

# CALIDAD DEL AGUA EN EL ÁREA COSTERA DE SANTA MARTA (COLOMBIA)

## WATER QUALITY AT SANTA MARTA COASTAL AREA (COLOMBIA)

FRANCISCO GARCÍA

*M.Sc. Ing. Ambiental, Universidad del Magdalena, Docente, fcofdogarcia@yahoo.com*

CARLOS PALACIO

*Ph.D Ingeniería, Universidad de Antioquia, Docente, cpalacio@udea.edu.co*

URIEL GARCIA

*Biólogo, Universidad del Magdalena, Docente, uriel.garcia@yahoo.com*

Recibido para revisar Abril 11 de 2011, aceptado Noviembre 11 de 2011, versión final Febrero 22 de 2012

**RESUMEN:** Se usaron técnicas de análisis estadístico multivariado, para determinar la variación temporal y espacial de la calidad del agua en la zona costera de Santa Marta, donde se ubica un emisario submarino que descarga 1 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales domésticas. La ANOVA de dos vías, los análisis de clúster y de componentes principales más la interpolación de krigging, fueron considerados para este análisis. En la variación temporal se encontraron diferencias que marcan en el año dos periodos de tiempos heterogéneos, de diciembre a abril la concentración de los parámetros de calidad del agua es más alta. El resto del año (mayo, junio, agosto – noviembre, exceptuando el mes de julio donde se presentaron concentraciones altas), se registran concentraciones sensiblemente inferiores. En la variación espacial se reportan dos grupos de áreas en las cuales la calidad del agua es diferente, dicha diferencia está relacionada con la cercanía a la descarga del emisario submarino.

**PALABRAS CLAVE:** Calidad del agua, análisis multivariado, emisarios submarinos, variación espacial, variación temporal.

**ABSTRACT:** Multivariate statistical techniques were used to investigate the temporal and spatial variations of water quality at the Santa Marta coastal area where a submarine outfall that discharges 1 m<sup>3</sup>/s of domestic wastewater is located. Two-way analysis of variance (ANOVA), cluster and principal component analysis and Krigging interpolation were considered for this report. Temporal variation showed two heterogeneous periods. From December to April, and July, where the concentration of the water quality parameters is higher; the rest of the year (May, June, August-November) were significantly lower. The spatial variation reported two areas where the water quality is different, this difference is related to the proximity to the submarine outfall discharge.

**KEYWORDS:** Water quality, Multivariate statistical techniques, submarine outfall, spatial variation, temporal variation.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras que reciben contaminación debido a la actividad antropogénica, contienen elevadas concentraciones de nutrientes, contaminantes orgánicos y trazas de metales pesados [1]. La degradación de la calidad del agua marina relacionadas con estas causas, generalmente tienen sus orígenes en las cantidades de aguas residuales que son descargadas al océano, sin ningún tipo de tratamiento [1, 2-6].

Santa Marta, una de las ciudades más importantes de la región Caribe Colombiana, dada su posición geográfica favorable y sus condiciones naturales, que le proveen ventajas comparativas en lo social, ambiental

y económico, está entre las zonas del país con mejores potenciales para el desarrollo. En su frente costero que incluye las Bahías de Taganga y Santa Marta (BTySM), se ha desarrollado un uso diversificado de las aguas marinas, que involucran recreación, saneamiento básico y una creciente actividad industrial y portuaria. Es un área propicia para el arribo de buques de gran calado, ya que a pocos metros de su línea costera se pueden encontrar profundidades importantes; lo que ha permitido el desarrollo de la actividad portuaria. Dada su expansión y crecimiento económico, y debido a la falta de planificación y control ambiental, hasta finales de la década de los noventa, las aguas residuales domésticas eran vertidas directamente a las BTySM, lo que representó serias dificultades de tipo

ambiental, además de las amenazas para la salud pública; conjuntamente con las actividades que implican contacto primario o secundario en el área costera de Santa Marta (ACSM) se desarrolla la pesca artesanal, principal fuente de sustento de poblaciones nativas. Para el ACSM han sido citadas algunas evidencias de procesos de contaminación ambiental asociada con proliferación de coliformes fecales [7-9]. Con el fin de mejorar las condiciones de la calidad del agua marina, las autoridades de saneamiento básico de la ciudad construyeron en el año 2000 un emisario submarino que dispone las aguas residuales a 50 metros de profundidad en el océano, mediante una tubería que se extiende 420 metros desde la costa y a través de 102 difusores. Este es el primer emisario construido en el país, el cual vierte en la actualidad 1 m<sup>3</sup>/s.

Los emisarios submarinos son implementados bajo el supuesto de que el medio receptor tiene gran capacidad de asimilación de las descargas de aguas residuales [1, 10]. Los sistemas que cuentan con múltiples difusores, son generalmente los más eficientes en el proceso de maximización de la dilución inicial en el campo cercano [4]. Después de lo cual, la pluma boyante de agua residual es dispersada por la turbulencia oceánica en lo que se denomina campo lejano [4, 12]. Dado el amplio margen de variación de las corrientes, la pluma boyante puede permanecer en las vecindades de la descarga por algún tiempo antes de ser dispersada [4, 13]. La determinación de la calidad de agua alrededor de los difusores de los emisarios, es una medida adecuada para verificar el funcionamiento eficaz de estos sistemas de disposición de aguas residuales. Este artículo presenta los resultados de la determinación de la calidad del agua en la zona de mezcla del Emisario Submarino de Santa Marta, (ESSM) con el fin de aportar información que ayude a precisar si los fenómenos de contaminación en esta área costera tienen relación con su funcionamiento.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

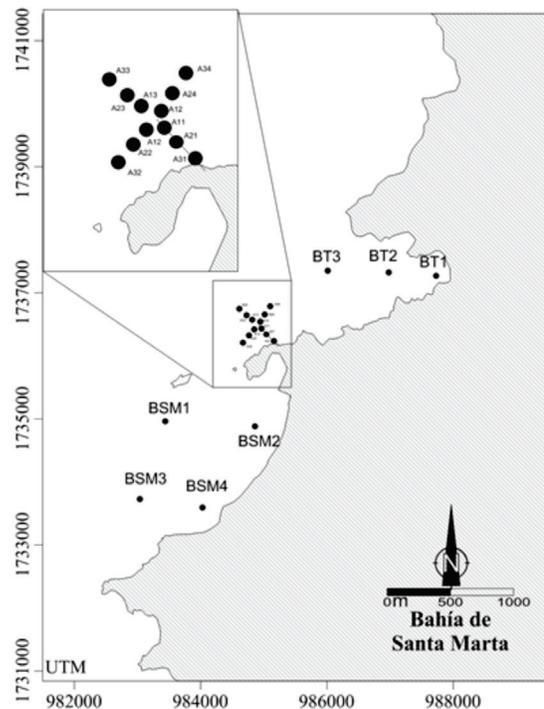
### 2.1 Área de estudio

Para el conocimiento de la calidad del agua en la zona de mezcla del ESSM y las BTySM, se utilizaron en total 18 estaciones de monitoreo (ver figura 1). La malla de muestreo implementada, incluyó 11 estaciones situadas en 3 anillos concéntricos a 100, 200 y 400 metros, en torno del punto medio de la longitud donde se ubican

los difusores. Estas se denominaron estaciones en el anillo 1 (A11, A12, A13, y A14), anillo 2 (A21, A22, A23 y A24) y anillo tres (A31, A32, A33). Tres estaciones más, en la Bahía de Taganga (BT1, BT2 y BT3) y cuatro restantes en la Bahía de Santa Marta (BSM1, BSM2, BSM3 y BSM4).

### 2.2 Muestreo

El periodo de estudio fue de un año (2009), durante el cual se efectuaron doce campañas de muestreo (una por mes). En cada jornada se procedió a la recolección de muestras de agua en las 18 estaciones antes señaladas. Todas las muestras de aguas fueron obtenidas con la ayuda de una botella Van Dorn de 5 litros fabricada en PVC, la cual se limpió y enjuagó con alcohol al 95 % y agua destilada respectivamente, previo a cada lance. Dos profundidades fueron muestreadas en cada estación, fondo (entre 15 y 50 metros según localización) y superficie (1.5 metros).



**Figura 1.** Mapa del área de estudio con las estaciones de monitoreo al rededor del emisario submarino (11 estaciones) y las bahías de Santa Marta (BSM) y Taganga (BT)

Las muestras que fueron de tipo puntual, se almacenaron en neveras portátiles con hielo, remitidas el mismo día al laboratorio donde se mantuvieron a 4 °C hasta su

procesamiento y análisis por métodos estandarizados [14-16], para lo cual se siguieron las recomendaciones de APHA [14]. Los parámetros de calidad del agua seleccionados incluyeron, amonio ( $\text{NH}_4^+$ -H), ortofosfatos (APHA-4500 PF), silicatos (APHA-4500  $\text{SiO}_2$ -D), nitratos (APHA-4500- $\text{NO}_3^-$ -F), nitritos (APHA-4500- $\text{NO}_2^-$ -A), coliformes fecales y totales por el método del NMP. Las variables pH, salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, fueron determinadas in situ con la ayuda de una sonda multiparámetro (YSI 556 MSP) calibrada previamente.

### 2.3 Análisis multivariado

Para determinar si los valores observados en cada muestra fueron independientes unos de otros, se efectuaron autocorrelaciones espaciales y temporales de los datos de calidad del agua usando análisis espacial y de series de tiempos respectivamente [15-17]. Los cálculos matemáticos se hicieron con Matlab 7.0 (MathWorks) y Excel 2003 (Microsoft Offices), mientras que los estadísticos se procesaron con Statgraphics XV (StatPoint). El análisis multivariado de la calidad del agua en el ACSM y la zona de mezcla del vertimiento del ESSM se realizó mediante las técnicas de Análisis de Componentes principales (ACP) y Clúster [15-17]. El análisis de varianza de doble vía (ANOVA) permitió estimar la variación temporal y espacial [15]. La normalidad y homogeneidad de los datos se examinó aplicando los test de Kolmogorov-Smirnov y Levene, respectivamente. La estructura espacial de los datos fue ilustrada con el método de gridding usando el software SURFER 9 [18].

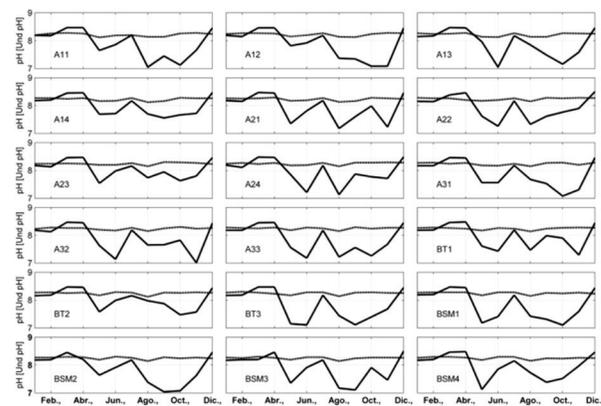
## 3. RESULTADOS

Los estadísticos básicos de calidad del agua en la zona de mezcla del ESSM y las BTySM que resumen 4752 muestras (18 estaciones, frecuencia mensual durante un año, 2 profundidades en la columna de agua y 11 parámetros) se muestran en la Tabla 1 y las figuras 2 y 3. La Tabla 1 presenta los valores máximos y mínimos, la media y la desviación estándar para el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ) y los parámetros que se determinaron analíticamente en el laboratorio (amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), silicatos ( $\text{Si(OH)}_4$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )). La figura 2 representa la variación temporal del pH en el fondo y la superficie de la columna de agua para cada estación de monitoreo, mientras que la figura 3 promedia la variación de la temperatura y la salinidad

de las condiciones de muestreo en la zona de mezcla del ESSM y las BTySM; la densidad fue calculada a partir de la ecuación de estado para agua de mar [19], siguiendo la recomendación de la UNESCO [20].

La ANOVA de dos vías mostró diferencias temporales significativas ( $p < 0.01$ ) en todas las variables estudiadas, exceptuando  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  y Coliformes Totales (CT). El análisis de variación temporal es un indicativo de la renovación de las masas de agua o de la variación de los efectos de las posibles fuentes de contaminantes a las BTySM y la zona de mezcla del ESSM. Los registros de salinidad, temperatura y densidad, muestran una distribución de agua uniforme de diciembre y abril, donde se reporta muy poca diferencia entre los valores en la superficie y el fondo que reflejan condiciones de aguas más frías y con salinidades altas. El resto del año, con una excepción del mes de junio, ocurren aguas con temperaturas elevadas y salinidades bajas. En julio la columna de agua tiende a valores similares a los registrados en la primera época del año (Figura 3). La variación temporal de la temperatura, salinidad y densidad, además de las diferencias entre el fondo y la superficie de la columna de agua, son indicios de renovación de las masas de agua.

El  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si(OH)}_4$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  presentan el mismo patrón temporal, concentraciones altas en julio y los primeros meses del año (de enero a abril); el resto del tiempo los valores tienden a ser bajos. Esta tendencia se conserva en ambos niveles de la columna de agua, siendo los valores del fondo, en general más altos que los registrados en la superficie (ver Figuras de la 4 a la 8).



**Figura 2.** Variación temporal del pH en las 18 estaciones de muestreo. Fondo (línea discontinua), superficie (línea continua)

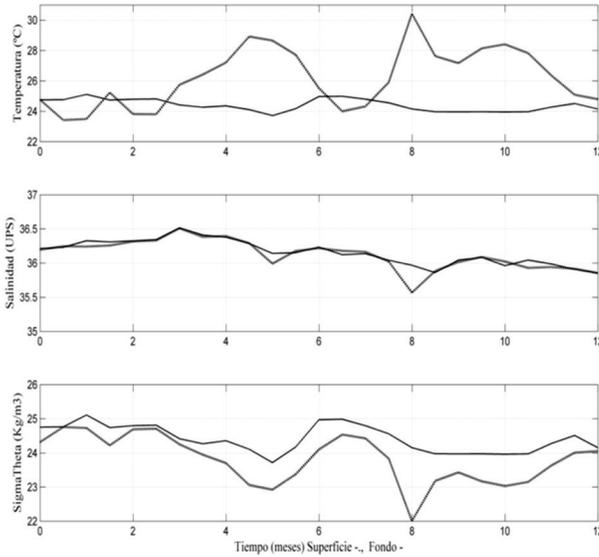


Figura 3. Serie de tiempos de variación de la temperatura, salinidad y densidad. Fondo (línea continua), superficie (línea discontinua)

Tabla 1. Estadísticos básicos de la calidad del agua en la zona de mezcla del ESSA y las BTySM (2009) Parámetros

Estación	Estadístico	Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)		Amonio (µg-NH <sub>4</sub> /L)		Ortofosfatos (µg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)		Silicatos (µg Si(OH) <sub>4</sub> /L)	
		Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie
A11	$\bar{x} \pm DS$	4.576±0.793	4.837±0.942	9.416±4.376	3.209±3.132	2.391±1.991	1.499±1.084	15.818±14.251	18.139 ±13.310
	Max.-Min.	6.155-3.300	6.555-3.340	14.75-2.772	8.35-0.012	5.090-0.062	3.018-0.051	46.64-1.631	49.52-8.491
A12	$\bar{x} \pm DS$	4.492±0.951	4.744±1.117	7.726±3.620	3.572±3.284	2.293±1.835	1.492±1.102	15.398 ±14.536	20.807 ±14.590
	Max.-Min.	6.412-3.200	7.112-3.240	13.21-1.829	8.51-0.125	4.690-0.185	3.202-0.127	51.25-1.808	54.09-8.990
A13	$\bar{x} \pm DS$	4.327±0.753	4.727±0.923	8.149±3.836	4.026±4.052	2.268±2.021	1.386±1.129	22.157 ±20.081	19.421 ±18.174
	Max.-Min.	5.75-3.420	6.174-3.850	13.90-1.535	10.72-0.185	5.150-0.130	3.138-0.044	53.31-1.553	52.88-4.195
A14	$\bar{x} \pm DS$	4.311±0.595	4.719±0.683	8.265±3.836	4.242±4.509	2.268±1.822	1.555±1.227	17.747 ±12.679	24.168 ±18.532
	Max.-Min.	5.084-3.520	5.718-3.660	13.90-1.535	12.96-0.068	4.420-0.190	3.415-0.096	40.40-4.158	56.40-7.871
A21	$\bar{x} \pm DS$	4.181±0.711	4.482±0.775	7.779±4.530	4.853±5.124	2.111±1.733	1.479±1.155	16.628 ±16.038	21.909 ±14.162
	Max.-Min.	5.210-3.000	5.810-3.281	14.90-1.029	12.96-0.232	4.440-0.233	3.405-0.195	52.08-1.312	45.73-9.605
A22	$\bar{x} \pm DS$	4.706±0.726	5.121±0.853	7.836±5.256	4.627±4.642	2.412±2.024	1.469±1.079	13.740 ±12.057	19.427 ±18.174
	Max.-Min.	5.722-3.600	6.622-3.990	14.95-0.719	11.52-0.261	5.370-0.237	3.367-0.232	36.77-1.274	52.88-4.195
A23	$\bar{x} \pm DS$	4.457±0.942	4.826±1.050	8.077±4.181	4.326±4.398	2.014±1.779	1.379±1.199	20.206 ±19.182	12.636 ±12.730
	Max.-Min.	6.351-3.330	6.551-3.560	13.27-0.798	10.47-0.083	4.510-0.138	3.416-0.110	52.85-0.454	46.68-2.757
A24	$\bar{x} \pm DS$	4.456±0.751	4.826±0.928	7.233±3.511	3.928±3.964	2.333±1.884	1.464±1.034	20.929 ±17.859	23.777 ±17.521
	Max.-Min.	5.719-3.650	6.619-3.860	13.65-0.862	9.63-0.196	4.850-0.170	2.835-0.096	55.57-0.356	56.95-8.554
A31	$\bar{x} \pm DS$	4.185±0.891	4.421±0.848	7.659±2.822	3.826±3.608	2.205±1.898	1.476±1.171	18.565 ±15.778	21.015 ±19.696
	Max.-Min.	5.915-3.000	6.015-3.529	12.91-1.675	9.43-0.254	5.250-0.043	3.180-0.001	42.07-0.585	52.99-4.899
A32	$\bar{x} \pm DS$	4.425±1.020	4.820±1.142	6.055±3.323	3.523±3.361	2.319±1.899	1.425±1.062	20.121 ±20.382	16.381 ±9.722
	Max.-Min.	6.381-3.250	7.081-3.517	11.95-1.304	8.31-0.012	5.380-0.110	3.313-0.073	54.72-0.678	45.06-10.490
A33	$\bar{x} \pm DS$	4.721±0.754	5.033±0.889	7.110±4.244	3.530±3.483	2.260±1.817	1.455±1.025	15.834 ±13.160	20.166 ±20.691
	Max.-Min.	5.780-3.720	6.371-3.760	13.02-1.366	8.46-0.204	4.640-0.208	3.167-0.116	39.55-0.512	51.14-1.780
BT1	$\bar{x} \pm DS$	5.247±0.822	5.697±0.985	0.646±0.295	0.793±0.668	1.838±1.431	0.956±0.537	14.797 ±13.079	21.673 ±19.144
	Max.-Min.	6.961-3.980	7.961-4.979	0.99-0.181	2.76-0.169	3.810-0.307	1.746-0.209	42.95-1.275	50.30-2.859
BT2	$\bar{x} \pm DS$	5.220±0.781	5.475±0.757	0.366±0.139	0.482±0.271	1.956±1.507	1.074±0.666	20.466 ±18.772	21.382 ±15.700
	Max.-Min.	6.669-3.990	6.769-4.402	0.52-0.102	0.99-0.174	3.970-0.081	1.940-0.007	46.45-2.123	56.93-10.087
BT3	$\bar{x} \pm DS$	5.193±0.824	5.635±0.949	0.544±0.257	0.554±0.302	1.740±1.063	1.126±0.498	13.914 ±12.317	12.955 ±10.631
	Max.-Min.	6.758-4.010	7.758-5.056	0.96-0.165	1.12-0.178	3.160-0.440	1.976-0.390	41.49-0.625	38.22-4.486
BSM1	$\bar{x} \pm DS$	5.444±0.629	5.865±0.725	0.587±0.297	0.541±0.254	1.900±1.265	1.179±0.538	18.318 ±17.718	13.854 ±13.614
	Max.-Min.	6.21-4.230	7.128-4.918	0.97-0.124	0.92-0.060	3.780-0.361	1.867-0.357	49.82-1.435	47.38-3.735
BSM2	$\bar{x} \pm DS$	5.591±0.834	5.862±0.936	0.448±0.225	0.547±0.324	1.595±1.350	0.863±0.592	20.024 ±16.212	15.886 ±16.885
	Max.-Min.	7.007-4.350	7.544-4.930	0.84-0.099	0.96-0.087	3.760-0.082	1.698-0.054	46.54-2.176	50.65-3.026
BSM3	$\bar{x} \pm DS$	5.505±0.607	5.816±0.718	0.482±0.134	0.630±0.280	1.784±1.343	0.973±0.581	17.692 ±16.242	20.007 ±18.770
	Max.-Min.	6.410-4.601	6.998-5.134	0.74-0.312	1.00-0.126	3.800-0.141	1.753-0.061	43.66-0.412	55.39 ±5.493
BSM4	$\bar{x} \pm DS$	5.788±0.763	6.124±0.781	0.425±0.218	0.408±0.280	1.903±1.562	1.011±0.700	17.059 ±12.071	19.935 ±15.625
	Max.-Min.	7.22-4.530	7.820-5.270	0.85-0.188	0.97-0.110	3.850-0.255	1.818-0.169	40.08-4.480	53.63-7.787
Estación	Estadístico	Nitritos (µg-NO <sub>2</sub> /L)		Nitratos (µg-NO <sub>3</sub> /L)		Col. Fecales (UFC/100 ml)		Col. Totales (UFC/100 ml)	
		Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie
A11	$\bar{x} \pm DS$	0.624 ±0.272	0.463 ±0.340	2.693 ±0.738	1.745 ±1.324	8120±3215	185±178	11553.33±5721.52	24±229
	Max.-Min.	0.98-0.176	0.97-0.054	3.49-1.251	3.88-0.241	12000-1440	480-18	20268-1760	676-30
A12	$\bar{x} \pm DS$	0.419 ±0.277	0.314 ±0.293	2.620 ±0.794	1.526 ±1.123	9493±4916	190±184	14218.83±9026.75	267±241
	Max.-Min.	0.79-0.010	0.90-0.020	3.68-1.145	3.52-0.166	16000-2720	644-50	31224-3552	916-74
A13	$\bar{x} \pm DS$	0.556 ±0.274	0.386 ±0.309	2.302 ±0.927	1.585 ±1.354	8062±3970	200±151	10562.00±4780.77	326±266
	Max.-Min.	0.95-0.215	0.98-0.048	3.81-1.131	3.89-0.193	14000-1400	462-14	17254-2192	860-18
A14	$\bar{x} \pm DS$	0.599 ±0.282	0.535 ±0.240	2.850 ±0.752	1.396 ±1.008	4807±2312	138±76	6933.50±3618.248	208±102
	Max.-Min.	0.89-0.004	0.90-0.139	3.53-1.179	3.16-0.014	8000-1600	320-40	14654-1836	388-58

Estación	Estadístico	Oxígeno (mg O <sub>2</sub> /L)		Amonio (µg-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)		Ortofosfatos (µg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)		Silicatos (µg Si(OH) <sub>4</sub> /L)	
		Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie	Fondo	Superficie
A21	$\bar{x} \pm DS$	0.481 ± 0.275	0.373 ± 0.214	2.250 ± 0.953	1.863 ± 1.460	637 ± 328	17 ± 11	1082.333 ± 688.929	26 ± 15
	Max - Min	0.95-0.031	0.80-0.122	3.96-1.015	3.81-0.240	1200-204	34-2	2358-236	46-4
A22	$\bar{x} \pm DS$	0.608 ± 0.303	0.452 ± 0.300	2.366 ± 0.877	1.341 ± 1.174	902 ± 614	26 ± 18	1283.000 ± 894.025	39 ± 22
	Max - Min	0.98-0.001	0.90-0.139	3.88-1.331	3.69-0.139	1800-234	74-10	2624-284	82-12
A23	$\bar{x} \pm DS$	0.359 ± 0.292	0.477 ± 0.326	2.841 ± 0.934	1.513 ± 1.313	528 ± 309	13 ± 8	843.833 ± 593.670	19 ± 11
	Max - Min	0.98-0.021	0.98-0.001	3.98-1.326	3.56-0.136	1000-110	24-2	1868-168	364-5
A24	$\bar{x} \pm DS$	0.620 ± 0.276	0.388 ± 0.257	2.513 ± 0.779	1.702 ± 1.243	348 ± 161	10 ± 5	504.833 ± 278.553	17 ± 9
	Max - Min	0.98-0.154	0.85-0.003	3.54-1.144	3.64-0.475	600-72	16-2	1054-104	30-4
A31	$\bar{x} \pm DS$	0.384 ± 0.342	0.436 ± 0.270	2.691 ± 0.691	1.636 ± 1.311	3873 ± 1728	116 ± 97	6175.50 ± 2577.531	184 ± 157
	Max - Min	0.98-0.154	0.80-0.056	3.46-1.144	3.81-0.223	7000-1400	340-6	10104-1886	508-10
A32	$\bar{x} \pm DS$	0.545 ± 0.285	0.273 ± 0.167	2.610 ± 0.973	1.803 ± 1.519	242 ± 131	8 ± 5	325.167 ± 178.200	15 ± 9
	Max - Min	1.00-0.067	0.49-0.022	3.89-1.174	4.00-0.041	400-64	18-2	618-102	30-4
A33	$\bar{x} \pm DS$	0.683 ± 0.227	0.342 ± 0.247	2.271 ± 0.619	1.571 ± 1.004	474 ± 287	17 ± 14	754.167 ± 557.360	25 ± 23
	Max - Min	0.95-0.210	0.78-0.009	3.15-1.205	3.21-0.573	1000-150	48-2	1900-172	86-4
BT1	$\bar{x} \pm DS$	0.683 ± 0.227	0.344 ± 0.297	2.837 ± 0.908	1.742 ± 1.314	1138 ± 1516	425 ± 675	1804.50 ± 2482.148	563 ± 895
	Max - Min	0.95-0.210	0.85-0.000	3.93-1.309	3.98-0.508	3600-4	1962-2	6732-8	2400-4
BT2	$\bar{x} \pm DS$	0.510 ± 0.305	0.393 ± 0.265	2.247 ± 0.824	1.397 ± 1.041	18 ± 34	12 ± 23	27.000 ± 49.540	19 ± 34
	Max - Min	0.85-0.084	0.86-0.005	3.69-1.006	2.99-0.021	100-0.04	76-2	156-2	118-4
BT3	$\bar{x} \pm DS$	0.560 ± 0.276	0.406 ± 0.266	2.205 ± 0.842	1.912 ± 1.587	19 ± 34	10 ± 18	26.167 ± 41.713	16 ± 28
	Max - Min	0.99-0.133	0.70-0.002	3.81-1.042	3.90-0.079	100-0.02	54-2	124-2	78-4
BSM1	$\bar{x} \pm DS$	0.480 ± 0.273	0.359 ± 0.259	2.453 ± 0.791	1.171 ± 1.094	20 ± 47	17 ± 33	32.500 ± 76.197	30 ± 62
	Max - Min	0.82-0.055	0.89-0.010	3.49-1.281	3.91-0.149	160-0.02	108-2	264-2	214-4
BSM2	$\bar{x} \pm DS$	0.535 ± 0.245	0.445 ± 0.239	2.393 ± 0.900	1.598 ± 1.166	627 ± 899	211 ± 330	868.167 ± 1181.275	275 ± 415
	Max - Min	0.91-0.146	0.80-0	3.65-1.161	3.35-0.194	3000-6	926-2	3874-12	1184-4
BSM3	$\bar{x} \pm DS$	0.392 ± 0.336	0.480 ± 0.235	2.592 ± 0.848	1.690 ± 1.240	20 ± 23	11 ± 15	28.333 ± 30.485	18 ± 22
	Max - Min	0.92-0.011	0.78-0.145	3.63-1.216	3.29-0.074	60-0.32	46-2	78-2	64-4
BSM4	$\bar{x} \pm DS$	0.605 ± 0.227	0.458 ± 0.255	2.379 ± 0.814	1.570 ± 1.330	232 ± 355	79 ± 135	370.500 ± 553.066	124 ± 224
	Max - Min	0.89-0.169	0.77-0.062	3.90-1.072	3.99-0.082	992-4-2	408-2	1476-4	702-4

estadísticos descriptivos (= promedio, DS= desviación típica, Max-Min= rango de variación) de las variables analizadas.

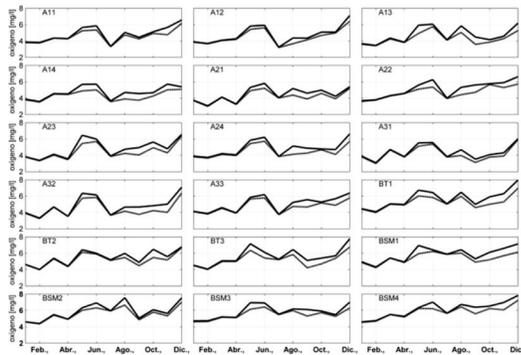


Figura 4. Variación temporal de O<sub>2</sub> (mg/L)

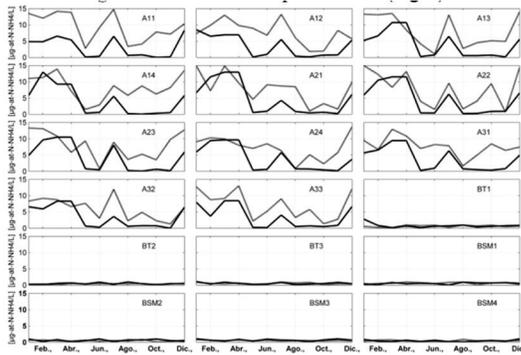


Figura 5. Variación temporal de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (µg/L)

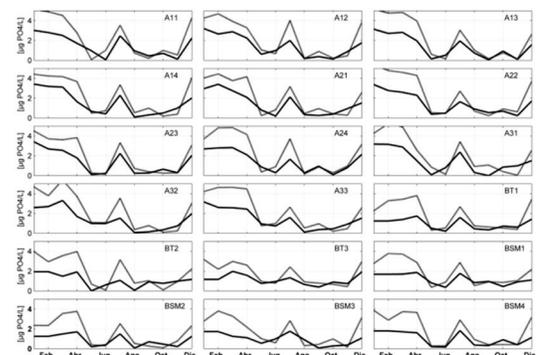


Figura 6. Variación temporal de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (µg/L)

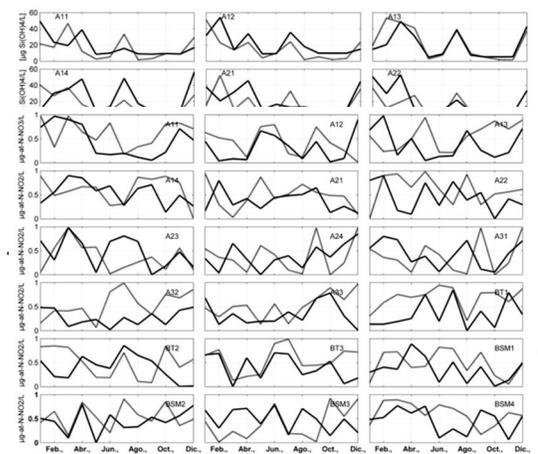
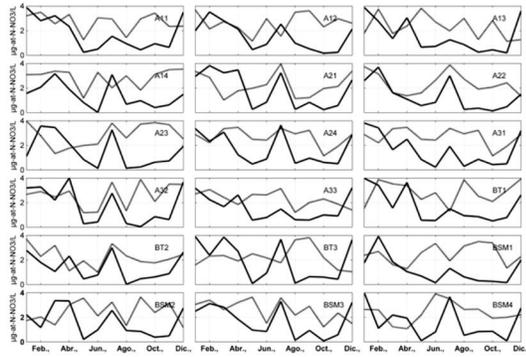


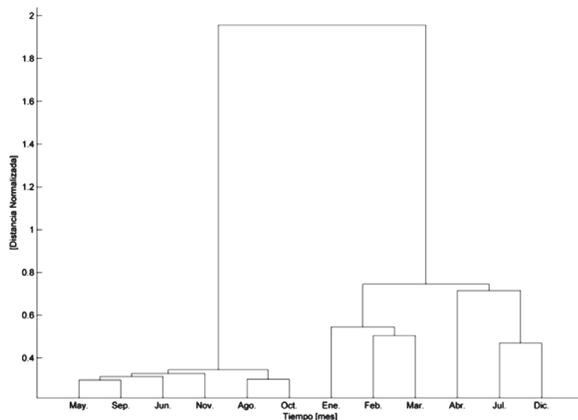
Figura 8. Variación temporal de NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (µg/L).



**Figura 9.** Variación temporal de  $\text{NO}_3^-$  ( $\mu\text{g/L}$ ).

Los niveles más bajos de la concentración de oxígeno desueto se registran en los primeros meses del año y en julio. Los valores reportados en este periodo están entre 4 y 5mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , que se incrementan de agosto a noviembre hasta 8mg  $\text{O}_2/\text{L}$ . Los niveles de  $\text{O}_2$  en el fondo de la columna de agua tienden a ser inferiores a los registrados en la superficie.

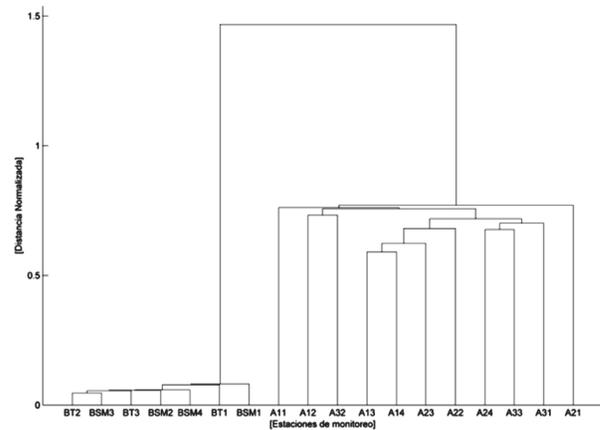
El patrón de variación temporal que reflejan los parámetros pH,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{O}_2$  permiten determinar dos épocas del año en las cuales la calidad del agua es diferente. El análisis clúster (AC) basado en estas variables, incluyendo los Coliformes Fecales (CF) que también mostró diferencias temporales significativas, confirman la presencia de estos dos periodos de variación temporal. Para la aplicación del AC, los parámetros fueron normalizados dividiendo las concentraciones de muestras individuales por el máximo valor reportado ( $C_i/C_{\text{max}}$ ) dadas las discrepancias en el orden de magnitud de los registros entre los parámetros considerados [17]. Los resultados se muestran en la figura 10.



**Figura 10.** Dendrograma del AC de los 12 periodos mensuales y 8 parámetros.

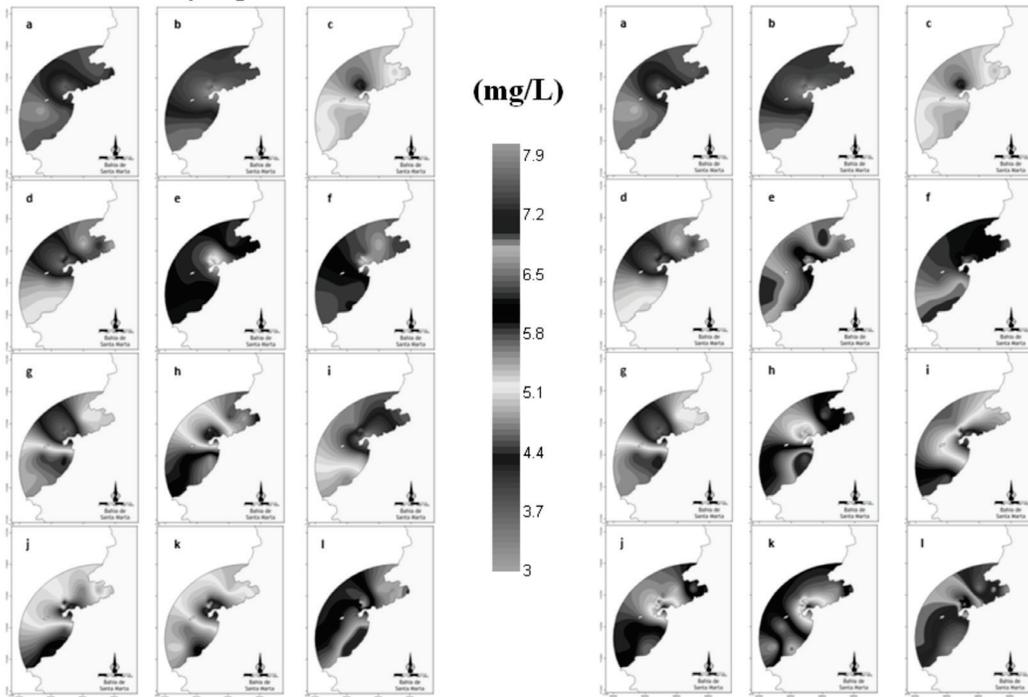
De diciembre y abril, se registran las concentraciones más altas de estos parámetros, exceptuando el  $\text{O}_2$ . En el periodo de concentraciones altas se incluye igualmente julio. En los meses de mayo, junio, agosto – noviembre, se registran valores bajos de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y CF, coincidiendo con valores más altos de  $\text{O}_2$ .

La ANOVA de dos vías mostró diferencias espaciales significativas en las concentraciones del  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , CF y Coliformes Totales (CT). Al someter estos parámetros al AC, se encontraron dos clúster, en el primero, se encuentran las 11 estaciones cercanas a la descarga del ESSM (A11, A12, A13, A14, A21, A22, A23, A24, A31, A32 y A33). Este grupo se caracteriza por presentar concentraciones altas. En el segundo grupo están las estaciones localizadas en las BTySM, (BT1, BT2, BT, BSM1, BSM2, BSM3 y BSM4), las concentraciones de los parámetros tienden a ser menores, en este grupo. Los resultados del AC para el examen de la variación espacial se muestran en la figura 11.

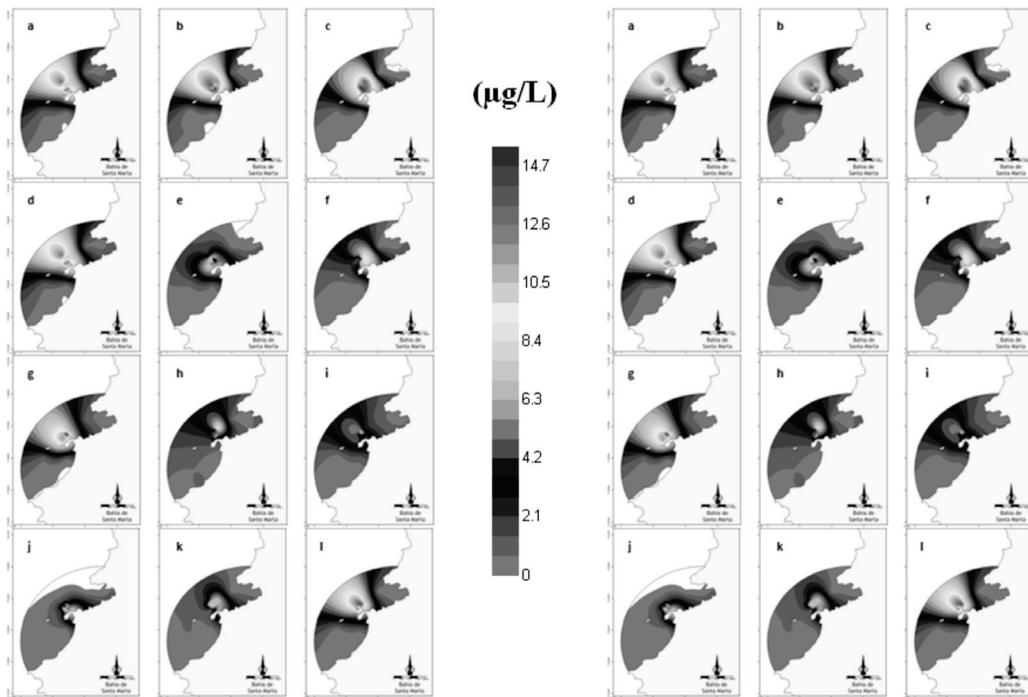


**Figura 11.** Dendrograma del AC de los 18 estaciones de muestreo y 5 parámetros.

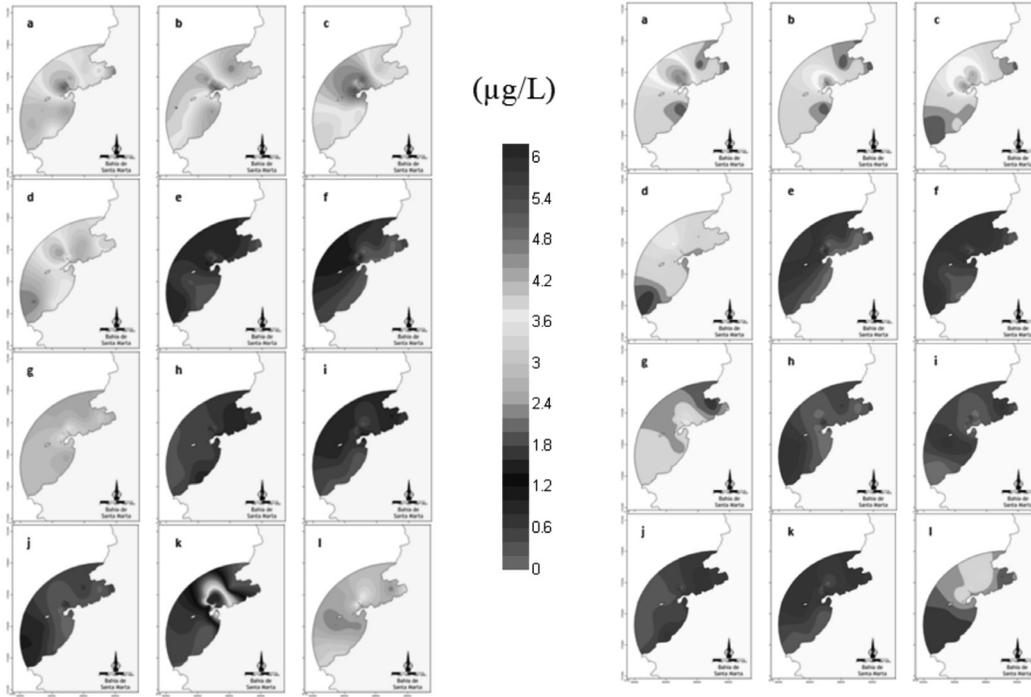
El análisis espacial de las concentraciones de  $\text{O}_2$  evidencia dos zonas claramente definidas. La primera zona esta en las inmediaciones de la descarga del ESSM, sus niveles pueden llegar hasta 3mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , valores que se incrementan en las estaciones de las BTySM que representan la segunda zona (ver Figura 12). Al graficar las isoconcentraciones de  $\text{NH}_4^+$  (Figura 13) y  $\text{PO}_4^{3-}$  (Figura 14) se advierte la presencia de las mismas zonas homogéneas reportadas en el AC y las isoconcentraciones de  $\text{O}_2$ . Las concentraciones altas para estos parámetros ocurren en las cercanías a la descarga del emisario.



**Figura 12.** Variación espacial de la concentración de  $O_2$  (mg  $O_2/L$ ) en el fondo (Derecha) y la superficie (Izquierda) de la columna de agua a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre, l) Diciembre.



**Figura 13.** Variación espacial de la concentración de  $NH_4^+$  (mg /L) en el fondo (Derecha) y la superficie (Izquierda) de la columna de agua a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre, l) Diciembre.



**Figura 14.** Variación espacial de la concentración de  $PO_4^{3-}$ , (Derecha) y la superficie (Izquierda) de la columna de agua a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril e) Mayo, f) Junio, g) Julio, h) Agosto, i) Septiembre, j) Octubre, k) Noviembre, l) Diciembre.

La matriz de correlación de Pearson (Tabla 2) fue usada para determinar las relaciones entre los parámetros analizados, tanto los fisicoquímicos como los microbiológicos además de la salinidad y la temperatura. La influencia de las aguas marinas en las bacterias entéricas fue confirmada por la correlación negativa entre los coliformes totales y la salinidad ( $r=-0.21, p<0.05$ ) y los coliformes fecales y

la salinidad ( $r=-0.32, p<0.05$ ). La correlación negativa entre la temperatura y los coliformes totales y fecales indican la probable influencia de este parámetro en la supervivencia de los microorganismos. La descarga de aguas residuales domésticas se evidencian por la correlación positiva y significativa entre los coliformes totales y fecales y el amonio.

**Tabla 2.** Correlación entre parámetros analizados

	CT	CF	Amonio	Fosfatos	Nitratos	Nitritos	pH	Silicatos	Oxígeno	Salinidad	Temperatura
CT											
CF	<u>0.976*</u>										
Amonio	<u>0.309*</u>	<u>0.327*</u>									
Fosfatos	<u>0.136*</u>	<u>0.140*</u>	<u>0.619*</u>								
Nitratos	<u>0.198*</u>	<u>0.205*</u>	<u>0.369*</u>	<u>0.414*</u>							
Nitritos	0.052	0.070	0.080	<u>0.115*</u>	<u>0.168*</u>						
pH	<u>0.141*</u>	<u>0.142*</u>	<u>0.420*</u>	<u>0.448*</u>	<u>0.666*</u>	<u>0.234*</u>					
Silicatos	-0.033	-0.031	<u>0.374*</u>	<u>0.636*</u>	<u>0.381*</u>	0.063	<u>0.398*</u>				
Oxígeno	<u>-0.181*</u>	<u>0.198*</u>	<u>-0.509*</u>	<u>-0.441*</u>	<u>-0.331*</u>	-0.062	<u>-0.268*</u>	<u>-0.253*</u>			
Salinidad	<u>-0.21*</u>	<u>-0.32*</u>	<u>0.309*</u>	<u>0.502*</u>	<u>0.292*</u>	0.062	<u>0.379*</u>	<u>0.355*</u>	<u>-0.316*</u>		
Temperatura	<u>-0.178*</u>	<u>-0.182*</u>	<u>-0.392*</u>	<u>-0.564*</u>	<u>-0.555*</u>	<u>-0.141*</u>	<u>-0.579*</u>	<u>-0.376*</u>	<u>0.392*</u>	<u>-0.530*</u>	

Valores subrayados indican correlaciones significativas, con un nivel de confianza del 95.0%. \* Valor-P < 0.05

La técnica de ACP aplicada a los datos obtenidos en superficie y fondo permite precisar las principales fuentes de variabilidad del sistema. Del ACP se extraen tres componentes que juntos explican el 66.23% de la variabilidad total del sistema. El primer factor explicó el 38,59% de la variabilidad del sistema y esta correlacionado positivamente con la mayoría de las variables de estudio, exceptuando el oxígeno y la temperatura. Este factor nos ayuda a diferenciar la variabilidad dadas dos condiciones: aguas cálidas y ricas en oxígeno sin presencia de materia orgánica o mezcla de aguas residuales y aguas frías con materia orgánica, contenido alto de nutrientes y mezcla de aguas residuales domésticas. Las aguas frías son propias de masas de aguas de surgencia, mientras que las aguas más cálidas están asociadas con las masas de agua de la contracorriente Colombia [21]. El factor 1 está asociado a los patrones de circulación termohalinas del área de estudio. El segundo factor explica el 17.68% de la variación del sistema y permite diferenciar aguas con una mezcla importante de aguas residuales de origen doméstico, de aguas con una importante concentración de materia orgánica y nutrientes. El tercer factor al explicar el 9.97% de la variación, es menos significativo, separara las condiciones del fondo de la columna de agua frente a la superficie. Los resultados del ACP en los planos factoriales I y II, se muestra en la Figura 15, mientras que los pesos de los componentes correlacionados con las variables estudiadas se presentan en Tabla 3.

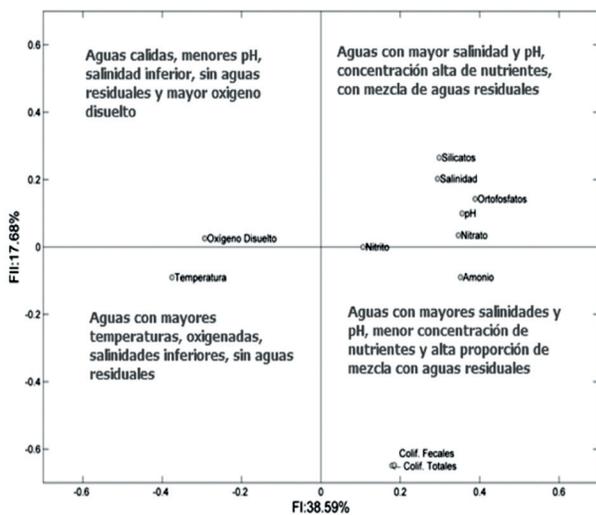


Figura 15. Puntajes del primer y segundo componente principal

Tabla 3. Pesos de los componentes

Variable	Componente 1	Componente 2	Componente 3
CT	0.179	-0.648	-0.009
CF	0.184	-0.647	-0.006
Amonio	0.351	-0.090	-0.263
Fosfatos	0.388	0.142	-0.226
Nitratos	0.346	0.034	0.318
Nitritos	0.106	-0.0001	0.711
pH	0.355	0.099	0.362
Silicatos	0.297	0.265	-0.149
Oxígeno	-0.292	0.025	0.298
Salinidad	0.293	0.202	-0.131
Temperatura	-0.375	-0.090	-0.105

#### 4. CONCLUSIONES

Los análisis de variación temporal permitieron diferencias; dos épocas del año en los cuales la calidad del agua es diferente. En el primer periodo que comprenden los meses entre diciembre y abril e incluye igualmente el mes de julio, las concentraciones de los parámetros que mostraron diferencias temporales estadísticamente significativas (pH,  $\text{NH}_4^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si(OH)}_4$ ,  $\text{NO}_2^-$ , y  $\text{NO}_3^-$ ) son mayores; el resto del año se registra un descenso en sus valores. En este grupo está también el  $\text{O}_2$  y los CF. El comportamiento del  $\text{O}_2$  es inverso al mostrado por las otras variables. Los CF presentan una variabilidad más fuerte asociada con el criterio espacial, su patrón temporal, no es fácilmente definible con las herramientas usadas aunque sí mostró diferencias temporales significativas.

Las concentraciones de  $\text{O}_2$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^-$ , CF y CT, mostraron variación espacial significativa ( $p < 0.05$ ). Ellos permiten diferenciar dos zonas dados los niveles de concentración de los parámetros analizados. La calidad de agua en estas está relacionada con la cercanía al emisario submarino.

Las técnicas estadísticas aplicadas al análisis de la variación espacial y temporal de la concentración de los parámetros medidos en la zona costera de Santa Marta, permite definir que los procesos de alteración de la calidad del agua registrados en las BTySM no tienen relación con la disposición final de aguas residuales realizadas por el emisario submarino.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y las universidades del Magdalena y de Antioquia por la financiación brindada para la ejecución de este estudio

## REFERENCIAS

- [1] Fang, T. H., Hwang, J., Hsiao, S. and Chen, H., Trace metals in seawater and copepods in the ocean outfall area off the northern Taiwan coast, *Marine Environmental Research*, 61, pp. 224–243, 2006.
- [2] Bay, S. M., Zeng, E. Y., Lorenson, T. D., Tran, K. and Alexander, C., Temporal and spatial distributions of contaminants in sediments of Santa Monica Bay, California, *Marine Environmental Research*, 56, pp. 255–276, 2003.
- [3] Bothner, M. H., Casso, M. A., Rendigs, R. R. and Lamothe, P. J., The effect of the new Massachusetts Bay sewage outfall on the concentrations of metals and bacterial spores in nearby bottom and suspended sediments, *Marine Pollution Bulletin*, 44, pp. 1063–1070, 2002.
- [4] Kim, Y., Kang, S., Seo, W. and Oh, B., Far-field Transport of Effluent Plumes Discharged from Masan Sea Outfalls. *Ocean Research*, 22(2), pp. 69-80, 2000
- [5] Kang, S. W., Oh, W., Park, K. and You, S., Near-field Dilution of Wastewater Effluents Discharged from Submerged Ocean Outfalls in Masan Bay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 3(4), pp. 395-405, 1999.
- [6] Sadiq, M., Metal contamination in sediments from a desalination plant effluent outfall area. *The Science of the Total Environment*, 287, pp. 37–44, 1999.
- [7] Escobar, A., Estudio de algunos aspectos ecológicos y de la contaminación bacteriana en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano, *An. Inst. Inv. Mar.*, 18, pp. 39-57, 1988.
- [8] Gámez, J., Impacto sobre las aguas costeras adyacentes al Emisario Submarino de Santa Marta (D.T.C.H), Caribe colombiano [tesis de grado]. Riohacha, Universidad de La Guajira, 2002.
- [9] Ramírez, G., Características físico-químicas de la bahía de Santa Marta. (Agosto 1980 - Julio 1981), *An. Inst. Inv. Mar Punta Betín*, 13, pp. 111-21, 1983.
- [10] Koop, K. and Hutchings, P., Disposal of sewage to the ocean – a sustainable solution?. *Marine Pollution Bulletin*, 33, pp. 7–12, 1996.
- [11] Babu, M.T., Das, K. and Vethamony, P., BOD–DO modeling and water quality analysis of a waste water outfall off Kochi, west coast of India. *Environment International*, 32, pp. 165 – 173, 2006.
- [12] Miller, B., Peirson, W., Wang, Y. and Cox, J., An Overview of Numerical Modelling of the Sydney Deepwater Outfall Plumes, *Marine Pollution Bulletin*, 33(7-12), pp. 147-159, 1996.
- [13] Roberts, P. J. W., Modeling Mamala bay outfall plumes. I: Near field, II: Far field. *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(6), pp. 564-583, 1999.
- [14] Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. and Eaton, A. D., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th. Ed., American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), Washington, DC. 1998.
- [15] Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., Baig, J. A. and Shah, A. Q., Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotox. Environ. Safe.*, 72 (20), pp. 301-309, 2009.
- [16] Pejman, H., Bidhendi, G., Karbassi, A., Mehrdadi, A. and Bidhendi, M., Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 6 (3), pp. 467-476, 2009.
- [17] Bu, H., Tan, X., Li, S. and Zhang, Q., Temporal and spatial variations of water quality in the Jinshui River of the South Qinling Mts., China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, pp. 907–913, 2010.
- [18] Solidoro, C., Pastres, R., Cossarini, G. and Ciavatta, S., Seasonal and spatial variability of water quality parameters in the lagoon of Venice, *J. Mar. Syst.*, 51, pp. 7–18, 2004.
- [19] Fofonoff, P. and Millard, R., Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, *Unesco technical papers in marine science*. París, Francia, 1983.
- [20] UNESCO. Processing of oceanographic station data. *Unesco technical papers in marine science*. París, Francia, 1999.
- [21] Garcia, F.F., Palacio, C. y Garcia, U., Distribución vertical de temperatura y salinidad en el área costera de Santa Marta (Colombia). *Dyna*, 171, pp. 232-238, 2012.