

Calidad de aguas marino-costeras del Caribe colombiano en época seca

Sea water quality in the colombian Caribbean during dry season

Fecha de recepción: 2013-10-01 / Fecha de aceptación: 2013-11-01

Diana María Quintana Saavedra ¹ y Andrea Santa Ríos²

¹ **Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH)**. Barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia. Tel: +57(5) 669 44 65. Correo electrónico: diana.quintana@dimar.mil.co

² **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California**. Ensenada, México. Correo electrónico: _asanta@cicese.mx

Quintana Saavedra, D.M. y Santa Ríos, A. 2013. Calidad de aguas marino-costeras del Caribe colombiano en época seca. Bol. Cient. CIOH (31): 29-48

RESUMEN

Se llevó a cabo un análisis de la calidad del agua en diez estaciones de los tres principales puertos del Caribe colombiano (Bahía Portete, Bahía de Cartagena y el Golfo de Morrosquillo), durante marzo y abril del 2013, a tres profundidades diferentes (superficie, medio y fondo). Se midieron los componentes microbiológicos y fisicoquímicos necesarios para definir el estado general de la calidad del agua de cada una de las bahías, utilizando como herramienta el índice de calidad (expresado en porcentaje) National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). De acuerdo con este índice, se encontraron diferencias en la calidad del agua entre los puertos. En Bahía Portete el NSFWQI=92,0 %, indicando que el agua de este puerto es de excelente calidad. Sin embargo, la calidad del agua de la Bahía de Cartagena (NSFWQI=66,5 %) y el Golfo de Morrosquillo (NSFWQI=65,3 %), sugieren una calidad media. Diferencias aparentes entre las concentraciones de nutrientes (principalmente, nitratos y fosfatos) y oxígeno disuelto (OD) de las bahías, sugieren que el puerto de Bahía Portete presenta mayores concentraciones de oxígeno, lo que promueve el alto porcentaje en el NSFWQI. Por otro lado, las aguas con mayor contenido de nutrientes fueron las de Bahía de Cartagena y Golfo de Morrosquillo, posiblemente debido a fuentes antropogénicas y naturales que ingresan nutrientes, quizá a través de ríos hacia las bahías, clasificándolas como aguas de calidad media.

PALABRAS CLAVE: índice de calidad, parámetros microbiológicos, parámetros fisicoquímicos.

ABSTRACT

An analysis was carried to determinate the water quality in 10 stations of the three main ports of the Colombian Caribbean, Portete Bay, Cartagena Bay and the Gulf de Morrosquillo; during the months of March and April of 2013, at three different depths (surface, middle and bottom). The components microbiological and physicochemical were measured to define the general condition of the water quality of each of the bays, using as a tool the quality index (expressed as a percentage) National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). According to this index, there were differences in the quality of the water between the ports. In the Portete Bay NSFWQI index = 92.0 %, indicating that the water of this port is of excellent quality. However, the quality of the water of the Cartagena Bay (NSFWQI = 66.5 %) and the Gulf of Morrosquillo (NSFWQI = 65.3 %), suggests an average quality. Apparent differences between the concentrations of nutrients (mainly nitrates and phosphates) and dissolved oxygen of the bays, suggest that the port of Portete Bay, presents greater concentrations of oxygen, which promotes high percentage in the NSFWQI. On the other hand, the waters with a higher content of nutrients were those of Cartagena Bay and the Gulf of Morrosquillo, possibly due to anthropogenic sources and natural nutrients that enter, perhaps through rivers, bays, classifying them as waters of average quality.

KEY WORDS: quality index, microbiological parameters, physicochemical parameters.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito mundial los océanos y espacios costeros son afectados por la introducción de sustancias contaminantes, siendo las más importantes: compuestos tóxicos (pesticidas, fertilizantes y metales), hidrocarburos, aguas residuales domésticas e industriales (materia orgánica, sólidos en suspensión y nutrientes), materiales radioactivos, lixiviados, microorganismos (patógenos) y residuos sólidos. Esta dinámica ha estado marcada por las distintas actividades que realizan las poblaciones que habitan en cercanías al cuerpo de agua, o por actividades que se realicen en la cuenca alta, media y baja de los ríos que desembocan en ellos [1], haciendo que se generen zonas puntuales donde las concentraciones de contaminantes superan niveles significativos [2].

Los ecosistemas marinos o estuarinos han sido evaluados conforme a los diferentes niveles de contaminación, de esta búsqueda se ha desprendido la necesidad de establecer el destino de su uso, asociado con la medición de diferentes indicadores. Es así que la medición de diferentes parámetros permite que se realice su clasificación con base en cinco orientaciones principales según [3].

- Índices públicos: los cuales no tienen en cuenta el consumo del agua sino el riesgo que implican para el contacto primario o secundario, tales como el NSFQI [4, 5] o el *Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCMEWQI)* [6].

- Índices de consumo: la clasificación del agua se realiza con base en el tipo y aplicación de consumo de agua (bebida, industrial, preservación eco-sistémica, entre otros), el más conocido es el índice de *Oregon y British Columbia (OWQI)* [7].

- Índices estadísticos: se emplean en para dar respuesta a problemas estadísticos.

- Índices de decisión: esta categoría es un instrumento para la toma de decisiones y planeación para proyectos que involucren la administración de la calidad del agua.

Para el caso específico de los índices públicos se encuentran basados en la comparación de diferentes parámetros de calidad del agua con respecto a la normatividad vigente y emiten un único valor. Es así que en Europa existen al-

rededor de 30 índices de calidad del agua [8, 9]; en Sudáfrica y Australia se han orientado índices para estuarios, en Centroamérica a su vez son empleados los propuestos por [10].

En Colombia se han usado diferentes índices de calidad ambiental, con el propósito de determinar la condición de los ecosistemas. Algunos de los índices se acoplan a los requerimientos o alcances de cada investigación y han sido modificados por diferentes autores y entidades de control ambiental para adaptarlos a las condiciones específicas de los ecosistemas hídricos. Es el caso del Índice de Contaminación por Mineralización (Icomi), el Índice de Contaminación por Materia Orgánica (Icomo), Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (Icosus), entre otros. Es así que [11] aplicaron el NSFQI como referencia para el cálculo de la calidad de la cuenca hidrográfica del río Aburrá, en Antioquia, debido a que este índice es más tolerante en su aplicación y cálculo.

Según [12], un índice de calidad contempla al menos una variable de nivel de oxígeno (OD, DBO₅, DQO), eutrofización (NO₂, NO₃, PO₄), aspectos de salud (coliformes totales y fecales), características físicas (temperatura, transparencia, sólidos totales), sustancias disueltas (cloruros, sulfatos, pH, conductividad). De lo anterior se puede desprender que en la mayoría de las ocasiones se haya querido involucrar en un solo índice procesos de diferente naturaleza como lo son: la oxidación-reducción, la mineralización, los sólidos suspendidos, los nutrientes fósforo y nitrógeno y el pH. Este último como la expresión más importante del sistema carbono-carbonato, por lo que mediciones como la alcalinidad y dureza son poco frecuentes, pese a su importancia.

Dentro de las variables que se encuentran contempladas por distintos índices públicos contemplan al menos un indicador de contaminación fecal que afecte la salud pública (coliformes totales, *Escherichia coli* y enterococos), y su asociación con respecto a la presencia de nutrientes y consumo de oxígeno. Se sabe que el comportamiento de las variables de contaminación fecal arroja diferentes resultados, si éstas se encuentran asociadas con descargas directas de aguas residuales domésticas [2].

A través de este documento se pretende definir las condiciones de calidad del agua

asociadas a la época seca en tres de los principales puertos del Caribe colombiano (Bahía de Cartagena, Bahía Portete y el Golfo de Morrosquillo), para los cuales se hizo una campaña de monitoreo en la cual se recolectó diferente información de los componentes fisicoquímico y microbiológico. La clasificación de cada puerto se hará empleando como herramienta el índice público de la Fundación Nacional de Sanidad de Estados Unidos, NSFQI (en español ICA), desarrollado por [13], la cual hace parte de la base de cálculo del índice de calidad que utiliza la Red Ambiental de Calidad Marina (RedCam) en Colombia, el cual no se utilizará en el presente estudio debido a que las mediciones hechas no contemplan las mismas metodologías o expresión de concentraciones de unidades (como es el caso de las concentraciones de *E.coli* expresadas en UFC/100mL).

En tal sentido, el NSFQI permite, bajo una escala común, establecer la calidad del agua a través de nueve parámetros (oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, temperatura, fosfatos, nitratos, demanda biológica de oxígeno, turbidez, sólidos suspendidos totales) con un factor de ponderación y un valor del dato en una escala del 0 al 100, a través de una ecuación que califica cada parámetro y lo pondera según su importancia ambiental, siendo 100 el valor óptimo de calidad (Ecuación 1). Según [14], en 1989 se llevó a cabo una revisión de diferentes formulaciones hechas a través de este índice para la agregación de los subíndices, se concluyó que el promedio aritmético ponderado modificado y la suma ponderada modificada proveen los mejores resultados para la indexación de la calidad general del agua.

ÁREA DE ESTUDIO

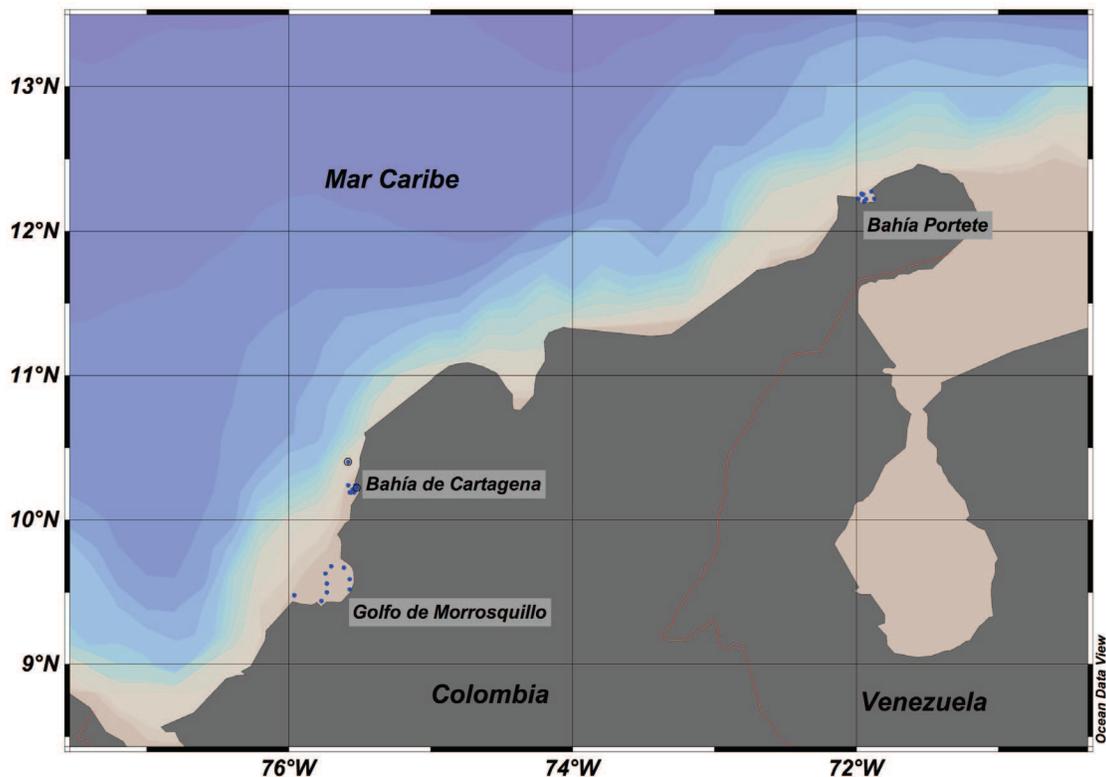


Figura 1. Puertos evaluados en el litoral Caribe colombiano.

Las campañas de monitoreo de calidad del agua se realizaron en tres de los principales puertos del Caribe colombiano, cada uno de ellos cuenta con diferentes dinámicas tanto en desarrollo económico, como en accidentes costeros, estos dos factores hacen que cada uno sea una unidad diferente en términos hidrodinámicos y de asimilación de contaminantes [14].

Bahía Portete es una de las bahías más grandes ubicada en el costado oriental de la península de La Guajira, entre los 12°14'N y 71°52'W (Figura 1). Presenta una superficie aproximada de 80 km² y una estrecha boca de comunicación con el mar. Dentro de este puerto se monitorearon las siguientes estaciones: Boya 5, Boya 9, Baliza, Boya 10, ANC (Área Norte Cuarentena), AC (Área de Cuarentena), AF (Área de Fondeo), CBP (Centro Bahía Portete) y PI (Punta Izhep) (Figura 2).

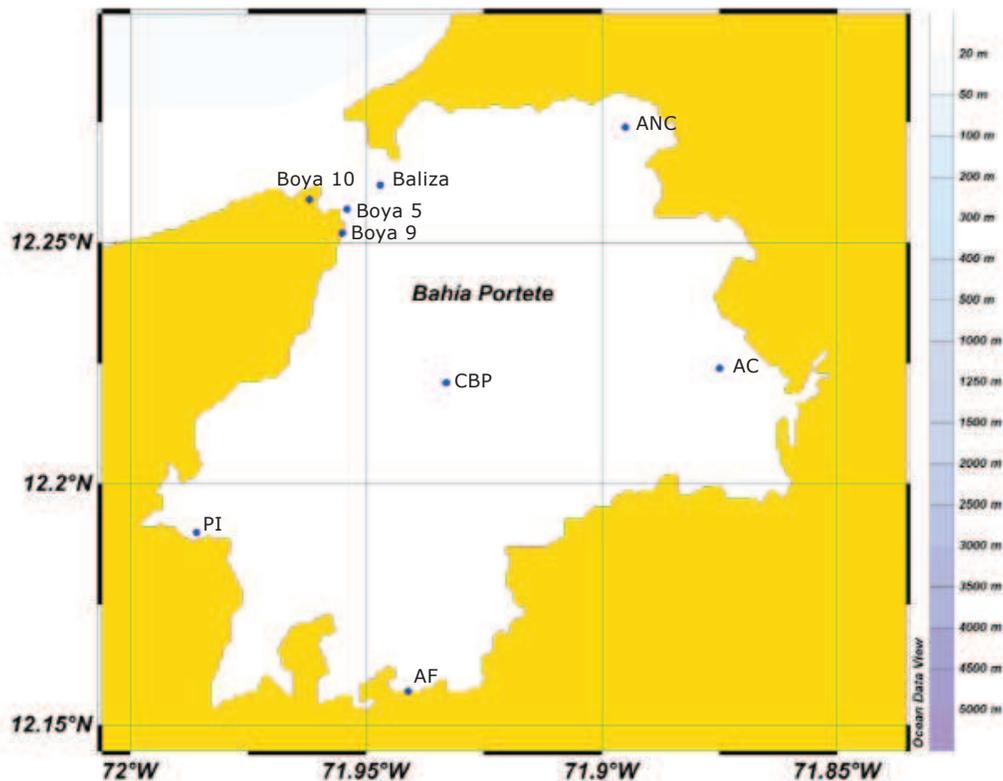


Figura 2. Estaciones de monitoreo Bahía Portete.

La Bahía de Cartagena se encuentra localizada en el departamento de Bolívar sobre el litoral noreste del Caribe colombiano, entre las latitudes 10°16'N y 10°26'N y las longitudes 75°36'W y 75°30'W (Figura 3). Está separada del Mar Caribe por la Isla de Tierrabomba, conformando una cuenca somera de ~82 km² de extensión, con profundidades promedio y máxima de 16 y 26 m, respec-

tivamente, que se comunica con el Mar Caribe a través de los canales de Bocagrande y Boca chica (Figura 3). Dentro de este puerto se monitorearon las estaciones: E2 (Escollera); B11 (Boya 11); B10 (Boya 10); B12 (Boya 12); B28 (Boya 28); CONT (Contecar); B30 (Boya 30); Emisario (Emisario Submarino); Bosque (Muelles El Bosque); SP (Sociedad Portuaria) (Figura 3).

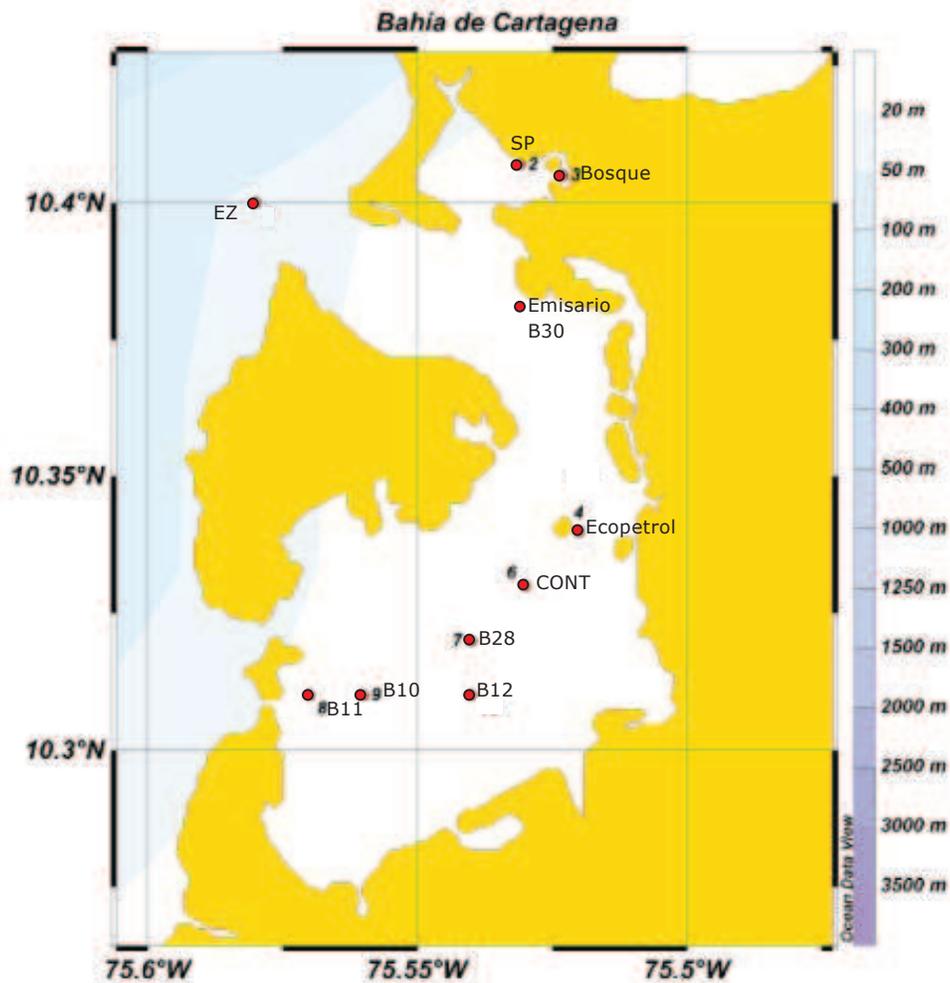


Figura 3. Estaciones de monitoreo Bahía de Cartagena.

El Golfo de Morrosquillo se encuentra ubicado en la zona noroccidental de Colombia, se extiende desde punta San Bernardo (09°42'4,746"N; 75°42'6,146"W), en el departamento de Sucre, hasta la bahía de Cispatá (09°24'19,068"N; 75°50'8,982"W), en el departamento de Córdoba (Figura 4). El golfo forma parte de un mosaico de ecosistemas continentales, costeros, insulares y marinos localizados dentro de la franja intertropical del mundo, con una extensión de línea de costa aproximada de 142 km, en dirección suroeste-

noreste, desde la Boca de Corea (río Sinú) hasta Punta San Bernardo [20]. En total el área alcanza los 2429 km², de los cuales 390 km² corresponde a la parte continental y 2039 km² a la parte marítima, respectivamente. Dentro de este puerto se monitorearon las siguientes: Golfo de Morrosquillo: BT (Boca Tinajones); BC (Bahía Cispatá); TLU1 (Terminal de Carga 1); GC (Golfo Centro); GN (Golfo Norte); PSB (Punta San Bernardo); DAC (Desembocadura Arroyo Cascajo); DAA (Desembocadura Arroyo alegría); Tolú (Tolú) (Figura 4).

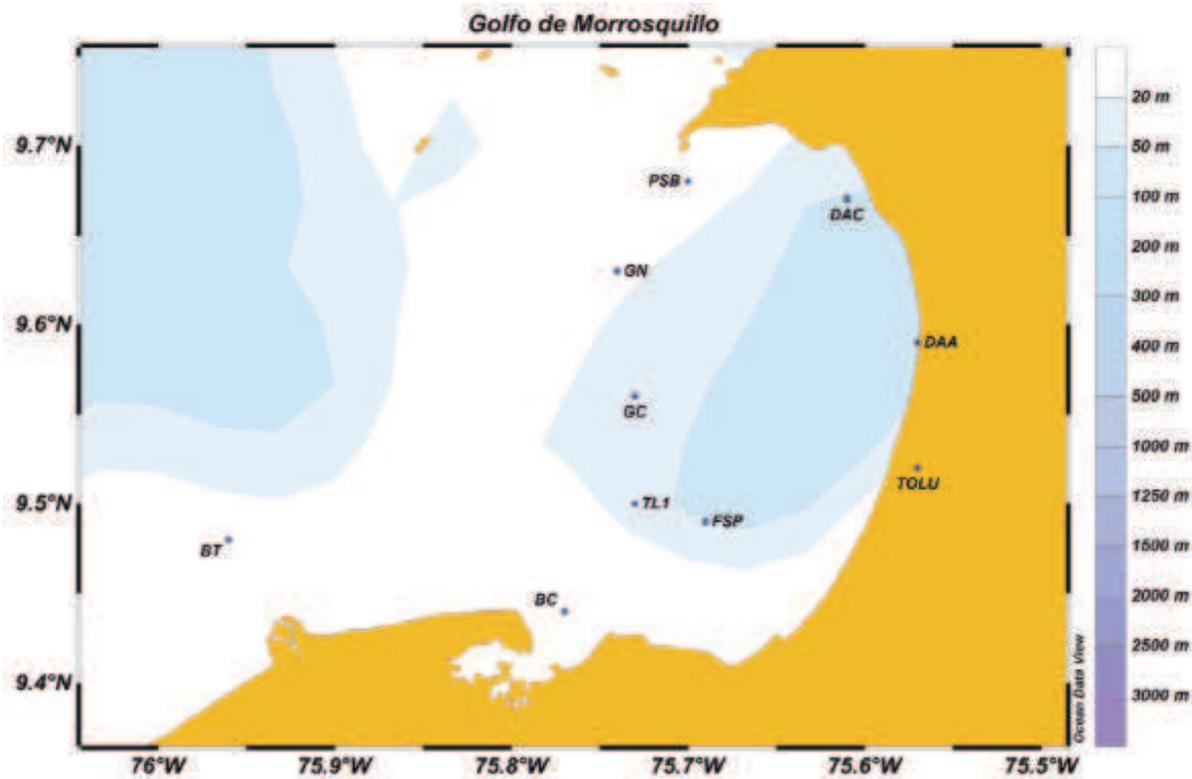


Figura 4. Estaciones de monitoreo Golfo de Morrosquillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase de campo

En el presente estudio se recolectó muestras en diez estaciones de tres puertos del Caribe colombiano: Bahía Portete, Bahía de Cartagena y Golfo de Morrosquillo, durante marzo y abril de 2013. Se tomaron datos *in situ* de temperatura ambiental, conductividad, temperatura del mar, oxígeno, transparencia y salinidad. Las muestras de agua se recolectaron a tres profundidades dentro de la columna de agua (superficie, medio y fondo), empleando una botella Niskin de 5 L. Las muestras se almacenaron y refrigeraron a 4°C para su posterior análisis en el laboratorio del CIOH.

Fase de laboratorio

Los métodos de análisis abarcaron el estado general de la calidad del agua en cada una de las zonas seleccionadas, incluyendo así el componente microbiológico y fisicoquímico.

El desarrollo de su análisis se realizó siguiendo los manuales de procedimientos técnicos del Laboratorio del CIOH, basados en métodos estandarizados para análisis de agua (APHA/AWWA/WEF) y articulados con la norma ISO 17025:2005.

Para coliformes totales y *Escherichia coli* se trabajó bajo la adaptación del Método SM9222A, cambiando el medio de cultivo por agar con sustrato cromogénico (Chromocult®). Todas las muestras se incubaron a $35 \pm 0,5^\circ\text{C}$ durante 24 horas (coliformes totales y *E. coli*) (Tabla I). Para la determinación de las características fisicoquímicas se emplearon los protocolos de [15, 16] cuya base metodológica para pH es potenciométrica; para los nutrientes amonio (NH_4), nitrato (NO_3), nitrito (NO_2), silicatos y fosfatos (PO_4) es espectrofotométrica; para sólidos suspendidos totales (SST) es gravimétrica; para oxígeno disuelto (OD) bajo el método de Winkler, y para salinidad empleando sonda paramétrica. La sumatoria de los compuestos nitrogenados se interpreta como nitrógeno inorgánico disuelto (NID).

Cálculo de índice de calidad del agua

Para determinar el índice de calidad del agua establecido por NSFQI se realizó un análisis descriptivo de los resultados encontrados para las variables de (OD), coliformes fecales (*E. coli*), pH, temperatura, fosfatos, nitratos, turbidez, SST. En el caso del parámetro demanda biológica de oxígeno (DBO₅) se trabajó con datos recolectados de RedCam, dado que este parámetro no fue contemplado en el proyecto.

Se calcularon los promedios aritméticos de las variables; los pesos temporales se generaron dividiendo la importancia de cada

parámetro sobre la valoración del peso de la variable de mayor importancia, es decir el OD, seguido de coliformes fecales, así los pesos individuales se dividen individualmente entre la suma de los pesos temporales (Tabla I) y se aplica la ecuación 1 para su cálculo.

$$NSFWQI = \frac{\sum Q\text{-valor} * \text{factor ponderal}}{\sum \text{factores ponderales}}$$

Donde,

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Q-value</i> | valor promedio del indicador |
| <i>factor ponderal</i> | valor asignado por el índice WQI |
| $\sum \text{factores ponderales}$ | sumatoria asignada como 1 |

Tabla I. Factor de índice de calidad y peso.

| Factor | Peso |
|------------------------------|------|
| Oxígeno disuelto | 0,17 |
| Coliformes fecales | 0,16 |
| pH | 0,11 |
| DBO ₅ | 0,11 |
| Desviación de la temperatura | 0,10 |
| Fosfatos | 0,10 |
| Nitratos | 0,10 |
| Turbidez | 0,08 |
| SST | 0,07 |

RESULTADOS

Con el fin de determinar el índice de calidad, en primera instancia se procedió a analizar estadísticamente con un nivel de confianza del 95 % cada uno de resultados obtenidos para cada parámetro, fundamentando así la consistencia de las conclusiones de este estudio desde el punto de vista estadístico.

En tal sentido se encontró que para las bahías definidas en el área de estudio las variables de trabajo (Tabla I) tienen un comportamiento dependiente entre variables a través de una prueba de *chi-square*; por tanto se procedió a analizar bajo una prueba de Friedman, con la cual se encontró que con un 95 % de confianza no existen diferencias estadísticamente significativas sobre los datos. Una vez realizado este proceso se ingresaron los datos al software desarrollado por el Centro de Investigación del Agua (Water Research Center), para obtener el valor del índice en cada uno de los puertos, tal como se observa en la Tabla II.

En los resultados expresados en la Tabla II se evidencia que existen diferencias entre la calidad del agua; así para Bahía Portete se obtuvo un 92 %, lo cual indica una calidad excelente; en la Bahía de Cartagena y el Golfo de Morrosquillo se encontró que cuentan con calidad media con 66,5 % y 65,31 %, respectivamente, según la escala del NSFQI.

Para tener un mayor entendimiento de los parámetros que genera el NSFQI se hace una descripción detallada de los resultados encontrados para cada uno de los puertos, con énfasis en la variabilidad espacial de parámetros fisicoquímicos (NID, silicatos, temperatura, OD) y microbiológicos (coliformes totales, *E. coli* y *Enterococcus*); en la tabla II.

Golfo de Morrosquillo

Las condiciones fisicoquímicas del Golfo de Morrosquillo para la época seca se presentan en la Figura 5, en general el comportamiento encontrado fue una columna de agua perfectamente mezclada con temperaturas uniformes entre los 28 y 30°C, con un pequeño incremento cercano a los 5 m en la estación DAA (~10 km).

Tabla II. Cálculo del NSFQI para Bahía Portete, Bahía de Cartagena y el Golfo de Morrosquillo en época seca.

| Parámetro | Unidad es de cálculo | Factor ponderal | Bahía Portete | Bahía de Cartagena | Golfo de Morrosquillo | Escala de clasificación NSFQI | |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------|
| | | | | | | Rango | Calidad |
| OD | % | 0,170 | 1,520 | 0,801 | 1,030 | | |
| Coliformes fecales | (UFC/100 ml) | 0,160 | 2,930 | 30,400 | 30,320 | 91 a 100 | Excelente |
| pH | | 0,110 | 0,870 | 0,900 | 0,890 | 71 a 90 | Buena |
| DBO ₅ | (mg/L) | 0,110 | 0,560 | 0,400 | 0,550 | 51 a 70 | Media |
| Variación de la temperatura | (°C) | 0,100 | 0,200 | 0,098 | 0,098 | 26 a 50 | Mala |
| Fosfatos | (mg/L) | 0,100 | 0,010 | 0,001 | 0,0005 | 0 a 25 | Muy mala |
| Nitratos | (mg/L) | 0,100 | 0,010 | 0,023 | 0,007 | | |
| Turbidez | (UNT) | 0,080 | 0,310 | 0,300 | 0,240 | | |
| Sólidos totales | (mg/L) | 0,070 | 1,560 | 0,520 | 1,520 | | |
| Sumatoria ponderada | | 1 | 8,010 | 33,420 | 34,680 | | |
| Porcentaje (Sumatoria ponderada 100) | | | 92 % | 66,5 % | 65,3 % | | |

El OD registró condiciones homogéneas a través de la columna de agua, con una disminución en la estación de Tolú, en la cual se reportó una concentración menor a 5 mg/l. La salinidad presentó una clara diferencia entre la superficie y el fondo, con valores menores en la superficie <15 km y para las estaciones BC y BT (>60 km) las menores salinidades en la superficie, cercanas a 10.

Los silicatos registraron un comportamiento inverso a la salinidad con las mayores concentraciones entre las estaciones BC y BT, indicado la influencia de aguas continentales en las concentraciones de los silicatos; en estas estaciones las concentraciones de silicatos fueron >40 mg/l, mientras que para las otras estaciones fueron <10 mg/l. Los compuestos nitrogenados NID presentaron el mismo comportamiento que los silicatos, encontrando las mayores concentraciones en las estaciones BC y BT ~0.2 mg/l, mientras que para las otras estaciones las concentraciones fueron menores a 0,2 mg/l. Para el caso de los fosfatos las concentraciones se encontraron bajo el límite de detección del método (0,0007 mg/l).

En cuanto a los indicadores de contaminación fecal se encontró un comportamiento similar dentro de la columna de agua para coliformes totales y el *E. coli*; existe una clara diferencia entre la estación BT y las otras estaciones, BT presentó las mayores concentraciones de coliformes totales (>1200 UFC/100 ml) *E. coli* (>800 UFC/100 ml). Para estos dos parámetros en las estaciones DAC a GC (km 20 a 40) se encontraron las menores concentraciones de los 5 a 10 m de profundidad (<100 UFC/100 ml) (Figura 6).

En cuanto a los enterococos se encontraron los puntos de máxima concentra-

ción en la estación GC (~km 40) con concentraciones >40 UFC/ 100 ml; en general para las otras estaciones las concentraciones fueron <10 UFC/ 100ml, exceptuando la estación DAC (~20 km) a los 5 m, con concentraciones cercanas a 30 UFC/10 ml (Figura 6).

Bahía de Cartagena

Las condiciones fisicoquímicas (Figura 7) de la Bahía de Cartagena para la época seca presentaron un comportamiento similar dentro de la columna de agua; se encontraron en general mayores temperaturas en la superficie >29°C y para el resto de la columna de agua temperaturas menores a los 28°C. Se encontró un punto de máxima temperatura a los 10 km de B11, con temperatura cercana a los 28°C. Este mismo comportamiento se encontró para el OD con mayores concentraciones en la superficie ~7,5 mg/l y menores a 5 mg/l en el resto de la columna de agua.

Para la salinidad el comportamiento fue inverso a la temperatura, con menores salinidades en la superficie, cercana a 10, y un grado menor en la salinidad a los 10 km de B11. El pH presentó un comportamiento casi homogéneo por estación a través de la columna de agua, siendo más básico al incrementarse la distancia de B11 (Figura 7).

El NID presentó las menores concentraciones cercanas a la estación B11 y la estación ESF (~20 km) <0,2 mg/l, mientras que para las otras el promedio se encontró cercano a los 0,4 mg/l. Los silicatos registraron máximos en la superficie entre las estaciones B12 y SP > 40 mg/l y valores bajos en la profundidad <5 mg/l. Los fosfatos presentaron concentraciones entre 0,01 y 0,02 mg/l (Figura 7).

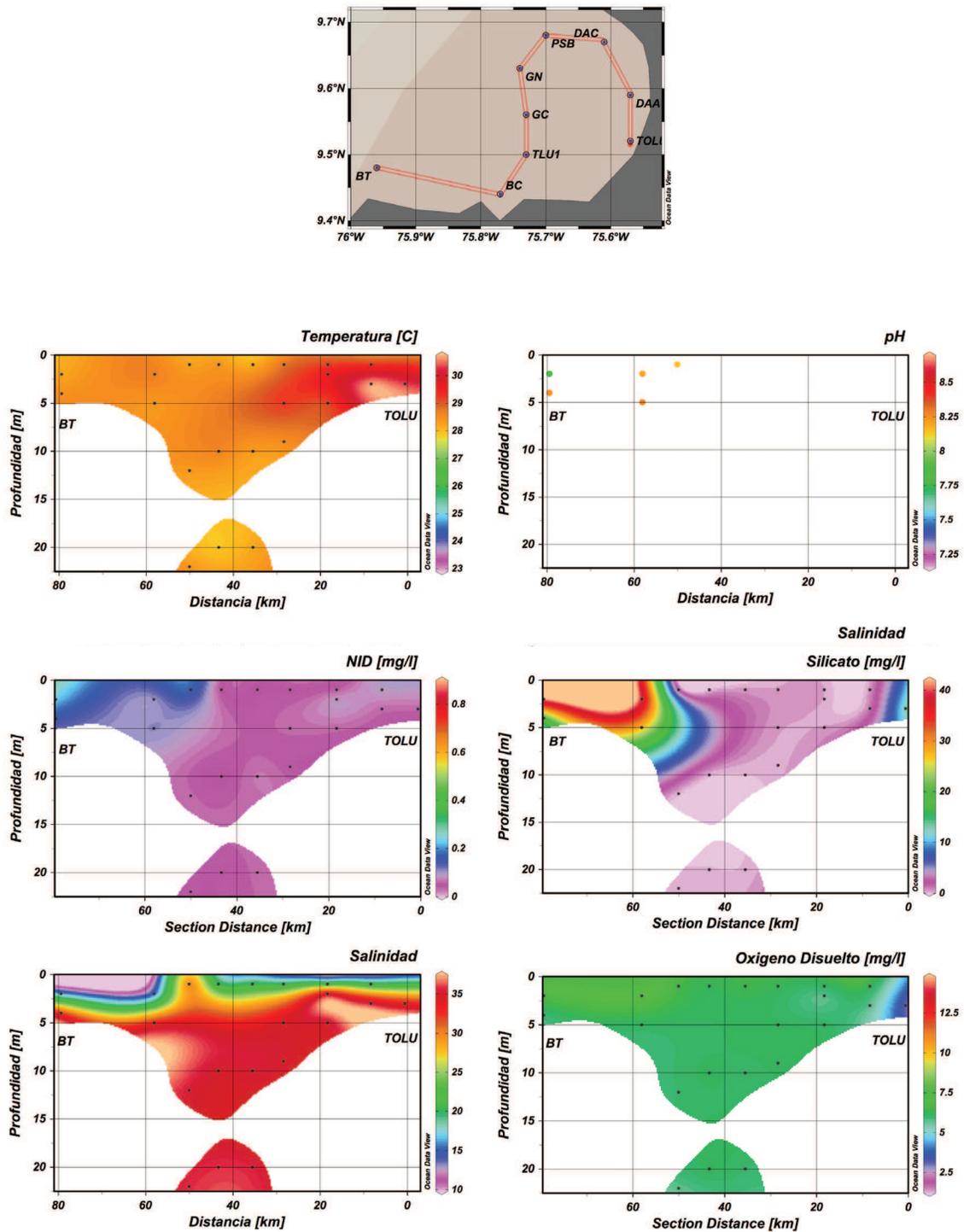


Figura 5. Variación espacial de los parámetros fisicoquímicos en el Golfo de Morrosquillo. La distancia del eje x representa la distancia desde la estación Tolú, de acuerdo con el patrón establecido en la figura con las estaciones.

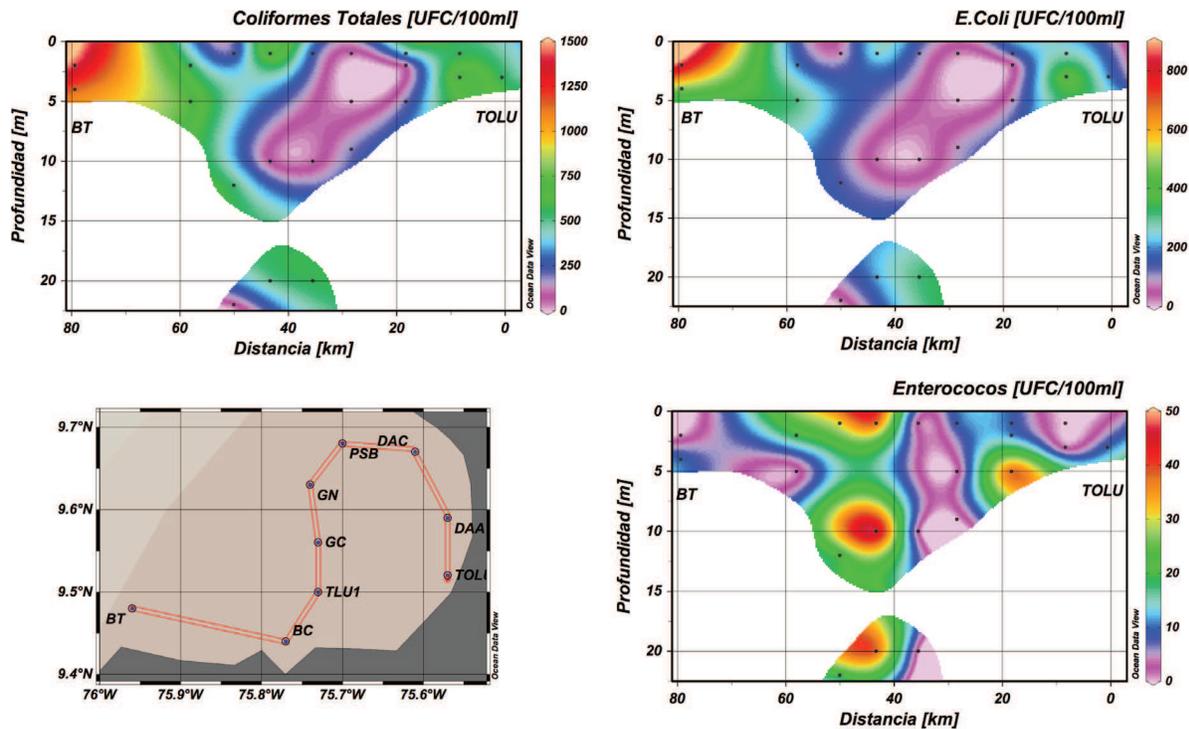


Figura 6. Variación espacial de indicadores de contaminación fecal en el Golfo de Morrosquillo. La distancia del eje x representa la distancia desde la estación Tolu, de acuerdo al patron establecido en la figura con las estaciones.

Para los indicadores de coliformes totales (Figura 8) se evidenciaron concentraciones menores a los 750 UFC/100 ml, con excepción de la estación B11 a los 7,5 m, donde se encontraron concentraciones mayores a los 1250 UFC/100 ml. En cuanto a *E. coli* las concentraciones fueron en general menores a las 200 UFC/100 ml. Para los enterococos las concentraciones fueron menores a los 100 UFC/100 ml, con excepción de lo encontrado entre las estaciones SP y ESF (~12-20 km) en la superficie, donde las concentraciones fueron entre los 100 y 500 UFC/100 ml.

Bahía Portete

Siendo el área de estudio con la mejor calidad del agua, presentó un comportamiento homogéneo en la columna de agua en cuanto a la salinidad, con características de agua marina con salinidades mayores a 35 (Figura 9). La temperatura se mantuvo cercana a los 27°C, con excepción de las estaciones cercanas a la Boya 5 (~5 km) las cuales presentaron una disminución de la temperatura en la columna

de agua menores a los 24 °C.

El pH, al igual que la salinidad, presentó un comportamiento homogéneo en la columna de agua con disminuciones en las estaciones ANC y BALIZA (~5 km), con valores menores a los 7,5. El OD mostró un comportamiento similar a la temperatura con mínimos cercanos a la Boya 5 (<5 mg/l) y máximos en las estaciones PI y CBP (~15 km) >12,5 mg/l (Figura 9).

En cuanto a los nutrientes, el silicato y el NID registraron un máximo cercano a la Boya 5, con un comportamiento homogéneo para los silicatos con concentraciones menores a los 5 mg/l en toda la bahía (Figura 9).

Sin embargo, para el NID el comportamiento no fue tan homogéneo en las estaciones AF y ANC (15-30 km) en la superficie de la columna, su concentraciones fueron menores a 0,1 mg/l y se incrementaron para las estaciones ANC y AF a nivel de profundidad hasta 0,4 mg/l, lo cual también sucedió en la estación PI (Figura 9).

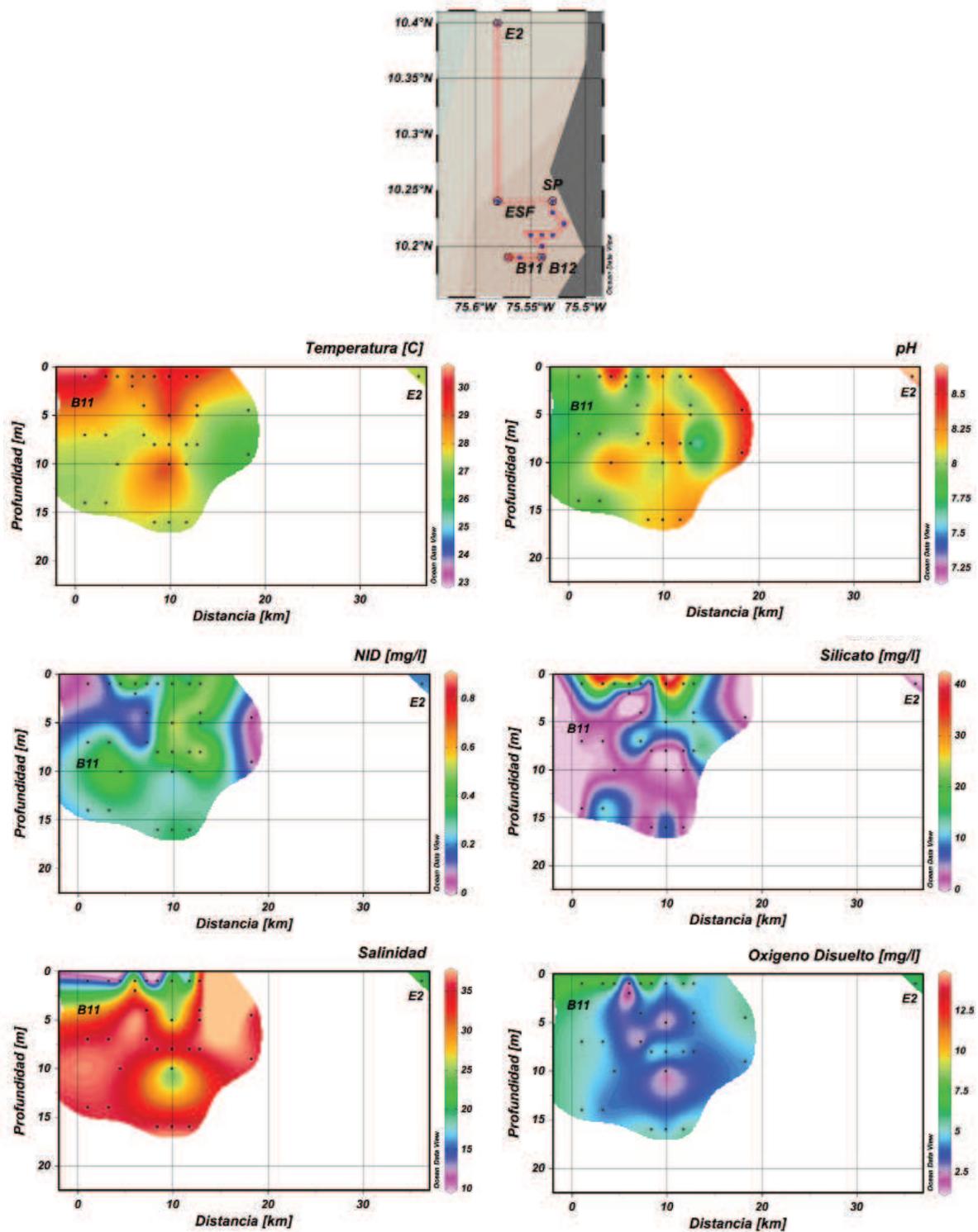


Figura 7. Variación espacial de parámetros fisicoquímicos para la Bahía de Cartagena. El eje x representa la distancia de la estación 11 a la E2, de acuerdo al patrón establecido en la figura con las estaciones.

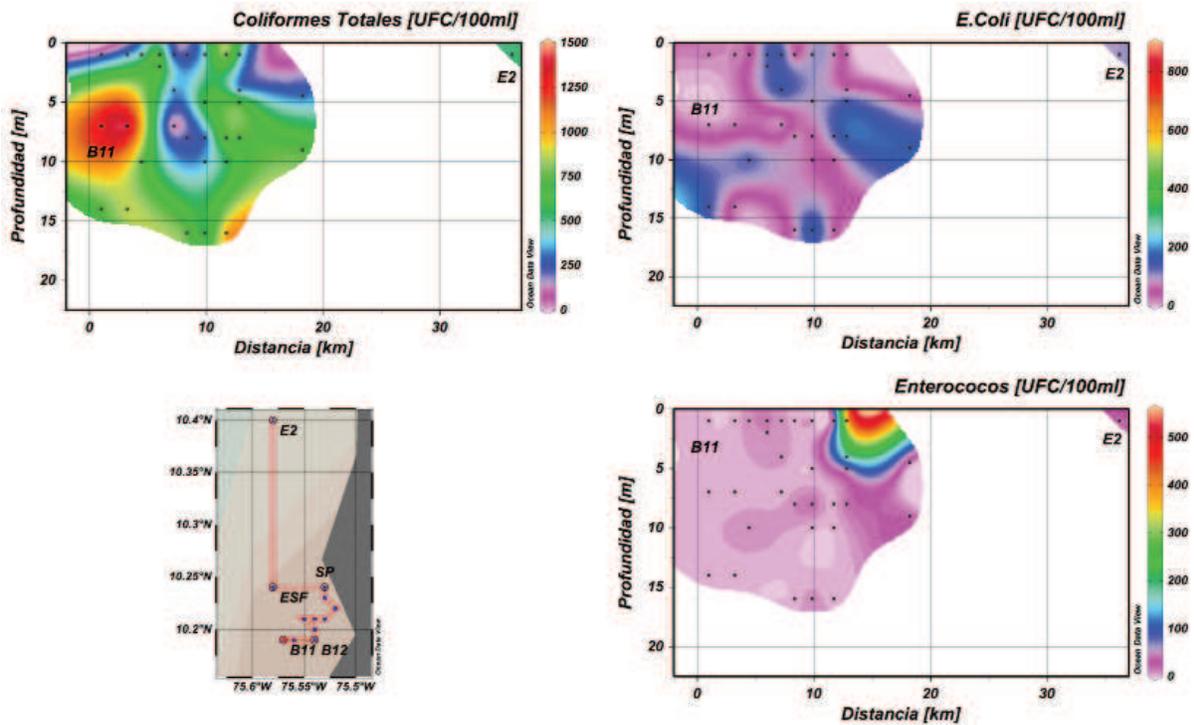


Figura 8. Variación espacial de los indicadores de contaminación fecal para la Bahía de Cartagena. El eje x representa la distancia de la estación 11 a la E2.

En cuanto a los indicadores de contaminación fecal (Figura 10) las concentraciones fueron homogéneas para los *E. coli* y enterococos, con concentraciones máximas de 70 y 10 UFC/100 ml, respectivamente. Para los coliformes totales la máxima se presentó en la estación AF a los 6 m con 1160 UFC/100 ml y en la ANC a los 3 m con 680 UFC/100 ml, para el resto de las estaciones las concentraciones se encontraron menores a las 250 UFC/100 ml.

DISCUSIÓN

El CIOH ha realizado diferentes investigaciones para conocer el estado de la calidad de las aguas de los principales puertos del Caribe colombiano, es así como en las últimas investigaciones ha monitoreado la Bahía de Cartagena [17], Bahía Portete [18] y en el Golfo de Morrosquillo [19, 20]. Dichas investigaciones abarcaron tres épocas climáticas y permitieron caracterizar el estado de cada puerto, de forma que se realizó una comparación de la calidad sanitaria de las aguas marino-costeras a través de un análisis multivariado de agrupación, empleando Pearson como coeficiente de similaridad. Dicha comparación permitió encontrar la formación de tres clúster inde-

pendientes, indicando que existen diferencias en la contaminación fecal entre puertos [20].

En este sentido se encontró que la Bahía de Cartagena registró los mayores niveles de contaminación fecal, seguido por el Golfo de Morrosquillo y Bahía Portete. Estas diferencias encontradas son el reflejo de las diferentes dinámicas que identifican las características de cada puerto. Siendo Bahía de Cartagena un sistema estuarino semicerrado, Bahía Portete un sistema marino con una única salida y el Golfo de Morrosquillo un sistema de mayor extensión semi-estuarina, separado del océano por Punta Bolívar y Punta San Bernardo [20]. Asimismo, se encontró que existe una asociación de la contaminación fecal influenciada por la descarga de agua de lastre de embarcaciones en cada puerto, lo cual condujo a formular que es necesario establecer herramientas de vigilancia y gestión ante la descarga de agua de lastre en cada puerto. Para el 2013, a partir de este estudio, se determinó la calidad sanitaria de los mismos puertos, integrándose a su análisis una clasificación de la calidad del agua empleando un índice de calidad para la época seca que fuera consistente con los datos encontrados en previas investigaciones.

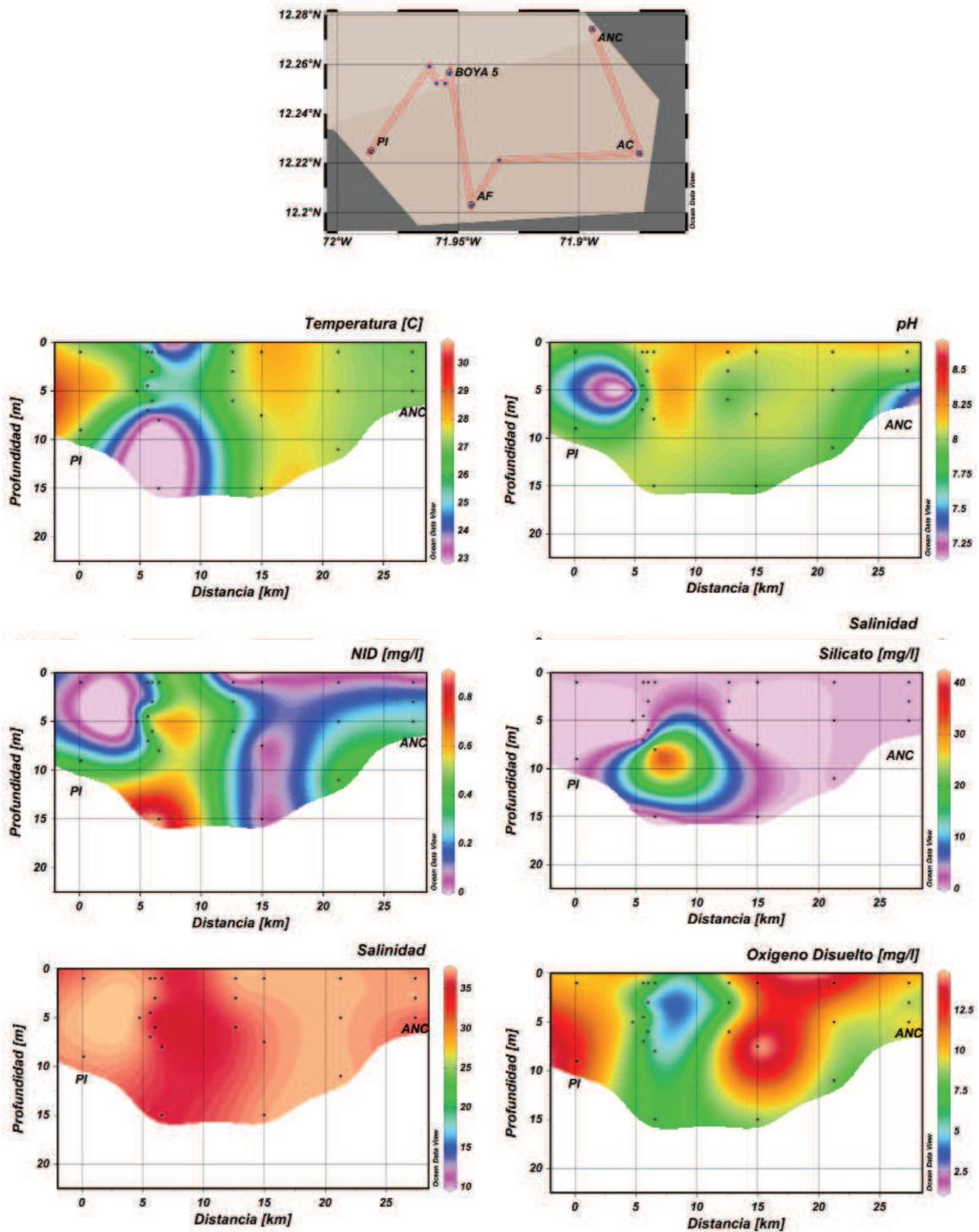


Figura 9. Variación espacial de los parámetros fisicoquímicos para Bahía Portete. El eje x representa la distancia de PI a ANC, de acuerdo al patrón establecido en la figura con las estaciones.

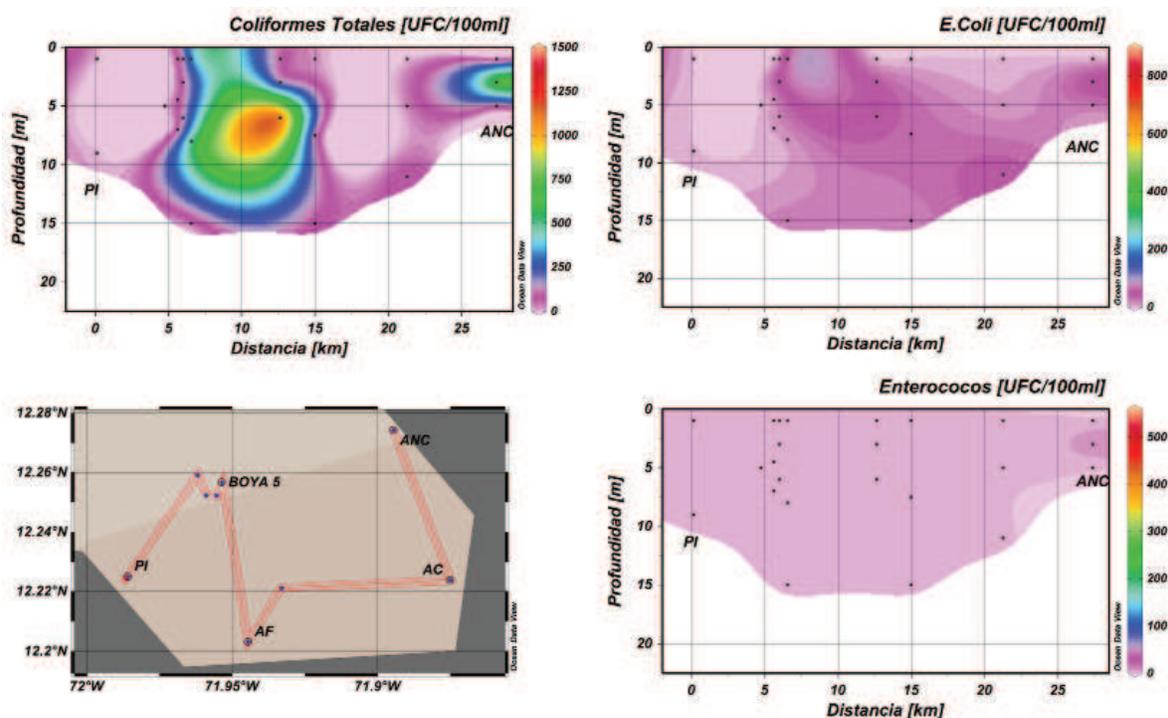


Figura 10. Variación espacial de los indicadores de contaminación fecal para Bahía Portete. El eje x representa la distancia de PI a ANC, de acuerdo al patrón establecido en la figura con las estaciones.

Golfo de Morrosquillo

El Golfo de Morrosquillo registró una contaminación intermedia entre la Bahía de Cartagena y Bahía Portete. Se registró la marcada influencia del agua residual doméstica proveniente de la ciudad de Tolú, debido al déficit en la cobertura de saneamiento básico en la zona, siendo ésta la estación con mayor contaminación seguida de Punta Bolívar, con una concentración de 1350 para coliformes totales y 1013 UFC/100 ml para *E. coli* lo cual excede la legislación establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Para 2010 [20] reportó una marcada fluctuación entre las concentraciones encontradas para coliformes totales, *E. coli* y *Enterococcus sp* (fluctúan en el golfo entre los 400 y 2800 UFC/100 ml), dichas concentraciones fueron determinadas en las estaciones de Punta San Bernardo, Boca Alegría, Punta

Bolívar, TL1, Golfo Centro y Tolú. Entre tanto, a través de este estudio se encontró específicamente en la época seca que los coliformes totales oscilaron entre 1430 UFC/ml en Boca Tinajones y 40 UFC/ml en la desembocadura Arroyo Alegría, para *E. coli* 840 en Boca Tinajones y 10 UFC/ml en la desembocadura de Arroyo Alegría, tal como se observa en la Figura 6, valores que corresponden con un comportamiento en época seca en el cual las fluctuaciones fisicoquímicas y los caudales de aportes continentales varían.

Las características fisicoquímicas de 2013, encontradas en este trabajo, indican una asociación que marca zonas estuarinas con menores salinidades y mayor concentración de NID y silicatos como la de la estación de Boca Tinajones (Figura 5). Estas características definen zonas en las cuales se mezcla un río en el mar, tal como lo reportan [9, 21]. Así como zonas con mayor salinidad y menor

concentración en nutrientes como la de Golfo Centro. En términos generales se reportan el golfo rangos de salinidad entre 14,13 y 36,2, silicatos (0,01 y 41,86 mg/l); el pH osciló entre 7.8 y 8.27, el OD de 3,07 y 7,04, y la temperatura de 27,86 y 30,75°C.

El valor encontrado del NSFQI mostró que las aguas del golfo se clasifican como aguas de calidad media con un 65,31 %, es posible indicar que el reflejo de esta calidad está marcada por la influencia del volumen de descarga de aguas del río Sinú, así como de sus comunicaciones con la ciénagas y arroyos, tal como se encontró en las concentraciones de microorganismos indicadores asociados principalmente a vertimientos de aguas residuales domésticas como las descargadas por ciudades capitales costeras (Tolú y Coveñas) que son vertidas directamente al golfo sin tratamiento previo, de hecho entre 2002 y 2008 en las playas de Coveñas y Tolú se excedieron los niveles permisibles de coliformes termotolerantes (CTE) establecidos en la norma [25] (RedCam, 2008).

Bahía de Cartagena

Para esta bahía se ha identificado que la descarga de aguas residuales domésticas afecta su equilibrio natural. Como lo ha señalado el CIOH, existen puntos en donde la concentración de OD ha llegado a valores bajos entre 2 y 4 mg/l que definen condiciones de anaerobiosis en la bahía. De otra parte la bahía también recibe aportes tributarios como el del Canal del Dique, el cual trae agua contaminada del río Magdalena con elevados aportes de materia orgánica en estado disuelto, coloidal o particulado que arrastran microorganismos, en su mayoría de origen fecal, que finalmente son liberados al medio marino y modifican las condiciones sanitarias de la bahía. Resultados similares han sido reportados por [22], en deltas de desembocaduras de ríos como el Mississippi y Danubio [23].

En este sentido y con la información recolectada para la Bahía de Cartagena, las concentraciones registradas de coliformes totales registraron hasta 4600 UFC/100 ml para la estación ubicada en el muelle de Contecar en la época de transición, para *E. coli* y *Enterococcus* fecales se registraron concentraciones hasta de 3320 y 3200 UFC/100m,

respectivamente, en la época lluviosa. Así, la bahía supera los límites permitidos por la OMS.

Para 2013 se encontró que en la época seca (Figura 8) en términos de concentración de microorganismos indicadores de contaminación fecal existe una distribución a lo largo de la bahía que depende de la hidrodinámica que la rige, la cual se encuentra a su vez influenciada por aportes de fuentes antrópicas, continentales y oceánicas.

En el caso de las fuentes antrópicas se determinó una asociación entre las estaciones a nivel superficie, medio y fondo de la Boya 27 (720, 260 y 330 UFC/100 ml) y la Boya 30 (890, 760 y 650 UFC/100 ml) con el agua residual proveniente de emisario submarino, tal como lo reportó [17], en cuyo estudio se determinó que el emisario impacta directamente en la zona donde se encuentran las citadas boyas, y por diferentes procesos hidrodinámicos la pluma del emisario puede alcanzar distintos estratos en la columna de agua. Otra de las actividades antrópicas que impactan la calidad de la bahía son las actividades puntuales en la zona costera que contribuyen a la calidad del agua de la bahía, como las asociadas a estaciones como ocurrió en la Sociedad Portuaria en las capas superficie, medio y fondo (200, 760 y 530 UFC/100 ml), en la cual se estima se ve afectada por las aguas provenientes del Caño Zapatero que bordea la isla de Manzanillo y a través de la cual se descargan aguas residuales domésticas sin tratamiento.

Ya hacia el sector sur de la bahía se reporta el ingreso de aguas provenientes de fuentes naturales provenientes del drenaje de aportes continentales como las del Canal del Dique, el cual cuenta con una carga sedimentaria elevada y transporta diferentes sustancias contaminantes hacia la bahía como se observa en la Figura 2, Boya 11 capas superficie, medio y fondo (370, 80, 120 UFC/100 ml) y Boya 12 capas superficie, medio y fondo (340, 1420 y 880 UFC/100 ml).

Vale mencionar que en la Bahía de Cartagena la temporada seca de 2013 muestra que en las estaciones monitoreadas registraron concentraciones con algún indicador de contaminación fecal (coliformes totales, *E. coli* y *Enterococcus*) en estratos medios y de fondo que sobrepasaron los límites permisibles

estipulados por la Agencia de Protección del Medio Ambiente y la Organización Marítima Internacional, lo cual indica que se deben tomar medidas de precaución con el agua de la bahía en actividades recreativas, de contacto secundario o de abastecimiento a través de pesca artesanal.

En razón a lo expuesto es posible entender que a través del índice calculado en 2013 para la Bahía de Cartagena con una calidad media del 66,5 %, se indica que existen muchas fuentes que determinan la calidad del agua a pesar de encontrarse en época seca, en la cual se esperaba que por disminución de caudales los aportes de materia orgánica disminuyeran; sin embargo, ante la presencia de un emisario submarino afectando continuamente el agua de la bahía, existe siempre una carga orgánica distribuida en los diferentes estratos de la columna que harán que su calidad no mejore en sus variables fisicoquímicas ni microbiológicas (figuras 3 y 8).

La campaña realizada en marzo de 2013 se caracterizó en términos de variables fisicoquímicas (Figura 7) por reportar rangos de salinidad entre 28,5 y 35, y silicatos entre 0,01 y 41.42 mg/l. Las mayores concentraciones se encontraron asociadas a la mezcla de aguas del Canal del Dique o del emisario submarino, y las mínimas en la zona marina de la estación de La Escollera. La temperatura se reportó entre los 26,34 y 30,23°C, adecuado para aguas estuarinas tropicales. Es importante identificar que los resultados obtenidos tanto de temperatura como de salinidad, tienen una directa relación con los fenómenos químicos ambientales tales como la floculación, la precipitación, la asimilación biótica o la coagulación de partículas, por tal razón se hace importante su medición para determinar el estado de cada estuario [9, 24]. De igual forma las características estuarinas de la bahía para la época seca reportaron valores de pH 6,5 y 8,5; OD con un mínimo de 1,23 en la estación de Tierrabomba, por ser una estación somera y con acumulación de sedimentos, y 7,17 mg/l en la Boya 19, lo cual indica que en general la Bahía de Cartagena tiene buena capacidad de asimilación explicada en la alta concentración de oxígeno.

Bahía Portete

Mientras que la Bahía de Portete, de naturaleza netamente marina, registra una contaminación más baja atribuida a que en este cuerpo de agua no existe aporte puntual de descargas de aguas residuales domésticas o de ríos que le descarguen sus aguas directamente. De hecho, en 2007 el CIOH determinó que la única potencial fuente de contaminación es el agua de lastre de los buques que arriban a Puerto Bolívar. En este cuerpo de agua se ha registrado en promedio observado concentraciones de OD con valores entre 5,54 y 10,20 mg/l, los cuales indican un buen recambio de aguas [18].

Se observó que existen dos estaciones de Bahía Portete que se ubicaron en el clúster del Golfo de Morrosquillo (Centro Bahía Portete y Punta Izep). Esto se explica en que dada la posible descarga de contaminación fecal a la bahía a través de agua de lastre, dichas estaciones registraron concentraciones similares a las halladas en el Golfo de Morrosquillo (1025 UFC/100 ml para coliformes totales, en época húmeda). Lo cual conduce a pensar que es necesario vigilar las descargas de lastre que se realizan a este puerto.

La determinación del comportamiento de bioindicadores de contaminación fecal en el agua de mar ha cobrado auge en la últimas décadas dado que permite inferir sobre los riesgos a los cuales se encuentra expuesta la población que entra en contacto con el agua, permitiendo así diagnosticar las posibles fuentes de contaminación que lleguen a los diferentes cuerpos de agua, así como la detección temprana de posibles brotes epidemiológicos. Específicamente en la región del Golfo de Morrosquillo se sabe que los ríos y arroyos son la fuente de contaminación puntual con mayor aporte de microorganismos de origen fecal, donde las condiciones sanitarias de las playas han presentado durante el primer semestre que sólo un porcentaje estimado de sus estaciones (alrededor del 15 %) no son aptas para actividades de baño y natación. Mientras que en el segundo semestre un 31 % de 88 estaciones evaluadas demostraron que no cumple con los requerimientos microbiológicos para

actividades de contacto primario, de acuerdo con los parámetros de la legislación colombiana (CTE > 200 NMP/100 ml) [25]. Se resaltó en dicho estudio que los balnearios con mayor concentración de coliformes termotolerantes en el Golfo de Morrosquillo durante el año fueron: Puerto Escondido en Córdoba (16000 (NMP/ 100 ml), Coveñas en Sucre (13000 (NMP/ 100 ml).

En este puerto es importante mencionar que no existe aporte de aguas continentales y por tanto las fuentes de contaminación se reducen a la actividad portuaria, específicamente al manejo y gestión que se realice del agua de lastre en los buques de tráfico internacional que arriban a realizar carga de carbón a la zona portuaria, tal como lo reflejan las variables microbiológicas, las cuales fueron más altas sólo en las estaciones cercanas al puerto, haciendo que en general las concentraciones de coliformes totales varían desde 1160 hasta 10 UFC/ml, para *E. coli* de 50 a 10 UFC/ml y *Enterococcus* en 10 UFC/ml (Figura 10).

Las aguas marinas de Bahía Portete se encontraron de calidad excelente con un porcentaje del 92 %. Este aspecto se respalda en que las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas estuvieron a escalas superiores a las per-

mitidas (salinidad de 35 a 37,4; temperatura de 22,09 a 28,07; NID de 0,05 a 0,89; OD de 4,74 a 14,7, y un pH de 7,15 a 8,15) (Figura 11).

La comparación de las concentraciones de nutrientes y OD refleja que existen diferencias entre la naturaleza de cada puerto; así se encontró que el puerto de Bahía Portete cuenta con un alto contenido de OD, siendo éste el factor de cálculo más importante en el índice, evidenciándose así el por qué se encontró el agua de Bahía Portete de calidad excelente (Figura 11). A su vez se encontró que las aguas con mayor contenido de nutrientes fueron las de Bahía de Cartagena y Golfo de Morrosquillo, explicado en la cantidad de fuentes antrópicas y naturales que drenan nutrientes a sus aguas, clasificándolas como aguas de calidad media.

La comparación de la concentración de microorganismos indicadores de contaminación fecal muestra que existen diferencias entre cada uno de los puertos (Figura 12). Teniendo en cuenta que este factor hace parte del cálculo del NSFQI, es posible encontrar que este factor influye directamente en la calidad de aguas de cada puerto y por tanto se explican los resultados encontrados en su cálculo.

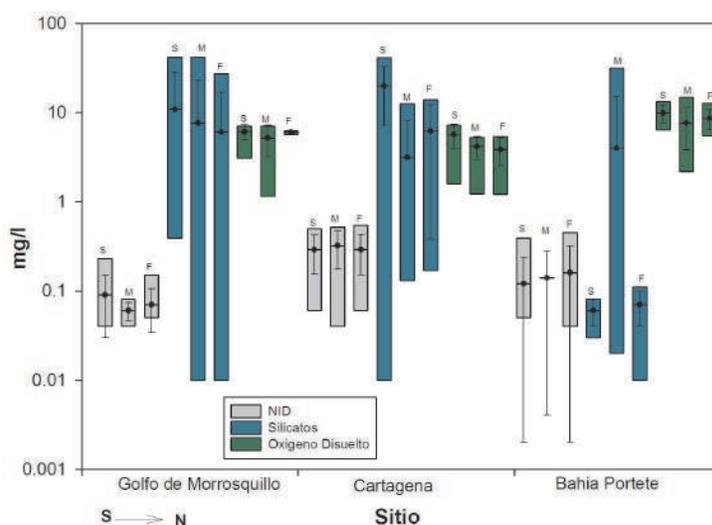


Figura 11. NID, silicatos y OD para las tres áreas de estudio. El cuadro presenta los máximos y mínimos, y la línea establece en el centro el promedio y las desviaciones estándar.

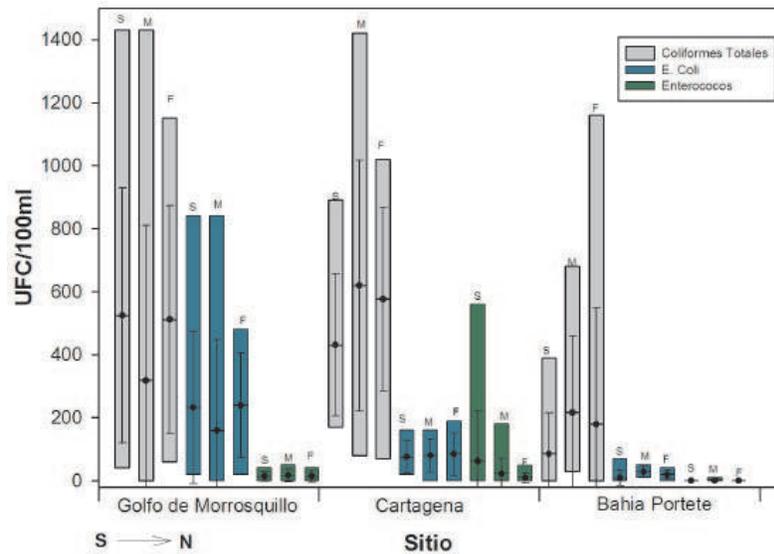


Figura 12. Coliformes totales, *E.Coli* para y *enterococos* para las tres áreas de estudio. El cuadro presenta los máximos y mínimos, y la línea establece en el centro el promedio y las desviaciones estándar.

CONCLUSIONES

La clasificación de la calidad del agua para época seca conforme al NSFQWI permitió encontrar resultados consistentes con la hidrodinámica y actividades que se realizan en tres de los principales puertos del litoral del Caribe colombiano. Clasificando así a Bahía Portete como un puerto con aguas de calidad excelente (92 %) y a la Bahía de Cartagena y el Golfo de Morrosquillo como puertos con aguas de calidad se media (66,5 % y 65,31 %, respectivamente).

La época seca marca dinámicas costeras distintas en cada puerto, debidas a que el caudal de aportes continentales es menor; sin embargo, es posible identificar cambios en la calidad del agua, permitiendo encontrar en Bahía de Cartagena y el Golfo de Morrosquillo altas concentraciones de nutrientes y silicatos, así como bajas salinidades, con excepción del puerto de Bahía Portete, el cual no cuenta con aportes continentales y cuenta con una marcada influencia del Mar Caribe en la salinidad de sus aguas.

De igual manera fue posible encontrar diferencias en la calidad sanitaria de cada puerto, encontrándose que la Bahía de Cartagena y el Golfo de Morrosquillo tienen ma-

yor concentración de indicadores de contaminación fecal que el agua de Bahía Portete, la cual a pesar de contar con presencia de estos indicadores registra una menor concentración. Este aspecto puede estar indicando que se deslustra agua en puerto sin una gestión adecuada de agua de lastre, ya que ésta es la única fuente potencial antrópica en el sector que pudiese contaminar a Bahía Portete.

LITERATURA CITADA

- [1] Sampaio, M. Mateus, R.B. Ribeiro, G. Berzin. (2008). A modeling approach to the study of faecal pollution in the Santos Estuary, 425-434. *In: Perspectives on Integrated Coastal Zone Management in South America.*
- [2] Pierini J.O., Streitenberger M.E. y Baldini, M.D. (2012). Evaluation of faecal contamination in Bahía Blanca estuary (Argentina) using a numerical model. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Vol. 47, Nº2: 193-202.
- [3] Sobhani, N., (2003). The Review on Water Quality Index Methods and Their applications on Zoning of Karoon River, Thesis (M.Sc), Environmental faculty, Science and Industry University.

- [4] Ott, W. R., (1978). Water Quality Indices: A Survey of Indices Used in the United States. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, D.C.
- [5] Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality, *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), pp. 300–306.
- [6] Lumb, A., Halliwell, D. and Sharma, T. (2002). Canadian Water Quality Index to Monitor the Changes in Water Quality in the Mackenzie River–Great Bear. In: *Proceedings of the 29th Annual Aquatic Toxicity Workshop*, (Oct. 21–23), Whistler, B.C., Canada.
- [7] DEQ. (2003). The Oregon Department of Environmental Quality. Available from: http://www.deq.state.or.us/lab/WQM/WQI/Wqi_main.htm. for New South Wales. Dissertation B.Sc. (Honours), University of Sydney, pp. 148.
- [8] Cooper, J.A.G., Ramm, A.E.L. & Harrison, T.D. (1994). The Estuarine Health Index: A New Approach to Scientific Information Transfer, *Ocean & Coastal Management*, 25, pp. 103-141.
- [9] Wepener, V., D.P. Cyrus • LA Vermeulen GC O'brierr PWade. (2006). Development of an Estuarine Water Quality Index (eWQI). WRC Report No. 1163/1/06.
- [10] León, L.F. (1991). Índice de Calidad de Agua, ICA, Inf. # Sh-9101/01, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 36 pp.
- [11] González, H. (2012). Water quality index based on fuzzy logic applied to the Aburra river basin in the jurisdiction of the metropolitan area. *DYNA*. Vol.79, No. 171.
- [12] Samboní, N., Carvajal, Y. y Escobar, J.C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Revista de Ingeniería e Investigación*, volumen 27, pp. 172-181. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [13] Brown, R., & McClelland, N. (1973). "Water Quality Index. Application in the Kansas River Basin".
- [14] Fernández, N., Ramírez, A. y Solano, E. Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible. Universidad del Valle/Instituto Cinará Universidad del Valle/Instituto Cinará Fernández, N., HW DO 214.
- [15] Parsons, T.R., Maita C.M. & Lalli C.M. (1989). *Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Primera Edición 1984, reimpresso 1985, 1989. Gran Bretaña. Pp. 22–25.
- [16] APHA-AWWA-WPCF. (2012). *Standard methods for analysis of water and wastewaters*. Edición 22. Editorial Diaz de Santos, Madrid, España. 1150 pp.
- [17] Cañón, M., Tous, G., López, K., López, R. y Orozco, F. (2007). Variación espacio-temporal de los componentes fisicoquímico, zooplanctónico y microbiológico en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH No. 25*, Colombia, pp. 120-134.
- [18] Quintana-Saavedra, D., Cañón, M. y Castro, I. (2008). Evaluación de la calidad microbiológica del agua de lastre de buques de tráfico internacional en Bahía de Portete y Puerto Bolívar, Guajira. *Boletín Científico CIOH No. 26*, ISSN 0120-0542, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 143-156.
- [19] Cañón, M., Quintana-Saavedra, D., López, O., Rossana, M., Tous, G. y Llamas, H. (2010). Caracterización fisicoquímica del Golfo de Morrosquillo y tanques de lastre de buques de tráfico internacional. *Bol. Cient. CIOH No. 28*, ISSN 0120-0542, pp. 84-126.
- [20] Quintana-Saavedra, D. y Cañón Páez, M, 2010. Calidad sanitaria del agua de mar del Golfo Morrosquillo y del agua de lastre de buques de tráfico internacional. *Bol. Cient. CIOH No. 28*, ISSN 0120-0542, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 127-153.
- [21] Domínguez, R.B., Anselmo, T.P., Barbosa, A.B., Sommer, U. & Galvão, H.M. (2011). Nutrient limitation of phytoplankton in the freshwater tidal zone of a turbid, Mediterranean estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91: 282-297.

- [22] Liu, H. & Dagg, M.J. (2003). Interactions between nutrients, phytoplankton growth, and micro- and mesozooplankton grazing in the plume of the Mississippi River. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 258:31-42.
- [23] Humborg, C., Conley, D. J., Rahm, L., Wulff, F., Cociasu, A. & Ittekkot, V. (2000). Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio* 29:44-49.
- [24] Moutin, T., Raimbault, P., Golterman, H.L. y Coste B. (1998). The input of nutrients by the Rhone river into the Mediterranean Sea: recent observations and comparison with earlier data. *Hydrobiologia*;373/374:237-46.
- [25] Decreto 1594 de 1984. (1984). Usos del agua y residuos líquidos. Ministerio de Agricultura. Diario Oficial No. 36.700, de junio de 1984.