

Reporte del estado de la Bahía de Asunción en los meses de diciembre 2016 y marzo 2017 respecto de la situación fisicoquímica del sedimento y elutriado*

Report of the Asuncion Bay status during the months of December 2016 and March 2017 in regard to the physical-chemical conditions of the sediment and elutriate*

Hajime G. Kurita^{1,3,4}, Gustavo Godoy^{1,3}, Mónica Benítez¹, César Vian¹, Martha S. Ávila¹, Rocío Vega¹, Juan Guillén¹, Hernán Caballero¹, Leónida Medina², Deidamia Franco¹

*Reporte basado en el Informe Técnico Final del proyecto 14-INV-342 presentado al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología del Paraguay en el año 2017.

¹Afiliación durante el desarrollo del proyecto: Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, San Lorenzo, Paraguay.

²Dpto. de Investigación y Desarrollo -Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN). Asunción, Paraguay.

³Autores que contribuyeron directamente para el manuscrito.

⁴Autor de correspondencia, guillekurita@gmail.com. ORCID: 0000-0002-2621-0482.

Resumen: La Bahía de Asunción ha sufrido considerables modificaciones en los últimos años acompañando el crecimiento de la ciudad. Sin embargo, estudios sistematizados de la calidad del agua son aún una materia pendiente para el Estado. Para contribuir con conocimientos del estado de la Bahía, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos en dos periodos de muestreos en los años 2016 y 2017 (diciembre y marzo respectivamente). Se llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos del sedimento, elutriado y agua superficial. Para ello se tuvieron en cuenta 9 puntos de muestreo. En total se realizaron 14 determinaciones para el agua de elutriado, 1 para agua superficial y 6 para sedimento. Los resultados para el agua de elutriado arrojaron 7 datos fuera del rango permitido en al menos una campaña, entre ellos el nitrógeno amoniacal, DBO5, DQO, plomo y los valores de coliformes fecales. En cuanto al sedimento, se encontraron valores altos de fósforo superando al nitrógeno y se observó que los metales pesados cromo y plomo se hallaban en una concentración mayor en el agua de elutriado.

Palabras clave: calidad de aguas, Bahía de Asunción, sedimento, elutriado, aguas superficiales.

Abstract: Asuncion Bay has been altered in the past years to follow the growth of the city. However, historically there have been no systematic studies of water quality. Here we present a chapter of a larger report presented to the CONACYT. In this manuscript, we present the results of the analysis of the physical-chemical aspect of the sediment, the elutriate and water from two sampling campaigns done during 2016 and 2017 (March and December, respectively). Nine samples were taken in total. The analysis consisted of 14 determinations for the elutriate, 1 for sediment and 6 for sediment. For the elutriate, 7 determinations (Nitrogen, COD, BOD, lead, and fecal coliforms) were out of the permissible values, according to the current regulation. In the sediment, phosphorous was higher than nitrogen, and heavy metal was higher than the elutriate.

Key words: water quality, Asuncion Bay, sediment, elutriate, superficial water

Introducción

La Bahía de Asunción ha sufrido considerables modificaciones en los últimos años acompañando el crecimiento vial de la ciudad capital. Estas intervenciones posiblemente han hecho que algunos parámetros fisicoquímicos y biológicos de la bahía fueran alterados. Sin embargo, estos parámetros al no tener un valor histórico de referencia son difíciles de cuantificar y evaluar los daños que eventualmente se podrían estar ocasionando al cuerpo de agua.

En el Paraguay, la ley 3.239 de los Recursos Hídricos en el artículo 3 inciso c reza que “*Los recursos hídricos poseen usos y funciones múltiples y tal característica deberá ser adecuadamente atendida, respetando el ciclo hidrológico, y favoreciendo siempre en primera instancia el uso para consumo de la población humana*”. Por lo tanto, el estado paraguayo reconoce la importancia de mantener los cuerpos de aguas. Esto se ve reflejado también en la firma y adopción de convenios para la preservación

Recibido: 18/09/2020 Aceptado: 21/09/2020



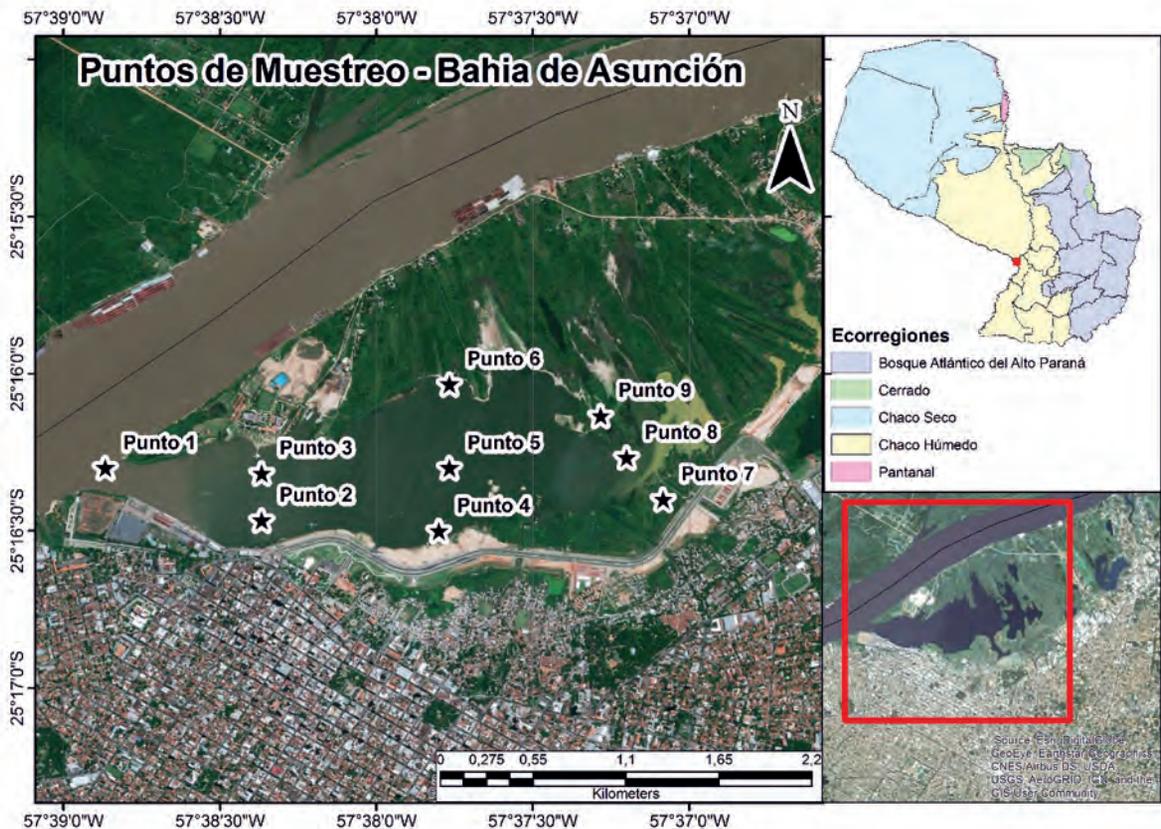


Figura 1. Área de estudio.

de estos (i.e. el marco normativo ambiental).

Por ello es importante y urgente la implementación de programas de monitoreo constante de la bahía, atendiendo las intervenciones humanas para el desarrollo de obras públicas.

En este reporte, ponemos a disposición los resultados de análisis fisicoquímicos obtenidos en el proyecto financiado por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (CONACYT) bajo el código 14-inv-342 llevado a cabo durante los años 2016 y 2017.

Materiales y métodos

Área de Estudio. El espejo de agua que representa la Bahía de Asunción fue dividido en forma arbitraria en cuatro Zonas horizontales (1 al 4) para el estudio. Las Zonas abarcan desde la costa de la Avenida Costanera al sur y al norte hacia el club Mbigua (Figura 1). Para la toma de muestra en

cada Zona se tuvieron cuenta un total de 9 puntos detallados a continuación. Zona 1 que incluye a los puntos de muestreo 2, 4 y 7 y comprende el área más próxima al límite sur. Esta orilla está marcada por la Avenida Costanera de unos 4 km de longitud. La Zona 2 incluye a los puntos de muestreo 5 y 8 y corresponde a la parte media del cuerpo de agua. En la Zona 3 se encuentran los puntos de muestreo 3, 6 y 9, y por último la Zona 4 conformada por el punto 1 de muestreo, que es el área que corresponde a la entrada a la bahía y único contacto con el río Paraguay (Tabla 1).

Obtención de muestras. La colecta de sedimento se realizó en los nueve puntos descritos anteriormente y especificados en la Tabla 1.

De cada punto se tomaron muestras mediante el uso de una draga Van Veen para 5 kg de capacidad. Para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos los sedimentos fueron colectados en bolsas de plás-

Tabla 1. Zonificación y coordenadas muestreadas.

Zona	Punto de muestreo	Coordenadas	
1	P2	25°16'28" S	57°38'22"O
	P4	25°16'30" S	57°37'48"O
	P7	25°16'24" S	57°37'5"O
2	P5	25°16'18" S	57°37'46"O
	P8	25°16'16" S	57°37'12"O
3	P3	25°16'19" S	57°38'22"O
	P6	25°16'2" S	57°37'46"O
4	P9	25°16'8" S	57°37'17"O
	P1	25°16'18" S	57°38'52"O

tico y para el análisis de grasas y aceites en frascos de vidrios. Las muestras fueron luego transferidas a envases de plástico previamente etiquetados. Todas las muestras fueron depositadas y transportadas hasta el laboratorio en conservadoras refrigeradas con hielo.

Las fechas de muestreos fueron en los meses de diciembre del año 2016 y marzo de 2017, que corresponden a las campañas 1 y 2 respectivamente.

Análisis fisicoquímicos. Para los análisis laboratoriales se realizaron muestras compuestas mezclando de forma proporcional el sedimento de los puntos correspondientes a cada Zona del área bajo estudio, excepto la Zona 4 que cuenta con un solo punto (P1). Así, se obtuvieron cuatro muestras de sedimento crudo.

Para la obtención del elutriado, la metodología se basó en el protocolo seguido por dos Santos (Santos, 2008) con modificaciones. En un recipiente de vidrio de 5L se mezcló una parte de sedimento crudo (250gr.) con cuatro partes de agua destilada (1L). La mezcla fue agitada por 30 minutos luego fue dejada en reposo por un período de 24 h para su decantación. Al cabo de ese tiempo, el sobrenadante o elutriado fue extraído con cuidado para levantar el mínimo de material particulado utilizando una jeringa de 50cc con sonda de plástico.

Los análisis laboratoriales fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Los parámetros analizados se detallan en la Tabla 2. Debido a que en el país no existe una referencia para determinaciones de elutriado o de sedimento, los resultados fueron contrastados con la Resolución 222/02 de la normativa vigente para calidad de agua superficial.

Resultados

En ambas campañas de muestreo se obtuvieron muestras de agua superficial y sedimento para todos los puntos especificados.

En total se realizaron 14 determinaciones para el agua de elutriado y 1 para agua superficial (Tabla 2), y 6 para sedimento (Tabla 3).

Agua superficial. Para esta matriz fue analizada la presencia de grasas y aceites teniendo en cuenta las referencias para aguas de Clase 2 y estas arrojaron valores menores a 0,5 mg/L, excepto para la Zona 3 con valores de 0,770 mg/L.

Agua de elutriado. Todas las determinaciones fueron posibles para ambas campañas. Del total de 14 ensayos, 7 resultaron con valores superiores a lo establecido por la Resolución 222/02. De entre estos valores superiores a la referencia, la turbiedad, nitrógeno amoniacal (N-Amoniacal), DBO5 y coliformes fecales pasaron el máximo permisible en ambas campañas (Tabla 2). Nitrito sólo arrojó valores no permisibles en la Zona 4 de la segunda campaña. De entre los metales, todos sobrepasaron los niveles en al menos una campaña, y en todos los puntos de muestreo.

Sedimento. En total fueron realizadas 6 determinaciones para todos los puntos y campañas (Tabla 3).

Discusión

Para este estudio se tomaron 14 determinaciones para el análisis fisicoquímico para el agua de elutriado y 1 para agua superficial. En cuanto a las determinaciones para sedimento, un total de 6 parámetros fueron escogidos (Tablas 2 y 3 respectivamente).

Tabla 2. Resultados laboratoriales del agua de Elutriado. **UpH)** unidad de pH. **UTN)** unidad Nefelométrica de turbiedad. **mg/L)** miligramos por litro. **mgO₂/L)** miligramo de oxígeno por litro. **UFC)** unidades formadoras de colonias.

		Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4		
Campaña		1	2	1	2	1	2	1	2	Unidad
Determinaciones	pH	6,34	6,68	6,75	7,21	6,94	7,16	6,51	6,63	UpH
	Turbiedad	3,697	14,13	17,99	2,158	5,55	1,667	2,341	2,456	UTN
	Nitrato	0,04	0,06	0,02	0,04	0,02	<0,01	0,03	0,14	mg/L
	Nitrito	0,10	0,81	0,20	0,52	0,14	0,33	0,20	1,64	mg/L
	N-Amoniacal	0,21	0,89	0,25	0,96	0,16	0,46	0,32	1	mg/L
	Sulfato	0,30	23,80	0,30	52,10	0,30	34,50	0,30	5,56	mg/L
	Dureza Total	41,71	14,14	38,80	17,20	33,95	49,50	27,16	16,20	mg/L
	D.B.O. 5-20° C	108	870	252	840	252	840	78	870	mgO ₂ /L
	D.Q.O.	377,36	1.463,42	691,82	1.254,36	628,93	1.324,04	251,57	1,392	mgO ₂ /L
	Cadmio	0	0,01	0	0	0	0	0	0,01	mg/L
	Cromo (+6)	0,06	<0,001	0,01	<0,001	0,01	<0,001	0,00	<0,01	mg/L
	Plomo (Pb)	0,13	0,07	0,06	0,05	0,11	<0,01	0,06	<0,01	mg/L
	Coliformes Totales, en 100mL	18	11	4	2,5	420	77	36	143	UFC
	Coliformes Fecales, en 100mL	5,6	26,4	1,6	440	168	14	12	35,2	UFC
Grasas y Aceites	<0,5		<0,5		0,77		<0,5		mg/L	

Estas determinaciones corresponden a los parámetros comúnmente utilizados en estudios de calidad de aguas superficiales, y se encuentran entre los parámetros establecidos por la Resolución 222/02 de la Secretaría del Ambiente (actualmente Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADES). Se optó por tomar como referencia esta Resolución debido ya que no se cuenta con parámetros específicos para agua de elutriado y tampoco para sedimentos.

Por lo tanto, los valores no son comparables directamente para clasificar o determinar el estado de la calidad de las matrices analizadas. Si no, simplemente como una base para las comparaciones y como punto de partida para futuros análisis. A continuación, se discuten algunos parámetros importantes e interesantes desde el punto de vista para

la evaluación de la calidad de la bahía de asunción entre campañas y Zonas.

Agua de Elutriado

Este método de elaboración de fluido a partir del sedimento, al alterar la estructura de la matriz sólida, representa una forma de perturbación. Los contaminantes están en íntima relación con la superficie de las partículas que conforman el sedimento y el agua intersticial. La ruta principal de exposición para los organismos que residen en el sedimento es el agua intersticial, lo que va al sedimento y se liga al mismo, se considera no disponible para la biota (Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, n.d.). Esto convierte al agua intersticial en un importante reservorio de sustancias, que eventualmente pueden ser liberadas a la columna de agua.

Tabla 3. Resultados laboratoriales del sedimento.

		Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4		
Campaña		1	2	1	2	1	2	1	2	Unidad
Determinaciones	Materia Orgánica (como O ₂)	5	18,7	12,7	24	139,9	24,7	3,7	11,3	mg/kg
	N.T.K (como N)	0,027	0,126	0,027	0,17	0,042	0,153	0,032	0,14	mg/kg
	Fósforo total	122,6	301,1	228,8	321,5	75,79	337,5	48,62	191,9	mg/kg
	Cobre (Cu)	5,4	12,6	14,87	16,23	3,37	17,37	0,77	7,03	mg/kg
	Cromo (Cr) Total	9,7	25,23	12,4	6,63	5,65	21,27	6,22	15,92	mg/kg
	Plomo (Pb)	12,8	14,3	23,17	15,3	8,5	21,57	5,97	5,23	mg/kg

Por este motivo, sin olvidar que las concentraciones obtenidas en laboratorio corresponden a un componente del compartimento sedimentario, los mismos serán comparados con los valores de referencia para aguas adoptado en nuestro país (Secretaría del Ambiente, 2002). Además, estos valores son determinados a partir de la fracción de agua intersticial del sedimento, obtenida mediante la adición de más agua. Por lo que estos valores deberían de ser contextualizados teniendo en cuenta la dilución.

Turbiedad. Si bien los valores para esta determinación fueron todos muy elevados si se compara con la referencia, esto es debido al origen de la muestra entregada para el análisis. El agua de elutriado, al ser el producto de la ruptura de la matriz sólida para extraer el agua intersticial, contiene todos los materiales que estuvieron adheridos previamente. Esta ruptura necesariamente contiene un alto contenido de materia dependiendo de la matriz inicial. En el caso del sedimento de la bahía, el sedimento ya se observaba con una coloración oscura. Esta condición inicial no es indicativo definitivo de algún tipo de contaminación y tampoco se tiene referencia de estudios anteriores. Únicamente se podría comparar entre campañas.

Para todas las Zonas, el incremento de la turbidez entre campañas fue alto, siendo el más elevado en la Zona 1. Únicamente en la Zona 2 hubo una drástica disminución de la turbiedad.

Compuestos nitrogenados. De entre estos

compuestos, el nitrato amoniacal fue la determinación que sobrepasó los máximos permisibles en todas las Zonas y en ambas campañas de muestreo. Para el parámetro nitrito, solo en una muestra correspondiente a la Zona 4 del segundo muestreo, ha sobrepasado el límite permisible. En ninguna muestra el nitrato sobrepasó el límite.

El parámetro nitrato y nitrito hacen referencia a una contaminación orgánica reciente, por lo que en monitoreo constante es un valor de alerta temprana.

El nitrógeno amoniacal registró valores menores en la primera campaña, siendo el máximo valor determinado de 0,321 mg/L en la Zona 4. Para todas las muestras de la segunda campaña se ha encontrado un aumento de casi 4 veces el valor de la primera campaña. Nuevamente la Zona 4 fue en donde mayor concentración de este parámetro se ha encontrado.

El nitrógeno amoniacal es producto de la degradación de material orgánico, tanto aeróbica o anaeróbica, por parte de organismos heterótrofos (Roldán Pérez & Restrepo, 2008).

En condiciones naturales la concentración de amoniacal alcanza niveles letales muy raramente. Este aumento podría explicarse por un pulso reciente de contaminación, previa a la segunda colecta, de una importante carga de excrementos que quedaron depositados en el sedimento.

Un promedio de los valores encontrados por otros autores en el 2004 en aguas de la bahía (0,059 mg/L) (Abt Associates Inc., 2004). A pesar de ser

resultados de dos matrices diferentes (agua vs. elutriado), esto sugiere un aumento en la contaminación debido a la actividad humana.

El nitrito representa una fase intermedia entre el amoníaco (forma más reducida) y el nitrato (forma más oxidada). En altas concentraciones, el nitrito es extremadamente tóxico a la mayoría de los organismos acuáticos y es encontrado en bajas concentraciones en particular en ambientes oxigenados. El promedio de la segunda campaña es aproximadamente 4 veces superior al de la primera. Comparando los resultados obtenidos en el presente trabajo con otros realizados anteriormente en la bahía (0,008 mg/L) (Abt Associates Inc., 2004) se observan unas diferencias de alrededor de 20 y 102 veces por encima de este valor, en la primera y segunda campaña respectivamente. Las concentraciones relativas de nitrito dependen básicamente del pH del agua, a medida que su valor aumenta, la concentración de NO_2^- también puede incrementarse (Camargo & Alonso, 2007) situación que se verificó entre colectas y que podría explicar el incremento.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5). Para todas las muestras este valor sobrepasó el límite establecido de 5 mgO_2/mL . La prueba de DBO5 es un procedimiento en el cual se estima la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua. Se puede afirmar que en los lugares donde el valor de DBO5 es alto, probablemente los valores de oxígeno disuelto serán bajos y la concentración de materia orgánica será alta. Para todas las muestras, en la segunda campaña, ha habido un aumento considerable, indicando nuevamente una alta probabilidad de contaminación orgánica de origen antropogénico.

Demanda química de oxígeno (DQO). Al igual que la DBO, este parámetro ha arrojado valores altos. La DQO mostró un aumento de cerca del triple sobre el valor de la primera colecta. La DQO es un parámetro similar a la DBO, pero en este caso, se contabiliza la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente todo el material presente. A pesar de no contar con un valor de referencia, junto con el valor de la DBO se podría considerar

un valor que indica alta contaminación orgánica.

Coliformes totales y fecales. Los valores para coliformes totales han tenido un rango de 2500 a 42000 UFC. La referencia local no contempla un valor máximo para esta determinación, por lo tanto, la relación se podría construir a partir de los valores establecidos para coliformes fecales. La diferencia entre estos dos parámetros es que la primera cuantifica la totalidad de bacterias presentes en un medio sin diferenciar el origen de las bacterias. Sin embargo, para el parámetro de coliformes fecales, hace referencia específicamente a las bacterias de origen animal, por lo tanto, aquellas de interés en la salud. Para ambos parámetros, los valores se encontraban en el orden de los 1000, por encima de la referencia. La Zona de menor contaminación fue la Zona 2 y la de mayor la Zona 3.

Los coliformes fecales representan el grupo de bacterias existentes en el intestino de animales de sangre caliente. Así, la presencia de este grupo de bacterias en el agua significa que la contaminación fue causada por efluentes de alcantarillado sanitario o las heces de los animales (Kawai & Facetti, 2013). La concentración de coliformes fecales fue uno de los parámetros que mostró disminución entre campañas a más de la mitad del valor correspondiente al inicio del trabajo.

Metales pesados. De entre los metales analizados, solo el plomo ha sobrepasado los límites establecidos ($>0.01 \text{ mg/L}$). La Zona con menor concentración en promedio fue la 4 y la mayor la 1.

Análisis del sedimento

Materia orgánica. El contenido de materia orgánica durante la primera y segunda campaña mostró su valor mínimo en la Zona 4 y el máximo en la Zona 3 respectivamente. Tres de las cuatro Zonas mostraron un aumento entre campañas, siendo la Zona 3 la única que mostró un drástico descenso. El promedio general para el cuerpo de agua fue de 40.325 mg/Kg durante la primera colecta, y de 19.675 mg/Kg para la segunda, con una disminución de aproximadamente 50% entre ambas.

De los parámetros analizados en sedimento crudo solo la materia orgánica mostró un gradiente

similar en ambas campañas, con el aumento de la concentración en el siguiente orden, entrada a la bahía (Zona 4), zona lindante a la Av. Costanera (Zona 1), parte media del cuerpo de agua (Zona 2) y zona aledaña a la ex playa del Sol y club Mbiguá (Zona 3). Esto podría deberse a que esta última zona con mayor concentración de materia es la que está en contacto más cercano con el área que presenta mayor vegetación y por lo tanto una capacidad de aporte de material orgánico mucho mayor. Aunque en las Zonas 1, 2 y 3 se verificó un aumento entre campañas, la amplia diferencia entre el valor de la Zona 3 en la primera campaña (139.900 mg/Kg) y el siguiente valor más bajo correspondiente a la misma zona en la segunda campaña (24.700 mg/Kg) hace que la tendencia media sea de una disminución a cerca de la mitad del valor inicial, debido probablemente a la bajada en el nivel del agua, lo que hace que menos material orgánico aledaño quede sumergido y posteriormente depositado en el sedimento.

La producción, el aporte y la descomposición de la materia orgánica en el agua y en el sedimento influyen en la composición química de la columna de agua, en la distribución de fauna y flora y en las características geoquímicas del fondo (Sánchez *et al.*, 2014).

El N.T.K (nitrógeno total Kjeldahl) es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal (Rodríguez, 2007). Debido a que el método analítico utilizado no discrimina el tipo de nitrógeno, no es posible determinar el predominio de uno sobre otro.

Para el parámetro N.T.K, analizado en sedimento crudo, durante la primera campaña, el valor más bajo se evidenció en la Zona 1 y 2, y el máximo en la Zona 3. Durante la segunda, estos extremos se verificaron en las Zonas 1 y 2 respectivamente. En todas las zonas se produjo un aumento entre campañas, siendo la Zona 2 la que mostró la mayor variación. Los promedios generales para ambas fueron de 0,03 y 0,15 respectivamente, representando esta situación un aumento de aproximadamente 360 %.

Por su parte el **fósforo total** en sedimento crudo, para la primera campaña presentó su valor más bajo en la Zona 4 y el más alto en la Zona 2. Para la se-

gunda campaña, el valor más bajo y el más alto se constataron en las Zonas 3 y 4 respectivamente. En todas las zonas se registró aumento, siendo la Zona 3 en la que se verificó la mayor diferencia entre campañas. Para la primera de estas, el promedio general fue de 118, 9, y de 288 para la segunda, con un aumento de alrededor del 142%.

El interés ecológico del fósforo proviene de su importante papel en el metabolismo biológico y de su relativa escasez en la hidrósfera. Es el elemento más escaso y generalmente actúa como limitante de la productividad biológica (Ruiz *et al.*, 2005). Valores para otros sistemas lénticos como el lago de la República (Paraguay) oscilan entre (0,01 – 0,1) mg/L (Facetti Masulli *et al.*, 2015) en tanto que para la laguna Sánchez en Corrientes (Argentina) estos niveles fluctúan entre (0,14 - 0,25) mg/L (Poi de Neiff *et al.*, 1999). Tomando un promedio en ambos casos, se puede apreciar que las concentraciones en el sedimento de la bahía de Asunción se encuentran unas 1.072 y 2.600 veces por encima de los niveles en el lago de La República y alrededor de 300 y 738 veces por encima de las concentraciones en la laguna Sánchez.

La cantidad de fósforo contenido en los sedimentos puede ser de varios órdenes de magnitud superior a la del agua, por lo que es importante estudiar la concentración de fósforo que poseen los sedimentos, ya que éstos contribuyen como importante fuente interna para la eutrofización (Ruiz *et al.*, 2005).

Los compuestos de fosfato que se encuentran en las aguas residuales o se vierten directamente a las aguas superficiales, provienen de fertilizantes eliminados del suelo por el agua o el viento, excreciones humanas y animales, detergentes y productos de limpieza (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004). Por lo mencionado antes, y al no encontrarse el área de estudio en una Zona agrícola-ganadera, se presume que el incremento observado en la media entre campañas de debe probablemente a un mayor aporte antropogénico en forma de excreciones humanas, detergentes y productos de limpieza que llegan al cuerpo por medio de los afluentes.

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) constituyen los dos elementos más importantes para la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos. Son los iones que en un momento determinado pueden ser los factores más limitantes en la producción primaria; varían igualmente con las estaciones en las Zonas templadas y con los ritmos de lluvia y sequía en las zonas tropicales, a causa de su utilización por las algas.

Teniendo en cuenta las concentraciones encontradas en el sedimento crudo los niveles de fósforo total superan ampliamente a las de nitrógeno. En la primera campaña, el valor promedio de fósforo es unas 3.700 veces superior, mientras que en la segunda campaña esta relación es de unas 1.950 veces más de fósforo que de nitrógeno. El nivel promedio encontrado en aguas de la bahía por Abt Associates Inc. en el 2004 fue de alrededor de 0,2 mg/L (Abt Associates Inc., 2004).

La contaminación orgánica, industrial y agrícola constituye hoy día una de las fuentes más importantes de nitrógeno y fósforo en el agua y es la principal responsable de los fenómenos de eutrofización de lagos, embalses y ríos. Este problema es aún más agudo en los trópicos donde, además de haber poco o ningún control de la contaminación, los nutrientes son utilizados por las algas y plantas acuáticas de forma permanente (Roldán Pérez & Restrepo, 2008).

Metales

Cromo. Las formas más comunes de este elemento son el cromo metálico (Cr), cromo trivalente Cr(+3) y cromo hexavalente Cr(+6). El cromo es usado en curtiembres, tintas, cerámica, productos explosivos, control de corrosión y la producción de vigas metálicas. Es un elemento necesario para el metabolismo animal en su forma trivalente, pero en forma hexavalente provoca úlcera, dermatitis, cáncer del pulmón y complicaciones respiratorias (Severiche & González, 2012). Con su estado de oxidación +6 es un potente oxidante de la materia orgánica y se ha demostrado que es 100 veces más tóxico y 1.000 veces más mutagénico que la forma trivalente (Netzahuatl-Muñoz *et al.*, 2010). En

sedimento crudo se determina el cromo total, de forma que no es posible conocer cuál de sus formas se encuentra mayoritariamente.

Al contrario de lo acontecido en el elutriado, los resultados en sedimento crudo muestran un aumento con respecto a la primera colecta. A su vez, al comparar estos niveles con el umbral por debajo del cual no se esperan efectos biológicos adversos o ISQG de la norma canadiense para la protección de la vida acuática en sedimentos (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004), que es de 37,3 mg/Kg, se ve que los mismos no lo sobrepasan, encontrándose 3,3 veces por debajo en la primera campaña, y alrededor de 1 vez en el caso de la segunda campaña. Trabajos realizados anteriormente con sedimento en la bahía muestran situaciones distintas con respecto a este. Un promedio de las concentraciones encontradas en 1994 es unas 6 veces más que la concentración de la primera campaña y alrededor de 2,5 veces con respecto a la de la segunda. Por otro lado, el promedio de las concentraciones de otro trabajo realizado en el 2004 (Abt Associates Inc., 2004), muestra que las concentraciones de las dos colectas de la presente investigación están aproximadamente 34 y 68 veces por encima del mismo.

Contrastando los resultados en ambos tipos de matrices, sólido y líquido, se observa una gran diferencia entre las concentraciones encontradas en sedimento y en elutriado, con una diferencia de cerca de 385 veces más en el sólido que en líquido en la primera campaña y 17.200 veces en la segunda, lo que sugiere el alto poder retentivo del sedimento con relación a este metal.

Por su lado para el metal pesado plomo en elutriado en la primera campaña, los valores fluctuaron entre 0,06 en la Zona 2 y 0,13 en la Zona 1, con un promedio de 0,09. En la segunda campaña, el valor mínimo se registró en la Zona 4 (0,01) y el máximo en la Zona 1 (0,07), dando como promedio 0,035. Todas las Zonas mostraron disminución entre campañas, en especial la Zona 3. Esta variación decreciente entre los promedios generales fue de alrededor del 61%. En sedimento crudo, en la primera campaña el valor mínimo se dio la Zona 4 y el

máximo en la Zona 2, mientras que, en la segunda, estos extremos se presentaron en las Zonas 4 y 3 respectivamente. Entre campañas, las Zonas 2 y 4 mostraron disminución y las Zonas 1 y 3 aumentos, siendo esta última en la que se constató la mayor diferencia. La variación creciente entre los valores promedios de la primera campaña (12,61) y la segunda (14,1) fue de alrededor del 12%.

La contaminación del agua por plomo no se origina directamente por el plomo sino por sus sales solubles en agua que son generadas por las fábricas de pinturas, de acumuladores, por alfarerías con esmaltado, en fototermografía, en pirotecnia, en la coloración a vidrios o por industrias químicas productoras de tetraetilo de plomo (se usa como antidetonante en gasolinas) y por algunas actividades mineras, etc. (Rojas Martínez & Vargas Reyes, 2009).

El plomo elemental no se disuelve en agua en condiciones normales (20°C y presión de 1 bar). Sin embargo, la reacción tiene lugar cuando está disuelto en agua en las formas de carbonatos. El plomo se une frecuentemente al azufre en forma de sulfuro (S^{2-}), o al fósforo en forma de fosfato (PO_4^{3-}). En estas formas el plomo es extremadamente insoluble, y se presenta formando compuestos inmóviles en el medio ambiente. Los compuestos de plomo son generalmente solubles en agua blanda y levemente ácida (Rojas Martínez & Vargas Reyes, 2009).

En el elutriado, entre campañas, al igual que el Cr(+6), se observó una disminución promedio de 1,5 veces aproximadamente, a pesar de eso, los valores superaron el nivel máximo de referencia de 0,01 mg/L, unas 8 veces en la primera campaña y 2,5 veces en la segunda. En sedimento crudo, se produjo un ligero incremento de alrededor de 0,1 veces. Comparando los resultados de este trabajo con un promedio de las concentraciones encontradas en 1994 en el mismo lugar, se verifica que los datos actuales están alrededor de 3 veces por debajo del mismo en ambas campañas. Por el contrario, el nivel medio determinado por otros autores en el 2004 (Abt Associates, 2004.) se muestra ligeramente por debajo de las concentraciones halladas en esta investigación. Por su parte, el contraste

entre sedimento y elutriado fue mucho mayor, 140 y 402 veces más plomo en el sedimento que en el elutriado para la primera y segunda campaña respectivamente. Otra comparación importante es con el ISQG (umbral por debajo del cual no se esperan efectos biológicos adversos) de la normativa canadiense, que es de 35 mg/L y que no es superado por los valores de este trabajo, los cuales se encuentran alrededor de 1,5 veces por debajo en ambas campañas.

En cuanto al parámetro cobre analizado en sedimento crudo, se constató su valor mínimo en la Zona 4 y el máximo en la Zona 2 para la primera colecta, mientras que, para la segunda, el valor más bajo fue determinado en la Zona 4 y el más alto en la Zona 3. En todas las Zonas se observó un aumento de concentración, en donde la mayor variación se produjo en la Zona 4. Para la primera campaña, el valor promedio fue de 6,1 y para la segunda fue de 13,3, con una variación de cerca del 118%.

Entre campañas, se verificó un aumento al doble del valor de la primera colecta. Por su parte en 1994 en el lugar se determinó un nivel promedio superior a los de esta investigación, unas 2 veces por encima para la primera campaña y 0,4 veces más en la segunda. Con relación al valor ISQG de la normativa canadiense (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004) de 35,7 mg/L, las concentraciones de cobre en el sedimento de la bahía se encontraron aproximadamente 5 veces por debajo en la primera campaña, mientras que para la segunda campaña la concentración fue de 1,5 veces menos.

La concentración para el cadmio en elutriado no superó el valor mínimo detectable durante la primera campaña en ninguna de las Zonas, en tanto que para la segunda el valor mínimo se dio en la Zona 2 (0,003) y el máximo en la Zona 4 (0,012) con un promedio de 0,006. Todas las Zonas mostraron aumento, con la Zona 4 como la que registró mayor variación. El incremento entre campañas fue de alrededor del 500%.

Durante este estudio, su concentración aumentó unas 5 veces con respecto al valor máximo de referencia que es de 0,001 mg/L, no se encontraron

otros trabajos que hayan determinado los niveles de este metal en aguas de la bahía.

Conclusiones y recomendaciones

Mediante este trabajo se pudo determinar parámetros fisicoquímicos y biológicos del sedimento de la Bahía de Asunción. Siendo estos resultados los más actuales a la fecha.

Se ha observado una importante contaminación orgánica, por lo que se sugiere una mejor estrategia para preservar este cuerpo de agua, ya que se encuentra catalogada como área protegida. Además, se evidencia la importancia de contar una normativa en donde se contemple los parámetros para sedimento a nivel país.

Se recomienda un plan de monitoreo constante de la Bahía para poder determinar los valores históricos y así generar planes de manejos acordes al su estado.

Agradecimientos

A Andrea W por el mapa de la Bahía. A Marcela Jiménez por la lectura crítica del manuscrito. A Derlis Fárez e Iván Servín que ayudaron en la toma de muestra en la bahía.

Nota de autores: Los resultados de los análisis fisicoquímicos fueron proveídos por el laboratorio de aguas de Facen y la interpretación está basada netamente en el criterio de los autores.

Contribución de los autores: H. Kurita: Investigador principal y se encargó de diagramar y preparar el manuscrito. G. Godoy: responsable del informe técnico del componente fisicoquímico presentado al CONACYT. M. Benítez: responsable técnico del proyecto. D. Franco: asesora científica. M. Ávila, C. Vian ayuda en la corrección y diagramación del manuscrito. L. Medina, interpretación y discusión de los resultados fisicoquímicos. RV, HC, y JG ayudaron en la preparación de los materiales colectados.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Fuente de financiamiento: Este Proyecto es financiado por el CONACYT través del Programa PROCIENCIA con recursos del Fondo para la Ex-

celencia de la Educación e Investigación – FEEI del FONACIDE: Proyecto 14-INV-342.

Bibliografía

- Abt Associates Inc. (2004). *Actualización y ajustes complementarios del estudio de factibilidad abt associates inc. 1996/97: estudio de factibilidad de la primera etapa (RIMA)*. Municipalidad de Asunción. Asunción (PY). 97pp..
- Camargo, J.A., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 16(2): 96–110.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2004). *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Phosphorus: Canadian Guidance Framework for the Management of Freshwater Systems. Canadian Environmental Quality Guidelines*, 2004: 1–6.
- Facetti Masulli, J.F., López, C.L., & Delgado, M. (2015). Limnología del Lago de la República-II. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 20: 75–84.
- Kawai, H., & Facetti, F. (2013). Gestión de los recursos hídricos y su control. Pp. 33–98, in Facetti J. & Kawai, H. (Eds.). *Manual Técnico Para La Gestión Del Saneamiento Ambiental* (Tomo 1). San Lorenzo: FIUNA / SEAM / JICA. 360 pp.
- Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. (n.d.). *Metodologías. Monitoreo de agua y sedimentos en cursos superficiales y de suelos afectados por contaminantes de origen industrial*. Buenos Aires: Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. iii + 170 pp.
- Netzahuatl-Muñoz, A.R., Pineda-Camacho, G., Barragán-Huerta, B.E., & Cristiani-Urbina, E. (2010). Remoción de cromo hexavalente y cromo total por la corteza de *Pyrus communis*. *Revista CENIC - Ciencias Químicas*, 41: 1–10.

- Poi de Neiff, A., Neiff, J.J., Patiño, C.A., Ramos, A.O., Cáceres, J.R., Frutos, S.M., & Verón, M.B.C. (1999). Estado trófico de dos lagunas en planicies anegables con áreas urbanas de la provincia de Corrientes. *Facena*, 15: 93–110.
- Rodríguez, C. (2007). *Nitrogeno total en agua por el metodo semi-micro Kjeldahl-electrodo de amoniaco*. (Vers. 02). Bogotá: IDEAM-Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 9 pp.
- Rojas Martínez, T., & Vargas Reyes, Á. (2009). *Diseño de un sistema a nivel piloto para la remoción de plomo y zinc por debajo de la concentración letal media (CL50-48) para Daphnia pulex*. Trabajo de grado. Bogotá: Facultad de Ingeniería-Universidad de La Salle. 123 + 230 pp.
- Roldán Pérez, G.R., & Restrepo, J.J.R. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. (2ª ed.). Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. xx + 440 pp.
- Ruiz, M., Granero, M., Rodríguez, M.I., Bustamante, M.A., & Ruibal Conti, A.L. (2005). Importancia de los sedimentos como fuente interna de fósforo en el Embalse San Roque (Córdoba): Determinación de una metodología para su estudio. *Proceedings of the XX Congreso Nacional Del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos Del Cono Sur, Mendoza, Argentina*, 9–14.
- Sánchez, L.J.G., Flórez-Molina, M.T., & Parra-Sánchez, L.N. (2014). Reconstrucción de las concentraciones de materia orgánica y nutrientes mediante espectrometría y análisis de diatomeas en tres embalses de Antioquia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(149): 409–416.
- Santos, M.A.P.F. dos. (2008). *Avaliação da qualidade da água e sedimento da sub-bacia do rio Corumbataí (SP) por meio de testes ecotoxicológicos*. Thesis. Piracicaba: CENA-Universidade de São Paulo. 186 pp.
- Secretaría del Ambiente. (2002). *Resolución 222/02: por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional*. Asunción: Secretaría del Ambiente. 6 pp.
- Severiche, C.A., & González, H. (2012). Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado. *Ingenierías USBMed*, 3(2): 6–11.