aceptable
E3	S	0,3	5,45	8,04	30	1,22	89,40		0,60	0,0011	0,88	12,36	67,87	Aceptable
E4	S	0,3	5,61	8,05	30	1,39	36,90			0,0008	1,37	10,64	80,99	Adecuada
E5	S	0,3	5,40	8,07	30	1,00	70,05	0,38	0,20	0,0001	0,98	9,41	59,91	Aceptable
E6	S	0,3	5,56	7,98	30	2,05	21,43	0,09	0,60	0,0002	1,03	9,47	74,88	Adecuada
E7	S	0,3	5,40	7,99	30	1,00	72,63		0,60	0,0001	1,27	9,65	74,72	Adecuada
E8	S	0,3	5,56	8,10	30	1,00	17,78	0,01	1,00		0,98	10,16	80,92	Adecuada
E9	S	0,3	6,14	8,16	40	1,00	53,30		0,60	0,0001	1,17	8,77	75,07	Adecuada
E10	S	0,3	5,07	8,13	2400	1,00	6,56		1,40	0,0004	2,15	8,82	41,96	Inadecuada
E11	S	0,3	5,56	7,95	240000	4,08	32,46		0,20	0,0002	1,42	8,24	52,04	Aceptable
E12	S	0,3	5,98	8,09	30	2,00	94,09		0,30	0,0002	2,40	8,30	71,25	Adecuada
E13	S	0,3	6,09	8,03	40	1,00	22,75	0,07	0,50	0,0001	1,12	8,54	80,80	Adecuada
E14	S	0,3	5,82	8,15			40,00		0,80	0,0022	1,22	10,05	80,64	Adecuada
E15	S	0,3	5,98	8,00			31,03	0,14	0,20	0,0005	1,56	8,26	74,61	Adecuada
E1	F	14,0	5,29	8,09			35,45	0,24			1,27	12,60	62,21	Aceptable
E2	F	17,0	4,75	8,03			17,26	0,19			1,47	10,71	67,67	Aceptable
E3	F	22,0	5,29	8,07			22,61	0,24			1,08	10,68	64,52	Aceptable
E4	F	18,0	4,27	8,00			28,65				0,93	8,56	83,32	Adecuada
E5	F	13,0	5,29	8,08			30,37				1,12	9,45	83,74	Adecuada
E6	F	13,0	5,40	8,02			86,67				1,08	9,49	67,00	Aceptable
E7	F	13,0	5,34	8,09			97,99	0,13			1,12	8,92	53,13	Aceptable
E8	F	18,0	5,29	8,11			108,47				1,03	10,12	58,72	Aceptable
E9	F	18,0	5,18	8,13			49,21	0,48			1,22	10,60	45,50	Inadecuada
E10	F	12,0	5,07	8,12			54,24	0,32			1,47	8,52	54,22	Aceptable
E11	F	12,0	5,98	8,60			32,04				1,22	8,76	79,18	Adecuada
E12	F	22,0	4,49	8,04			134,98	0,25			1,08	7,80	41,02	Inadecuada
E13	F	26,0	4,54	8,02			96,47				1,52	9,53	62,59	Aceptable
E14	F	21,0	4,49	8,09			35,92	0,19			1,42	9,17	64,42	Aceptable
E15	F	10,0	4,91	8,03			37,78				1,52	8,76	27,85	Inadecuada

S: superficie. F: fondo. OD: oxígeno disuelto, CTE: Coliformes termotolerantes; DBO: demanda bioquímica de oxígeno, SST: sólido suspendidos totales; SULF: sulfuros; AYG: aceites y grasas; HPDD; hidrocarburos disueltos y dispersos; PO₄³⁻: fosfatos; NO₃⁻: nitratos.

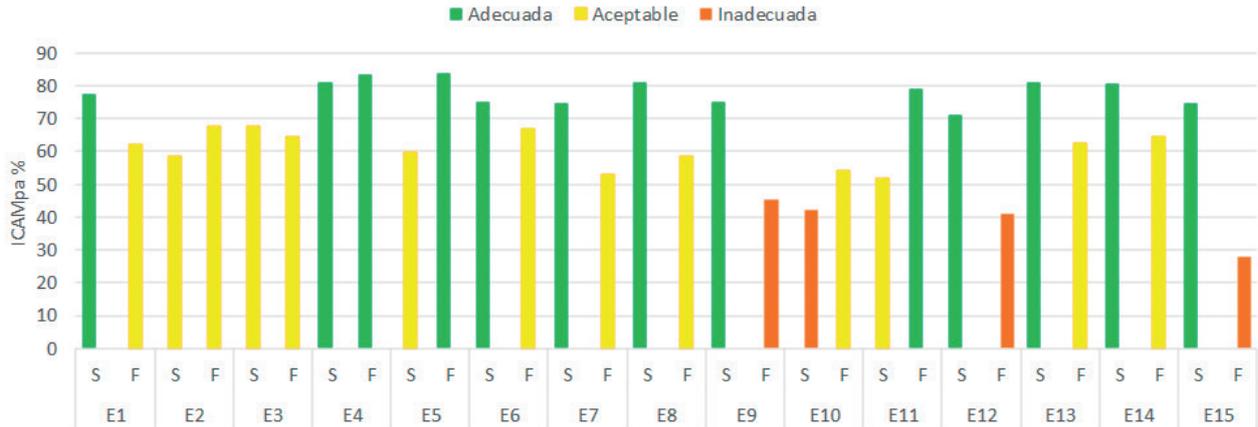


Figura 3. Clasificación de la calidad del agua en la bahía de Supe en el año 2008, estimada con el ICAM_{PA}

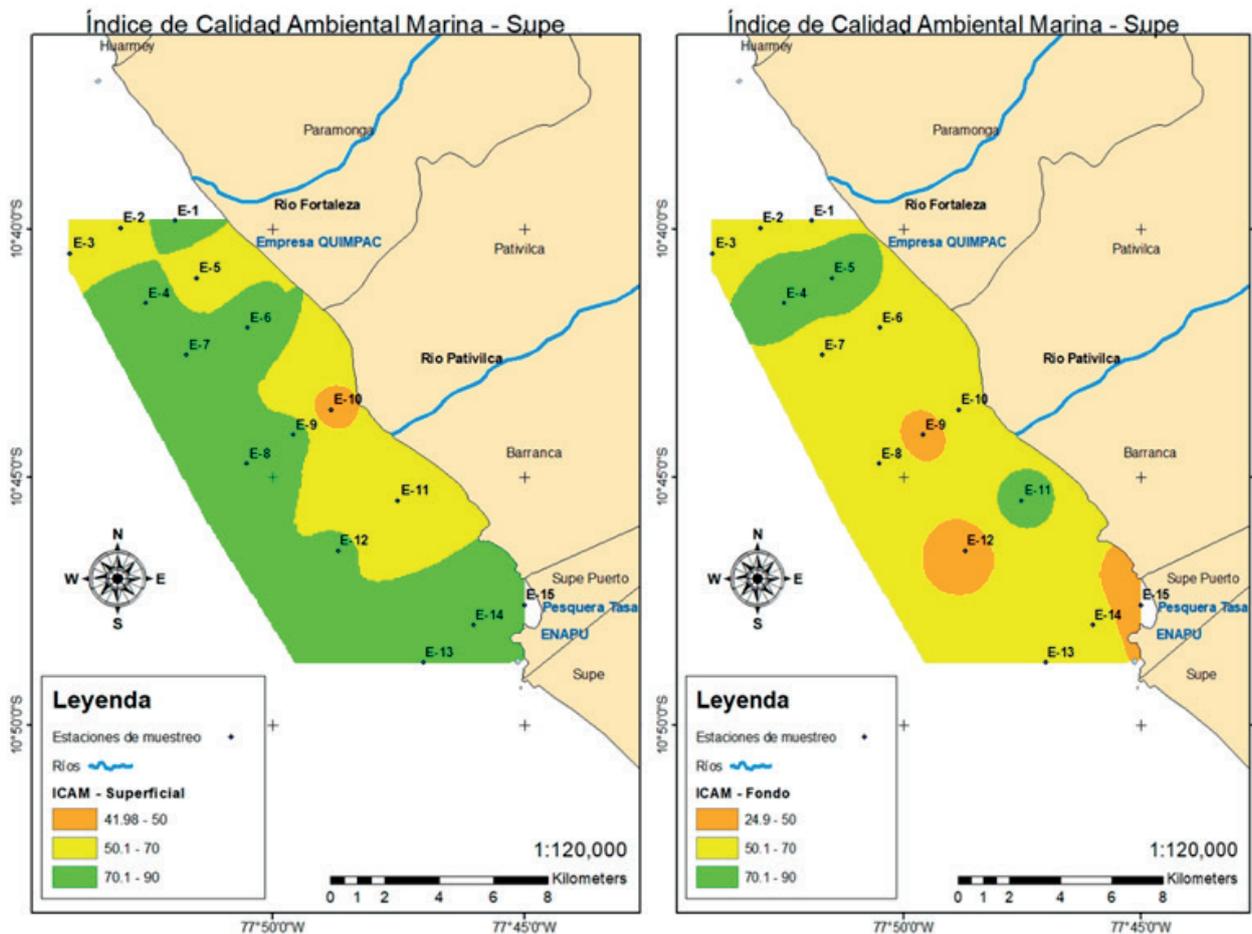


Figura 4. Distribución horizontal de las categorías de calidad del agua según el ICAM_{PA} en la bahía de Supe en el 2008 a) superficie y b) fondo.

de los parámetros (Figura 3), se ha observado un foco de contaminación en las estaciones más costeras E-9 y E10, ubicada en la bocana del río Pativilca, presentó elevados valores de sólidos suspendidos totales y concentraciones altas de coliformes termotolerantes y nitratos, asociado a la presencia de las plantas pesqueras en la zona sur (E-15) que sobrepasaron el límite permisible ECA establecido en Perú (DS-004-MINAM, 2017).

En la variación espacial del ICAM_{PA} (Figura 4) se observa que, a nivel de superficie, se identifican dos zonas: una comprendida entre los ríos Pativilca y Fortaleza (4a), que presenta una calidad de agua con buenas condiciones para la vida acuática; y otra, en la zona centro hacia el sur, en el puerto de Supe, que presentó una calidad de agua que conserva buenas condiciones con pocas restricciones.

A nivel de fondo, se observó que el ICAM_{PA} permitió diferenciar tres zonas: una, ubicada hacia el norte, frente al río Fortaleza, con calidad de agua (4b) en buenas condiciones para la vida acuática; la segunda, que abarca una gran extensión de área en el fondo, con calidad de agua que conserva buenas condiciones con pocas restricciones; y, la tercera, en la zona sur a dos millas frente a las plantas pesqueras y al puerto de Supe (E-14 y E15), que muestra una calidad que presenta muchas restricciones de uso.

IV. DISCUSIÓN

Los parámetros seleccionados son importantes porque caracterizan al ecosistema marino en condiciones normales de la central de la costa marina que es un área de afloramiento rica en nutrientes con una alta productividad primaria que sustenta la pesquería peruana y está sujeta a la variabilidad climática como el Niño y La Niña (Calienes, 2014). La mayor parte de sus datos tienen valores diferentes a nivel superficie y fondo, porque presentaron dispersiones diferentes; es decir, la distribución de los valores del índice es asimétrica negativa, esto indica que los índices a nivel de superficie y de fondo en la bahía son diferentes. Esto se debe a la alta variabilidad de los datos debido a las presiones sobre el ecosistema marino de la bahía por la actividad como la ocurrencia pesquera industrial (época de veda y pesca) y los procesos naturales mencionados.

Los índices de calidad acuática marina no son generales ni aplicables a todas las áreas geográficas por igual, debido a la variabilidad de sus condiciones ambientales y por los diferentes usos que tienen. Esta variabilidad en el comportamiento de las variables en ambientes marinos costeros ha sido observada en aguas costeras por otros autores (Miravet et al., 2009). Durante el periodo evaluado, los valores de coliformes termotolerantes DBO₅, sólidos suspendidos totales y sulfuros sobrepasaron los estándares de calidad de agua establecidos en la normativa peruana, asociados a la época de actividad industrial pesquera en la bahía de Supe, de manera similar a las observado en el periodo 2009 al 2013 en los monitoreos de la calidad del agua Marina del IMARPE. (comm.pers Orozco, 2014)

Con los resultados gráficos obtenidos del ICAM_{PA} en la bahía de Supe, se pueden identificar las áreas de mayor impacto, así como las causas y las fuentes de contaminación en esta zona. Según INVEMAR (2002), con los valores obtenidos del índice se pueden proponer medidas alternativas de monitoreo, seguimiento, evaluación y aplicación para el manejo del estado de contaminación de las áreas afectadas. Esto, con base en la distribución espacial del ICAM_{PA}, que permite identificar zonas homogéneas en la bahía de Supe como áreas que poseen una calidad de agua aceptable y conservan buenas condiciones con pocas restricciones, tanto a nivel superficial y de fondo, que pueden ser clasificadas como comparativamente similares, pero que se diferencian con respecto al valor promedio del índice.

V. CONCLUSIONES

- En la construcción un índice numérico integrado de calidad de agua de mar para los usos de pesca y maricultura en la zona costera central del Perú (ICAM_{PA}), se utilizaron 10 parámetros de calidad de las aguas en la bahía de Supe: pH, oxígeno disuelto, DBO₅, nitratos, fosfatos, sólidos totales suspendidos, sulfuros, aceites y grasas, coliformes termotolerantes e hidrocarburos de petróleo. Esta metodología empleada permite integrar una gran cantidad de datos para la construcción de los índices para la calidad acuática marina y costera.
- Los parámetros utilizados en la construcción del Índice permitieron identificar áreas con diferente grado contaminación en la bahía de Supe, la zona centro ubicada frente a la desembocadura del río Pativilca y la zona sur se encuentran afectadas por las plantas pesqueras industrial presentes en esta área costera.
- El ICAM_{PA} obtenido es estadísticamente significativo, que ha permitido realizar una adecuada evaluación de la calidad de agua marina costera para el uso de la pesca y la maricultura y puede ser aplicable a otras áreas costeras donde se desarrollan las actividades pesqueras industrial y la maricultura; de esta manera se constituye en una herramienta útil para la gestión y manejo sostenible de las zonas costeras.

VI. AGRADECIMIENTOS

Al Área funcional de Investigación Marino Costero del Instituto del Mar del Perú, por el apoyo profesional y técnico, al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis”(INVEMAR). En especial agradecemos el apoyo técnico de los investigadores de INVEMAR Leonardo Arias y Paola Obando.

VII. REFERENCIAS

- Alves, M. T. R., Teresa, F. B., & Nabout, J. C. (2014). A global scientific literature of research on water quality indices: trends, biases and future directions. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 26(3), 245–253. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2014000300004>
- Barokah, G. R., Ariyani, F., Siregar, T. H., & Bull, S. (2017). Comparison of Storet and Pollution Index Method to Assess the Environmental Pollution Status: A Case Study from Lampung Bay, Indonesia. *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology. Mar. and Fish. Postharvest and Biotech*, 12(2), 67–74. <https://doi.org/10.15578/squalen.v12i2.287>
- Brown, R. M. ; McClelland, N. ; Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). *A Water Quality Index - Do We Dare?*. <https://es.scribd.com/document/389699238/A-Water-Quality-Index-Do-we-dare-BROWN-R-M-1970>

- Calienes, R. (2014). Producción primaria en el ambiente marino en el Pacífico sudeste, Perú, 1960-2000. *Boletín Instituto Del Mar Del Perú*, 29(1-2), 306-306. <https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/108>
- Calvo-Brenes, G. (2013). Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(2), ág. 9-19. <https://doi.org/10.18845/TM.V26I2.1399>
- Calvo-Brenes, G. (2019). Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 32, ág. 104-115. <https://doi.org/10.18845/TM.V32I4.4796>
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., Díaz, D., Citar, C., Castro, M., Almada, J., Ferrer, J., & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 111-124. <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- Dinius, S. H. (1987). Design of a water quality index. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(5), 833-843. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x>
- Giannuzzo, A. N. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientiae Studia*, 8(1), 129-156. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662010000100006>
- Jawad Alobaidy, A. H. M., Abid, H. S., & Maulood, B. K. (2010). Application of Water Quality Index for Assessment of Dokan Lake Ecosystem, Kurdistan Region, Iraq. *Journal of Water Resource and Protection*, 2010(09), 792-798. <https://doi.org/10.4236/JWARP.2010.29093>
- INVEMAR. (2002). *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia*. http://www.inveamar.org.co/redcoastera1/inveamar/docs/EAMC_2001/ier2001.pdf
- Jacinto Tayco, M. E., Chávez, J., Morón, A. O., Sánchez Ramírez, S., & Solís Acosta, J. (1997). *Evaluación de la calidad del medio marino en bahía Supe - Paramonga*. Instituto Del Mar Del Perú. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/PE_79b7c0dc73cc02648f2b00bf83dd4d7a
- León-Vizcaíno, L. F. (2014). Índices de Calidad del Agua (ICA), Forma de Estimarlos y Aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala, México. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 1-7. <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6147/1/ICA%20Forma%20de%20estimarlos.pdf>
- Liou, S. M., Lo, S. L., & Wang, S. H. (2004). A Generalized Water Quality Index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment* 2004 96:1, 96(1), 35-52. <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.A1>
- MINAM. (2016). *Perú 2030 la visión del Perú que queremos*. Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo (PNUD). <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Peru-2030-la-vision-C3%B3n-del-Per%C3%BA-que-queremos.pdf>
- MINAM. (2017, June 7). *Decreto Supremo N° 004-2017. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Diario El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Miravet, M. E., Ramírez, O., Montalvo, J., Delgado, Y., & Perigó, E. (2009). Índice numérico cualitativo para medir la calidad de las aguas costeras cubanas de uso recreativo. *AquaDocs. Repository of the UNESCO/IOC International Oceanographic Data and Information Exchange (IODE)*, 5. <https://aquadocs.org/handle/1834/3395>
- Nagels, J. W., Davies-Colley, R. J., & Smith, D. G. (2001). A water quality index for contact recreation in New Zealand. *Water Science & Technology*, 43(5), 285-292. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2001.0307>
- Nguyen, N. T. T., Loan, D. K., & Hoi, N. C. (2013). Development of Water Quality Index for Coastal Zone and Application in the Hạ Long Bay | VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 29(4), 43-52. <https://js.vnu.edu.vn/EES/article/view/1119>
- Paredes Arquiola, J. (2008). Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. In *Riuet*. <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/1895>
- Samboni Ruiz, C., Eugenia, N., Escobar, C., & Carlos, J. (2007). Ingeniería e Investigación. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64327320>
- Singh, P., & Saxena, S. (2018). Towards developing a river health index. *Ecological Indicators*, 85, 999-1011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.059>
- SINIA. (2016). *Anuario de Estadísticas Ambientales*. Sistema Nacional de Información Ambiental. Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/anuario-estadisticas-ambientales-2016>
- Standard Methods. (2005a). *2540 Solids suspended or dissolved*. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.030>
- Standard Methods. (2005b). *5520 Oil and Grease*. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/smww.2882.107>
- Standard Methods. (2012). *Cuantificación de bacterias del grupo coliformes, la metodología de tubos múltiples*. Standard Methods for Examination of Water and Waste Water. <https://www.standardmethods.org/doi/pdf/10.2105/SMWW.2882.180>
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2017). Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators*, 75, 220-233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.043>
- Torres, P., Hernán, C., Paola, C., & Patiño, J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15 Sup. 1), 79-94. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/59>
- Tyson, J. M., & House, M. A. (1989). The Application of a Water Quality Index to River Management. *Water Science &*

Technology, 21(10–11), 1149–1159. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.1989.0315>

Vivas Aguas, L. J., & Navarrete Ramírez, S. M. (2014). Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPFF). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). *Aqua Docs. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR; GEF; PNUD*, 1–32. <https://aquadocs.org/handle/1834/6650>

Contribución de autoría:

Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Redacción – borrador original: Rita Orozco Moreyra, Lizbeth-Janet Vivas-Aguas,

Supervisión, Validación, Visualización, Redacción – revisión y edición: Alejandro Alcántara Boza