

EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DEL COMPORTAMIENTO ESPACIO-TEMPORAL DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DETERMINANTES DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL LITORAL PACÍFICO COLOMBIANO

STATISTICAL EVALUATION OF SPACE-TIME BEHAVIOR PARAMETERS OF PHYSICO-CHEMICAL DETERMINANTS OF THE QUALITY OF WATER IN THE COLOMBIAN PACIFIC COAST

Clara Nathalia Celis Melo¹, Robinson Fidel Casanova Rosero², Germán Darío Bastidas³

Área de Protección del Medio Marino
Dirección General Marítima-Centro Control Contaminación del Pacífico
Vía El Morro, Capitanía de Puerto de Tumaco, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
¹clarancm@yahoo.es, ²rcasanova@dimar.mil.co, ³germanbastidas_iq@yahoo.es

Celis, C., Casanova, R. y Bastidas, G. 2008. Evaluación estadística del comportamiento espacio-temporal de los parámetros físicoquímicos determinantes de la calidad del agua en el litoral Pacífico colombiano. Boletín Científico CCCP, (15): 91-104.

RESUMEN

En el presente estudio se exponen los resultados obtenidos de la evaluación estadística aplicada a los parámetros físicoquímicos asociados a la calidad del agua en las principales bahías del litoral Pacífico colombiano. El análisis de componentes principales realizado al comportamiento espacio-temporal de estos parámetros en las bahías de Buenaventura, Tumaco y Málaga permitió identificar correlaciones entre las fuentes, los ecosistemas continentales y las características físicoquímicas de las aguas; resaltando que los ecosistemas estuarinos y bosques de manglar distribuidos en los alrededores de la Bahía de Tumaco y en el sector interno de la Bahía de Málaga son una fuente importante de materiales orgánicos. En la Bahía de Buenaventura una de las principales fuentes de sustancias autóctonas la constituyó la población asentada en Isla Cascajal, donde la variabilidad de la composición estuvo principalmente determinada por los aportes de nutrientes y materiales orgánicos. Mientras que en Bahía Málaga la alta dinámica de las aguas, aunada a un ecosistema con limitada intervención antrópica, impidió marcar efectos notorios en la calidad del agua.

Palabras clave: Calidad del agua, análisis de componentes principales, parámetros físicoquímicos, ecosistemas.

ABSTRACT

In the present study there are exposed the results obtained of the statistical evaluation applied to physical and chemical parameters associated with the quality of the water in the principal bays of the coastal Colombian Pacific Ocean. The analysis of principal components realized to the behavior special and temporary of these parameters in Buenaventura's bays, Tumaco and Malaga allowed to identify correlations between the sources, the continental ecosystems and the characteristics physical and chemical of the waters; highlighting that the ecosystems estuarine and mangrove forests distributed in the surroundings of Tumaco's bay and in the internal sector of the bay of Malaga they are an important source of organic materials; in Buenaventura's bay one of the principal sources of materials autochthonous constitutes the generated by population seated in the Island Cascajal in where the variability of the composition is principally determined by the contributions of nutrients and organic materials; whereas in the bay of Malaga the dynamical discharge united to an ecosystem with limited intervention anthropic does not allow to mark effects in the quality of the water.

Key words: Quality of the water, analysis of principal components, physical and chemical parameters, ecosystems.

INTRODUCCIÓN

El litoral Pacífico colombiano presenta una importante diversidad biológica, variedad de ecosistemas que interactúan y determinan la composición fisicoquímica de las aguas. Entre los tipos de ecosistemas claramente diferenciables se encuentran las playas, acantilados, estuarios y manglares. Estos últimos protegen la zona costera de la erosión, fijan playas y llegan a formar suelos maduros; en el litoral Pacífico estos ecosistemas se extienden en cerca de 2969 km², concentrados principalmente en el sector sur de la costa. Los ecosistemas de playas y acantilados están conformados por sedimentos acumulados, no consolidados, que han sido transportados hasta la costa y modelados por el oleaje, las corrientes y el viento. En el litoral Pacífico predominan los acantilados rocosos, asociados a las estribaciones de la serranía del Baudó, y las playas formadas por sedimentos lodo-arenosos, enriquecidos con materia orgánica, aportados por los ríos. Los estuarios, tercer tipo de ecosistema predominante en el litoral Pacífico, son ecosistemas donde desembocan los ríos al mar, presentan alta variabilidad de las condiciones fisicoquímicas y son altamente productivos debido al transporte de sustancias nutritivas.

El conjunto de aportes desde los ecosistemas naturales y los generados de las actividades antrópicas determinan la calidad de las aguas en el medio marino, la cual es de gran significancia para la calidad de la vida presente. Ésta es determinada por la cantidad de solutos y gases disueltos, como también del material suspendido y flotante. En sí, es una consecuencia de la naturaleza física, química y microbiológica del agua.

Con el fin de correlacionar el comportamiento de las variables fisicoquímicas evaluadas en las fuentes terrestres que afectan las bahías de Buenaventura, Tumaco y Málaga se desarrolló una evaluación estadística básica de los resultados obtenidos en el marco del proyecto *Estudio de la calidad del agua y de la contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en la costa Pacífica colombiana*, mediante la evaluación del valor P (Pearson) y el Análisis de Componentes Principales (ACP), utilizado para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos.

ÁREA DE ESTUDIO

El área seleccionada para la evaluación de la calidad del agua en la costa Pacífica colombiana

comprendió las principales bahías del litoral, las cuales se encuentran ubicadas en los departamentos del Valle del Cauca y Nariño, siendo éstas:

Bahía de Buenaventura. Situada al occidente de Colombia, en el departamento del Valle del Cauca, sobre la llanura del Pacífico. Tiene un área aproximada de 250 km², situada a los 03° 57' 08" de latitud N y a los 77° 00' 51" de longitud W (Figura 1). Las estaciones de muestreo se consideran representativas dentro de los factores de influencia asociados a desembocaduras de ríos, vertimientos de aguas residuales domésticas y actividades portuarias.

Bahía de Tumaco. Se encuentra ubicada en el suroccidente colombiano, delimitada por las latitudes 1° 45' 00" y 2° 00' 00" N y las longitudes 78° 30' 00" y 78° 45' 00" W (Figura 1). Tiene una extensión aproximada de 350 km². Las estaciones evaluadas se distribuyeron alrededor de las islas de Tumaco y El Morro, en proximidades a la desembocadura de los ríos y a lo largo y ancho de la bahía.

Bahía de Málaga. Ubicada en el departamento del Valle del Cauca, al norte de la Bahía de Buenaventura, está formada por lagunas de erosión con amplias depresiones de erosiones fluviales al bajar el nivel del mar durante la última glaciación e inundadas por transgresiones durante el Holoceno y modificadas, posteriormente, por procesos secundarios de bioerosión (Báez *et al.*, 1993). La red de estaciones muestreadas fueron distribuidas desde la desembocadura del río La Sierpe hasta Isla Palma, ubicada en la conexión de la bahía con el océano (Figura 1).

Durante 2008, en las tres bahías se realizaron dos muestreos, el primero se llevó a cabo entre febrero y marzo, y el segundo entre agosto y septiembre; en cada uno de ellos se colectaron muestras de agua a nivel superficial, durante las fases de marea alta y baja (ver Figura 1).

METODOLOGÍA

Las muestras se analizaron según los procedimientos validados en el Laboratorio de Química del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP). El pH y la salinidad fueron medidos por medio de un multiparámetros WTW (modelo 340i/set). Las determinaciones de oxígeno disuelto (OD) y DBO₅ se realizaron con base en el método Winkler, revisado por Carpenter (1966). El contenido de materia orgánica fue determinado aplicando modificaciones al

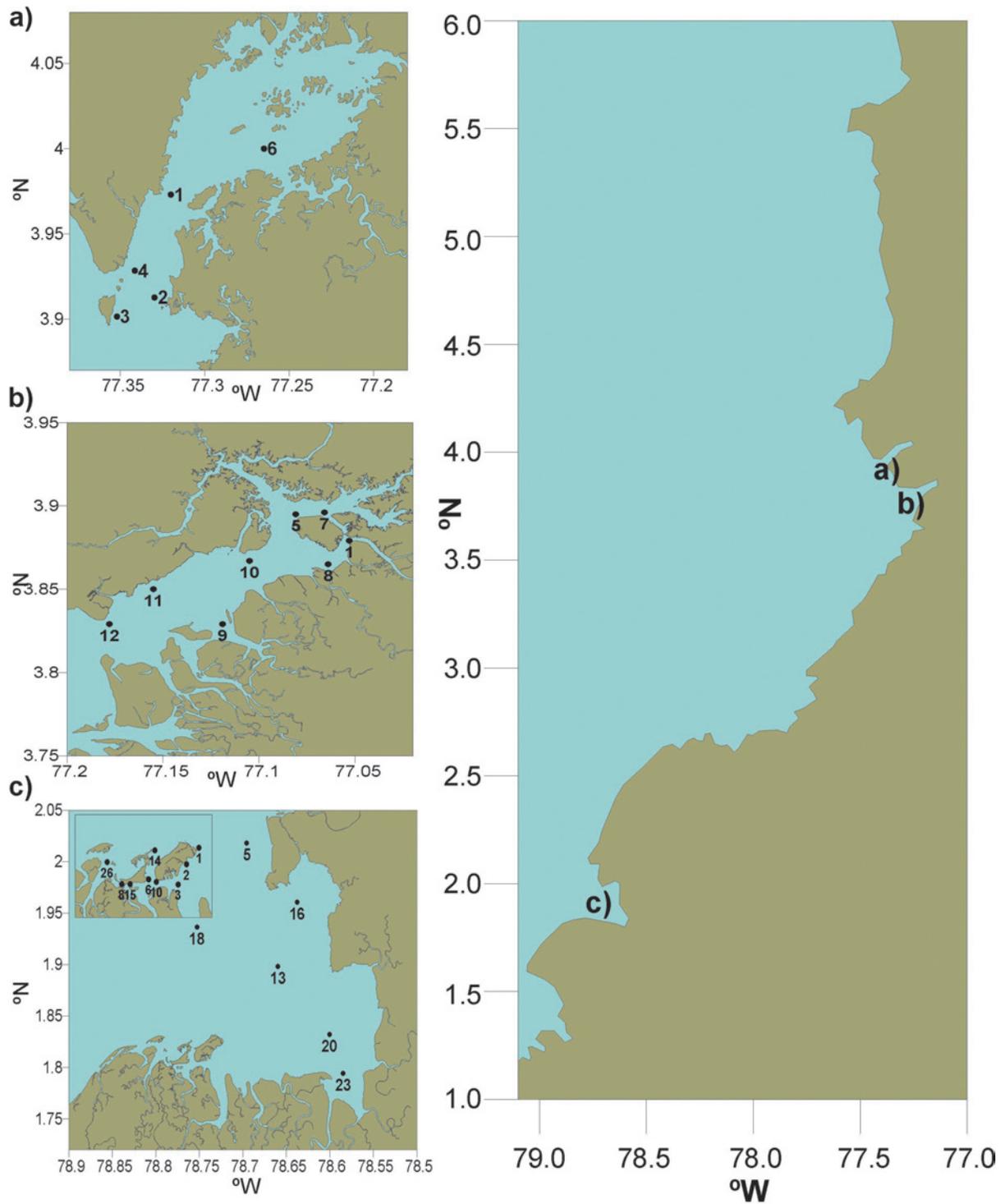


Figura 1. Estaciones de muestreo en las bahías de a) Málaga, b) Buenaventura y c) Tumaco.

procedimiento de oxidación con permanganato en caliente descrito por Rodier (1981). La temperatura y la transparencia fueron medidas *in situ*, utilizando un termómetro de cazoleta y un disco Secchi, respectivamente. La determinación de amonio se hizo por el método propuesto por Riley y modificado por Strickland y Parsons (1968), ampliamente conocido como el método del azul de indofenol; los fosfatos fueron determinados por el método del ácido ascórbico, desarrollado por Murphy y Riley (1952) y recomendado por Strickland y Parsons (1972) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por su acrónimo en inglés) (1975); los nitritos, a través del método desarrollado por Shinn y modificado por Bendschneider y Robinson (1952) y los nitratos por el método descrito por Strickland y Parsons (1968). Asimismo se siguieron las recomendaciones descritas en el Standard Methods 21st Ed. (2005).

Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante el programa estadístico *Statgraphics Plus*, con la finalidad de evaluar correlaciones, distribuciones y realizar el ACP. Técnicamente, el ACP construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la mayor varianza del conjunto de datos es capturada en el primer eje (primer componente principal), la segunda varianza más grande en el segundo eje y así sucesivamente. Para generar esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. Además, las coordenadas en la nueva base dan la composición en factores subyacentes de los datos iniciales (Jolliffe, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variabilidad de los parámetros fisicoquímicos evaluados para las aguas de las bahías de Buenaventura, Tumaco y Málaga permitió identificar relaciones específicas para cada ecosistema, estableciendo así patrones de distribución espacial que dependen de las fuentes aportantes y de la dinámica de cada área.

Relaciones de OD

La concentración de gases en los ecosistemas marinos y/o estuarinos depende directamente de una serie de factores meteorológicos, biológicos, químicos, físicos, dinámicos, oceanográficos y geográficos, entre otros. La temperatura y la salinidad influyen reduciendo la solubilidad de los gases, cuando cualquiera de los dos parámetros aumenta. Los niveles de oxígeno durante los períodos de marea alta y baja en la Bahía de Tumaco presentaron valores medios de oxígeno de 5.95 mg O₂/L y 6.20 mg O₂/L; en la Bahía de Buenaventura los promedios fueron de 5.68 mg O₂/L y 5.31 mg O₂/L; para Bahía Málaga las concentraciones medias fueron de 6.66 mg O₂/L y 6.30 mg O₂/L, para los respectivos períodos mareales mencionados. En general, los niveles detectados indicaron un porcentaje de saturación mayor al 80 %. Según estos valores es posible identificar a Bahía Málaga como un ecosistema con procesos de mezcla y reaireación, posiblemente debido a las fuertes corrientes que arriban a la bahía y promueven estos procesos, o a los bajos niveles de materia orgánica, los cuales demandan menores consumos de oxígeno del medio acuático.

En la Bahía de Buenaventura el litoral aporta mayores cantidades de materiales provenientes de actividades antrópicas y/o ecosistema de manglar; sin embargo, en esta bahía se presentaron fuertes turbulencias en el medio. Por su parte, la Bahía de Tumaco mostró en promedio los más bajos niveles de oxígeno, asociándose al efecto de la temperatura aunado a los procesos de consumo.

La evaluación de la correlación entre las concentraciones de OD y los valores de algunos de los principales parámetros fisicoquímicos que alteran la solubilidad del oxígeno en el medio permitió establecer comportamientos diferentes para cada bahía estudiada. Para la Bahía de Tumaco las concentraciones de OD presentan una relación inversa, más estrechamente relacionada con la temperatura que con la salinidad, las concentraciones de clorofila-*a* y materia orgánica total (MOT), donde es importante resaltar que las aguas de origen oceánico llegan hacia la bahía con altos niveles de OD. En este análisis se tuvo en cuenta el coeficiente de correlación y el valor P para cada pareja de parámetros. Así, en la Figura 2 se aprecia cómo, a pesar de la dispersión de los valores, la concentración de OD varía en forma inversa a la temperatura, es decir, en función de la radiación lumínica (hora del día). Sin embargo, no

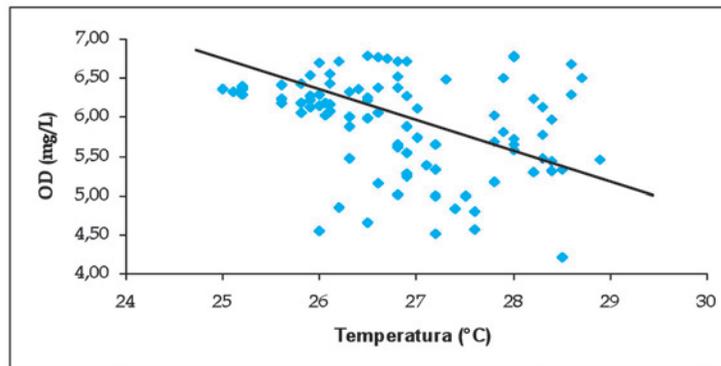


Figura 2. Gráfico de regresión entre datos de temperatura y OD para la Bahía de Tumaco durante 2008.

se evidencia una correlación significativa entre los niveles de OD y la concentración de clorofila-*a*, la cual depende igualmente de la intensidad lumínica.

Los resultados obtenidos de la correlación entre los parámetros que afectan la concentración de oxígeno y los niveles de OD determinados para la bahía de Buenaventura no presentaron una clara relación para ninguna de las parejas evaluadas ($P > 0.05$). Así, es posible presumir que el comportamiento descrito por las concentraciones de oxígeno en la bahía es debido principalmente a factores oceanográficos y/o meteorológicos que incluyen patrones de corrientes marinas, vientos y precipitación, entre otros.

Para Bahía Málaga el análisis de los resultados permitió identificar una significativa correlación

negativa entre las concentraciones superficiales de OD y la salinidad, esta última gobernada principalmente por el ciclo mareal.

Adicionalmente, los valores de salinidad presentaron rangos diferentes para los dos muestreos en las bahías de Buenaventura y Málaga (Figura 3); durante marzo las salinidades fueron mayores, presentando un comportamiento acorde con la distribución espacial en la salinidad en la cuenca pacífica colombiana, descrita por CCCP (2002). El comportamiento espacial analizado para la Bahía de Tumaco reveló concentraciones similares durante los dos períodos de muestreo (febrero y agosto), siguiendo el patrón descrito en estudios anteriores realizados por el CCCP.

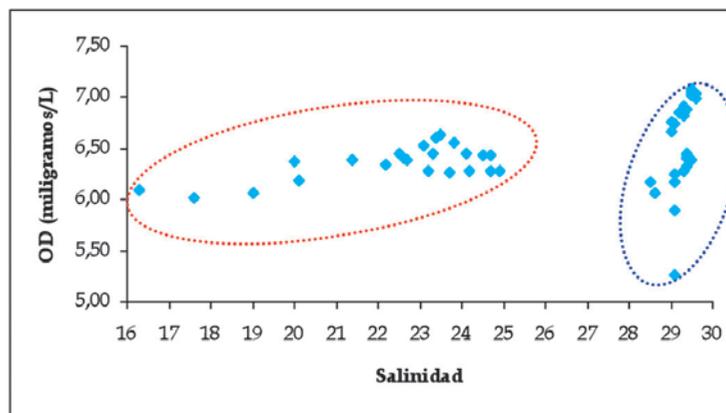


Figura 3. Diagrama de correlación entre concentraciones de OD y salinidad para la Bahía de Málaga. (•••) Resultados primer semestre, (•••) resultados segundo semestre.

Los valores de OD a nivel superficial determinados para las bahías estudiadas superaron el límite establecido como criterio de calidad admisible para

la destinación del recurso para la preservación de flora y fauna en aguas marinas o estuarinas ($4.0 \text{ mg O}_2/\text{L}$), según el Decreto 1594 de 1984; garantizando

que este parámetro no es una causa para promover la emigración de especies móviles y, por consiguiente, favorece que especies de vida sésil puedan vivir.

Relaciones de Materia Orgánica Total (MOT)

La MOT es otro parámetro hidroquímico cuya distribución en cada área depende de la dinámica de las aguas, de los ecosistemas interactuantes y del efecto de las actividades antrópicas. Los estuarios rigen en gran medida los aportes de la MTO; así, los terrenos bajos cubiertos de manglar (ricos en nutrientes y materiales degradables) son lavados continuamente durante el período de marea alta, posteriormente los materiales que allí se concentran son retirados cuando la marea empieza a bajar.

En general, cada bahía muestra geomorfologías características. La bahía de Tumaco cuenta con considerables extensiones de bosques de manglar

en los sectores sur y oriental, y ambientes rocosos en el sector norte (E5); también presenta una amplia conexión con el océano, recibe varios ríos de importante caudal localizados en la zona oriental. Por su parte, las bahías de Buenaventura y Málaga tienen una fisiografía similar, son entrantes estrechas y angostas, con dos ambientes claramente diferenciados, encontrándose bosques de manglar, bañados por ríos, esteros y acantilados.

La Bahía de Tumaco exhibió las mayores concentraciones promedio de MOT durante el 2008, con valores de 2.24 y 2.84mg/L durante marea alta y baja (Figura 4), respectivamente. Los máximos valores se obtuvieron en cercanía a los ríos Rosario, Mejicano y Tablones (sector oriental), debido a que éstos captan los drenajes naturales desde los bosques de manglar y de igual forma reciben desechos de caseríos ribereños de estas microcuencas.

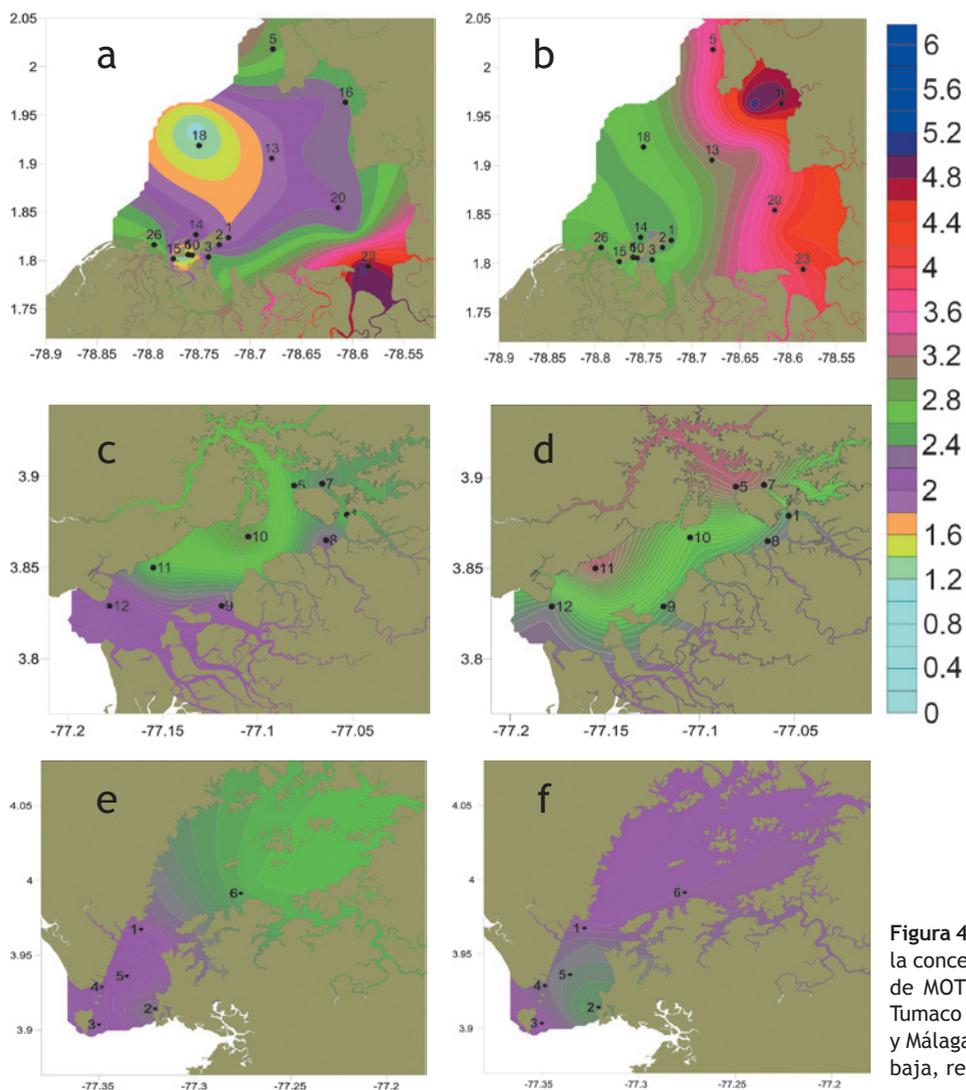


Figura 4. Comportamiento espacial de la concentración superficial promedio de MOT (mg/L). Para las bahías de Tumaco (a y b), Buenaventura (c y d) y Málaga (e y f), durante marea alta y baja, respectivamente.

Una evaluación de la correlación entre los contenidos de MOT y sólidos suspendidos (SS) con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) exhibió coeficientes de correlación positivos con correlaciones estadísticamente significativas para un nivel de confianza de 95 %, entre DBO_5 y MOT, DBO_5 y SS, y MOT y SS (Tabla I). De esta manera, es posible establecer cómo la materia orgánica que arriba a la bahía, procedente de los ríos, ingresa en forma particulada asociada a los sólidos en suspensión, producto de precipitaciones que promueven las escorrentías y la erosión en los terrenos aunada a la deforestación en la región. Una vez esta materia llega a la bahía es consumida como fuente de alimento y energía por microorganismos consumidores y/o atacada durante los procesos de oxidación y degradación natural. Estas etapas conllevan un consumo de oxígeno, suministrado desde la fracción solubilizada en el medio acuático.

Tabla I. Matriz de correlación entre las concentraciones de MOT y SS con la DBO_5 para la Bahía de Tumaco.

| | DBO_5 | MOT | SS |
|---------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| DBO_5 | | 0.5896* (0.0000)** | 0.4351 (0.0011) |
| MOT | 0.5896 (0.0000) | | 0.4771 (0.0003) |
| SS | 0.4351 (0.0011) | 0.4771 (0.0003) | |

* Correlación

** Valor P

Las concentraciones promedio de MOT determinadas para los períodos de marea alta y baja

durante 2008 en la Bahía de Buenaventura fueron de 1.95 y 2.35 mg/L, respectivamente. Allí las principales fuentes de materiales orgánicos se concentraron en los sectores con mayor densidad poblacional (Isla Cascajal y La Bocana), presentando valores máximos en la Estación 5 (Playa Basura) que recibe parte de los vertimientos de aguas residuales domésticas de la población. Las concentraciones cuantificadas para este sector fueron más representativas que los aportes provenientes de ríos que desembocan en la bahía, contrariamente a lo expuesto para la Bahía de Tumaco.

Los aportes de materia orgánica y sólidos suspendidos mostraron correlaciones positivas estadísticamente significativas para las estaciones ubicadas alrededor de Isla Cascajal (Figura 5); es decir, los vertimientos de la población presentaron fracciones importantes de material particulado, lo cual afecta la transparencia del agua, los procesos fotosintéticos y reduce así la calidad fisicoquímica en el sector.

En Bahía Málaga las concentraciones de MOT indicaron los menores valores, según los cuales durante los períodos de marea alta y baja las concentraciones promedio en 2008 fueron de 1.70 y 1.74 mg/L, respectivamente, valores que demostraron la efectividad de los procesos de mezcla que tienen lugar en la Bahía de Málaga.

Las variaciones en la concentración de MOT obedecieron a procesos de dilución y concentración asociados al régimen mareal, así cuando el nivel de la marea asciende las sustancias presentes en la columna de agua se diluyen en un mayor volumen, adicionalmente el aporte de los ríos disminuye por represamiento a causa de las masas de agua oceá-

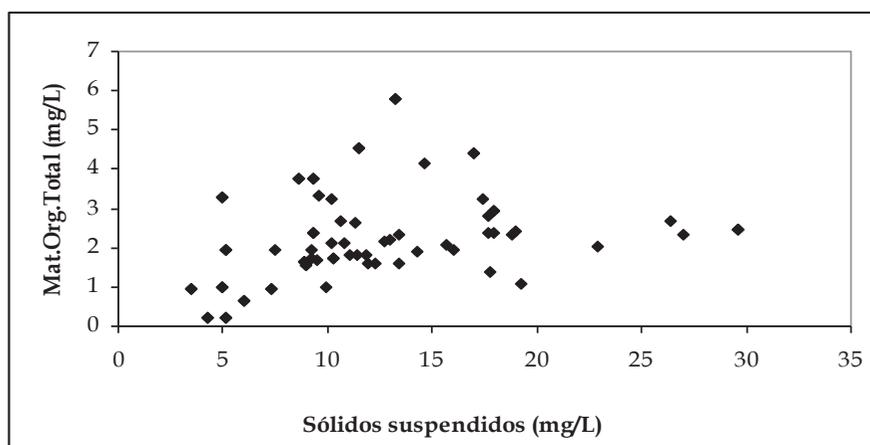


Figura 5. Diagrama de correlación entre concentraciones de MOT y SS alrededor de Isla Cascajal para resultados de 2007-2008.

nicas que se proyectan a la desembocadura de los ríos, una vez la altura de la marea alcanza su mínimo valor, los materiales disueltos se concentran; además las aguas que durante la marea alta bañan extensas zonas de manglar escurren y arrastran consigo materiales al medio e incrementan la concentración de analitos en la columna de agua.

Este proceso afectó en diferentes escalas en cada bahía y a cada sector; es decir, los sectores destacados por aporte de MOT en cada bahía presentaron las mayores variaciones en función de la altura de la marea, en tanto que estaciones con mayor grado de afectación por fuentes terrestres de materiales variaron en menor magnitud sus concentraciones.

En Bahía Málaga cada ecosistema aporta diferentes tipos de materiales; así, en la Estación 6 las concentraciones de MOT presentaron una correlación positiva con las concentraciones de sólidos suspendidos; esta correspondencia permite inferir que los materiales orgánicos aportados por los ríos y por los esteros en bahía Málaga se presentaron principalmente en forma particulada (Figura 6). Por su parte, los materiales que arribaron a las demás estaciones fueron orgánicos disueltos y/o inorgánicos particulados.

ACP aplicado a los parámetros fisicoquímicos

Se aplicó ACP al conjunto de valores medios de doce parámetros evaluados para el período de marea alta durante 2008, con el fin de plantear algunas relaciones. El resultado del análisis para la

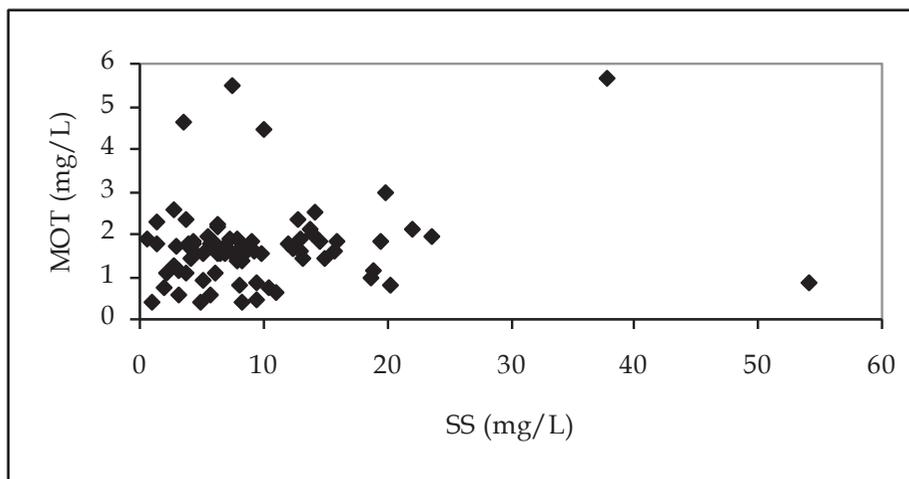


Figura 6. Gráfico de correlación de las concentraciones de materia orgánica total y sólidos en suspensión, determinadas entre 2007-2008.

Bahía de Tumaco permitió agrupar el 80.04 % de la variabilidad del set de datos en los dos componentes principales, de los cuales el primer componente concentró 58.88 % de la variación, el conjunto de $[\text{PO}_4]^{-3}$, $[\text{NO}_3]^{-}$, MOT, DBO_5 , SS, $[\text{NH}_4]^+$ y clorofila-*a* presentó una correlación positiva, en tanto que salinidad y pH presentaron las mayores correlaciones negativas con este componente (Tabla II). En el segundo componente (21.16 %), los nutrientes presentaron correlaciones positivas, mientras que la DBO_5 , MOT, OD, pH, SS y T mostraron una correlación negativa.

Tabla II. Peso de cada variable sobre los dos componentes principales resultantes del ACP para la bahía de Tumaco.

| Variable | Componente 1 | Componente 2 |
|-----------------------|--------------|--------------|
| Clo | 0.300718 | -0.354698 |
| DBO_5 | 0.262514 | -0.40701 |
| MOT | 0.270922 | -0.262341 |
| $[\text{NH}_4]^+$ | 0.198895 | 0.381502 |
| $[\text{NO}_3]^{-}$ | 0.309774 | 0.291531 |
| OD | -0.24398 | -0.282871 |
| pH | -0.326974 | -0.0462715 |
| $[\text{PO}_4]^{-3}$ | 0.301916 | 0.244591 |
| Sal | -0.364797 | 0.0219773 |
| $[\text{SiO}_3]^{-2}$ | 0.321043 | 0.290413 |
| SS | 0.246249 | -0.420082 |
| T | 0.27814 | -0.0768227 |

Los resultados obtenidos del ACP permitieron agrupar las estaciones en función de las fuentes que afectan la calidad del agua en cada sector, e

identificar los parámetros determinantes de su variación composicional (Figura 7).

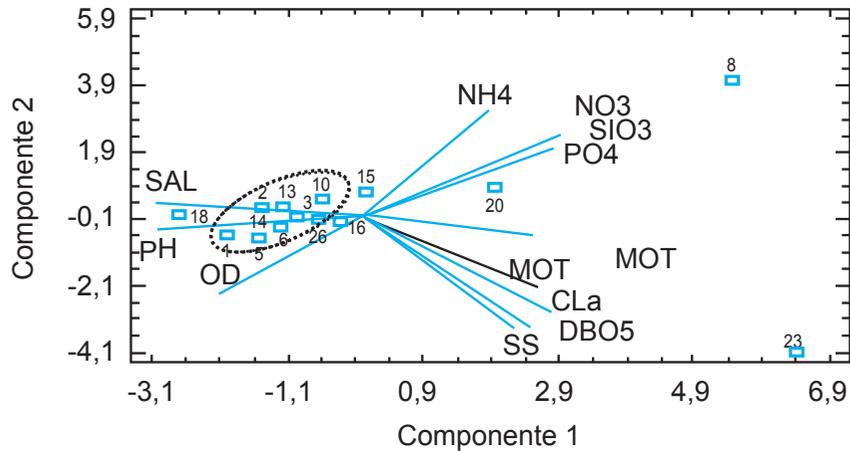


Figura 7. Distribución de puntos de dos nuevas variables F1, F2, derivadas de los parámetros fisicoquímicos estudiados para la Bahía de Tumaco.

Las estaciones 20 y 23, ubicadas en el sector oriental de la bahía, en la desembocadura de los ríos Rosario, Mexicano y Tablones, y la Estación 8, ubicada en el sector El Pindo, la cual recibe influencia del río Mira, a través del Estero La Cova, presentaron una buena correlación con el componente 1. La variación en la composición de estas estaciones estuvo determinada por el aporte de materia orgánica, directamente relacionado con la DBO₅ y a su vez con el aporte de SS, como se describió previamente. La Estación 8 mostró altos niveles

de contaminación, principalmente por compuestos nitrogenados contenidos en las aguas residuales domésticas, aunados a los desechos generados en los procesos de transformación de la madera que tiene lugar en este sector (Figura 8).

Las estaciones que presentaron una correlación negativa con el componente 1 gobernaron la variabilidad de los parámetros evaluados, indicando la relación inversa entre temperatura y OD.

La Estación 18 se encuentra distante del conjunto de estaciones ubicadas alrededor de las islas



Figura 8. Aserríos ubicados en el sector El Pindo, en la bahía de Tumaco (E8).

pobladas (línea continua). Esta estación recibe influencia estrictamente oceánica, representa su máxima variabilidad en función de la salinidad y el pH. Por su parte, en las estaciones internas, ubicadas alrededor de las islas la variabilidad de composiciones está principalmente determinada por el ciclo mareal, el cual conlleva una continua variabilidad del pH y la salinidad.

De forma similar el ACP para la Bahía de Buenaventura, arrojó un conjunto de 12 componentes de los cuales los tres principales factores representan el 77.2 % de la variabilidad propia del conjunto de datos. El primer componente abarcó el 44.92 % de la variabilidad del conjunto de datos; este componente presenta una correlación positiva con $[\text{NH}_4]^+$, $[\text{NO}_3]^-$, $[\text{SiO}_3]^{2-}$; DBO₅, MOT, pH, Clo y T, mientras que la salinidad el OD y los SS presentan una correlación negativa. El segundo componente

agrupó el 21.16 % de la variabilidad, de la cual el comportamiento de $[\text{SiO}_3]^{2-}$, $[\text{PO}_4]^{3-}$ y $[\text{NH}_4]^+$ se correlacionaron positivamente con este factor, en tanto que el comportamiento de los demás parámetros exhibieron una tendencia inversa. El tercer componente reunió el 12.18 % de la variación. Este componente está formado por DBO₅, $[\text{PO}_4]^{3-}$ y T, los cuales son muy similares, y por pH pero en sentido opuesto (Figura 9) (Tabla III).

La composición fisicoquímica de las estaciones 1 y 7 mostró una alta correlación con el componente 1, especialmente con las concentraciones de $[\text{NH}_4]^+$, $[\text{NO}_3]^-$ y MOT, teniendo en cuenta las variables iniciales. Estas estaciones de muestreo recibieron alta influencia por el vertimiento de aguas residuales de la población ubicada en Isla Cascajal, las cuales aportaron importantes cantidades de materiales orgánicos y nutrientes.

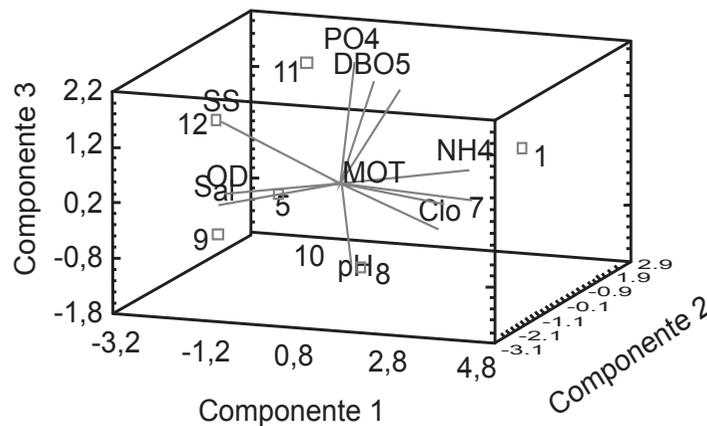


Figura 9. Biplot de los puntos de muestreo y las variables sobre los tres principales componentes formados para la Bahía de Buenaventura.

Tabla III. Peso de las variables en cada componente tras el ACP para la Bahía de Buenaventura.

| Variable | Componente 1 | Componente 2 | Componente 3 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Clo-a | 0.346649 | -0.0619861 | -0.1605 |
| DBO5 | 0.187864 | -0.215903 | 0.550844 |
| MOT | 0.264076 | -0.46226 | 0.124325 |
| $[\text{NH}_4]^+$ | 0.299543 | 0.393615 | -0.00136872 |
| $[\text{NO}_3]^-$ | 0.374149 | -0.0953629 | -0.0219034 |
| OD | -0.265273 | -0.293328 | 0.00273708 |
| pH | 0.180436 | -0.375996 | -0.335879 |
| $[\text{PO}_4]^{3-}$ | -0.106036 | 0.465296 | 0.423801 |
| Sal | -0.369844 | -0.0799926 | -0.110221 |
| $[\text{SiO}_3]^{2-}$ | 0.388847 | 0.143717 | -0.0694158 |
| SS | -0.290413 | -0.293419 | 0.333242 |
| T | 0.242064 | -0.121526 | 0.484175 |

La composición fisicoquímica de la Estación 9, ubicada hacia la parte externa de la desembocadura del río Potodó, se encontró principalmente gobernada por el contenido de la salinidad, indicando una alta influencia de aguas oceánicas.

Para Bahía Málaga, en el ACP aplicado a los 12 parámetros evaluados, los tres primeros componentes logran explicar el 73.65 % de la variabilidad. El primer componente agrupó 33.72 % de la variación, conformado principalmente por los aportes debidos a $[\text{NH}_4]^+$, Clo, DBO5, $[\text{SiO}_3]^{-2}$, SS, $[\text{NO}_3]^-$ y $[\text{PO}_4]^{-3}$, de

los cuales los últimos cuatro presentaron una correlación negativa con el componente 1. El segundo factor concentró el 21.59 % y en él las variables con mayor influencia fueron la salinidad, pH, OD, $[\text{SiO}_3]^{-2}$, $[\text{PO}_4]^{-3}$ y T. Dentro del grupo total en este componente las variables relacionadas con MOT, $[\text{NH}_4]^+$, y T lo afectaron en sentido inverso. El tercer componente principal reunió el 18.33 %, este factor está compuesto por los aportes de $[\text{NO}_3]^-$; $[\text{PO}_4]^{-3}$ en sentido positivo, y pH, OD y de $[\text{SiO}_3]^{-2}$ en sentido negativo (Tabla IV).

Tabla IV. Contribución de cada variable sobre cada uno de los tres principales componentes establecidos para Bahía Málaga.

| Variable | Componente 1 | Componente 2 | Componente 3 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Clo | 0.379316 | 0.0611716 | 0.145235 |
| DBO5 | 0.239415 | 0.213286 | 0.332712 |
| MOT | -0.186022 | -0.213031 | -0.00330841 |
| $[\text{NH}_4]^+$ | 0.42264 | -0.187981 | 0.256635 |
| $[\text{NO}_3]^-$ | -0.255758 | 0.0930634 | 0.436247 |
| OD | 0.21306 | 0.462702 | -0.248843 |
| pH | -0.18835 | 0.40239 | -0.294805 |
| $[\text{PO}_4]^{-3}$ | -0.226511 | 0.346605 | 0.404133 |
| Sal | 0.164256 | 0.268073 | 0.422145 |
| $[\text{SiO}_3]^{-2}$ | -0.358507 | 0.317088 | -0.119372 |
| SS | -0.391248 | 0.0226342 | 0.2965 |
| T | -0.281779 | -0.438544 | 0.139646 |

Teniendo en cuenta el peso de cada variable sobre cada uno de los tres componentes principales es posible identificar la correlación entre las fuentes que afectan la calidad del agua en cada estación y la composición de la misma. De esta manera se identificó el grupo de estaciones que recibe mayor influencia oceánica, las estaciones 1, 4 y 5, ubicadas

en los sectores de la Base Naval y Juanchaco. En la zona central de la bahía se presentaron variaciones determinadas principalmente por el cambio en la salinidad, la cual gobierna los niveles del OD (Figura 10); adicionalmente, la Estación 5 presentó variaciones adicionales debidas a las concentraciones de amonio.

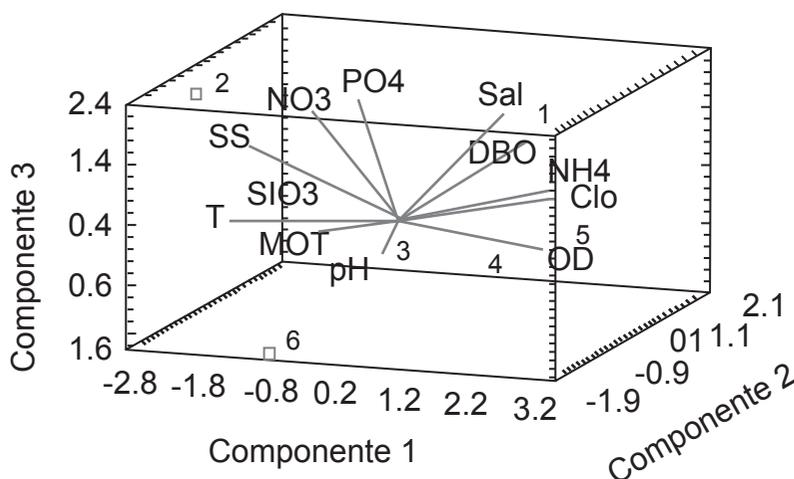


Figura 10. Distribución de puntos de las tres nuevas componentes derivadas de los parámetros fisicoquímicos estudiados para la Bahía de Málaga.

En la Estación 2, ubicada en cercanías a las playas de Juan de Dios, la calidad del agua estuvo determinada por la variabilidad de SS y $[\text{SiO}_3]^{-2}$. En este sector los sedimentos son de tipo arenoso, amarillos y con tamaño de partícula grande (Figura 11). Arenas con estas características se forman por procesos de

erosión, mediante los cuales la abrasión desgasta las rocas al eliminar materiales orgánicos y purificar el cuarzo contenido en ellas (Figura 12). Estos procesos condujeron a la acumulación de este tipo de materiales en el sector de Juan de Dios y, por ende, de importantes niveles de silicatos y sólidos.



Figura 11. Playas de Juan de Dios en Bahía Málaga.



Figura 12. Acantilados característicos del sector sur de Bahía Málaga.

La Estación 6 presentó un comportamiento diferente a los previamente descritos. En ella, las variaciones se debieron a las concentraciones de

materia orgánica total aportada por los ríos y esteros que se ubican en cercanía al sector, las cuales logran afectar la calidad del agua (Figura 13).



Figura 13. Ecosistema estuarino en el sector interno de Bahía Málaga.

CONCLUSIONES

Para cada bahía la composición fisicoquímica de las aguas estuvo determinada por la geografía del terreno y las fuentes terrestres que afectan la zona, constituyendo los ecosistemas estuarinos y bosques de manglar en fuentes importantes de materia orgánica y sólidos en suspensión.

Los sectores con mayor densidad de población alteraron la composición del agua debido a los aportes de nutrientes y materiales orgánicos degradables, en tanto que los ecosistemas rocosos, presentaron aportes de sólidos suspendidos y silicatos producidos durante los procesos de erosión.

La evaluación de la correlación entre los parámetros estudiados permitió identificar fuentes puntuales de ingreso de materiales orgánicos en forma particulada en los sectores con mayor presencia de ecosistemas estuarinos.

En las bahías de Buenaventura y Málaga los aportes de material particulado se concentraron en el sector interno.

En la Bahía de Tumaco el oxígeno disuelto presentó una correlación significativa inversa con la temperatura, teniendo en cuenta el parámetro P, mientras en Bahía Málaga se observó entre el OD y la salinidad.

LITERATURA CITADA

- Báez, M., Bobadilla, L., y Villaveces, M. 1993. Estudio y evaluación de la contaminación por metales traza en zonas del Pacífico colombiano. Fase I. Ingeominas. Santafé de Bogotá. Pp. 19-27.
- Bendschneider, K., y Robinson, R. 1952. "A new Spectrophotometric Method for the determination of nitrite in sea water. *Journal Marine Res.*, 11: p 87-96.
- Carpenter, J. 1966. New measurements of oxygen solubility in pure and natural water. *Limnol. Oceanogr.*, 11: 264-277.
- Centro Control Contaminación del Pacífico. 2002. *Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana.* (Ed.) Dimar. Publicaciones Especiales Vol. 2, San Andrés de Tumaco. Pp. 21-30.

- Centro Control Contaminación del Pacífico. 2007.** Estudio de la calidad del agua y de la contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos en la costa pacífica colombiana. Informe final. San Andrés de Tumaco.
- Jolliffe, I. 2002.** Principal Component Analysis. 2^{da} edición. Springer Verlag. New York, 487 pp.
- Murphy, J., y Riley, J. 1952.** A modified single solution method for the examination on phosphate in natural water. Anal. Chim. Acta.
- Decreto 1594 1984.** Disposiciones Sanitarias sobre aguas. República de Colombia, Ministerio de Salud.
- Rodier, J. 1981.** Análisis de las aguas, aguas naturales, aguas residuales y agua de mar, química, fisicoquímica, bacteriología y biología. Ediciones Omega S.A.
- Standard Methods. 2005.** For the examination of water and wastewater, 21st Edition, 2005.
- Strickland, J. y Parsons, T. 1968.** A practical handbook of seawater analysis. Fish. Res. Board of Canada. Segunda Edición. Otawa.