

Análisis de metales pesados en el Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico

Analysis of heavy metals in the Cerrillos Reservoir of Ponce, Puerto Rico

Abner José Colón Ortiz ¹

Resumen: El Embalse Cerrillos, ubicado en la ciudad de Ponce, es uno de los más importantes en el área sur de Puerto Rico. El propósito de esta investigación fue analizar la presencia y concentración de metales pesados en el Embalse Cerrillos de Ponce como parte de un monitoreo de la calidad en el agua. Para esta investigación se hizo un muestreo simple en tres puntos del Embalse, que fueron identificados como zonas A, B y C, por un periodo de nueve meses. Las muestras se analizaron mediante un inductor de plasma acoplado por emisión de espectroscopia óptica (ICP-OES 3300 XL). En los resultados obtenidos se demostró que los elementos plata (Ag), arsénico (As), cromo (Cr), plomo (Pb), vanadio (V), cadmio (Cd) y zinc (Zn) excedieron el límite permitido por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los EUA. La prueba de Kruskal Wallis se realizó para probar si no existe diferencia significativa en la cantidad de elementos detectados y los puntos de muestreo en el Embalse Cerrillos de Ponce. Los resultados de la prueba no fueron significativos, $\chi^2 (N=26) = .467, p = .792$. No obstante, el análisis de regresión lineal confirmó que el nivel de agua en el Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico incide en los metales pesados que excedieron los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ASTDR).

Palabras clave: Embalse Cerrillos, metales pesados, regresión lineal.

Abstract: The Cerrillos reservoir is located in the city of Ponce, is one of the most important reservoirs in the southern area of Puerto Rico. The purpose of this research was to analyze the presence and concentration of heavy metals in Cerrillos de Ponce Reservoir as part of a monitoring of water quality. For this investigation a simple sampling was made in threepoints of the Reservoir Cerrillos de Ponce for a period of nine months that were identified like zones A, B and C. These samples were analyzed by an Optical Spectroscopy Emission Coupled Plasma Inductor (ICP-OES 3300 XL). In the results obtained it was demonstrated that the elements Silver (Ag), Arsenic (As), Chromium (Cr), Lead (Pb), Vanadium (V), Cadmium (Cd) and Zinc: World Health Organization and the Agency for Toxic Substances and Disease Registry. The Kruskal Wallis test was performed to test whether there is no significant difference in the number of elements detected and the sampling points at Cerrillos de Ponce Reservoir. The results of the test were not significant, $\chi^2 (N = 26) = .467, p = .792$. However, the linear regression analysis confirmed that the water level in Cerrillos de Ponce Reservoir in Puerto Rico affects the heavy metals that reached the limits established by the World Health Organization and the Agency for Toxic Substances and Disease Registry.

Keywords: Cerrillos reservoir, heavy metals, linear regression.

(Presentado: 9 de septiembre de 2018. Aceptado: 30 de octubre de 2018)

¹ Profesor en la Pontificia Universidad Católica de Puerto Rico. Sus investigaciones se centran en las Ciencias Ambientales y la Educación Ambiental. abner_colon@puopr.edu

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural primordial para la vida. El 97.24% del agua en el planeta está en los océanos, mientras que el 2.76% del agua está distribuido en ríos, glaciares, atmósfera, aguas subterráneas y lagos (U.S. Geological Survey, 1984). Los ecosistemas de los lagos y embalses apoyan complejos e importantes interacciones de cadenas alimentarias y proveen hábitats necesarios para apoyar numerosas especies en peligro de extinción (EPA, 2013). El Embalse Cerrillos, ubicado en la ciudad de Ponce, es uno de los embalses más importantes en el área sur de Puerto Rico. Su construcción fue terminada en el año 1992 por el U.S Army Corp of Engineers; incluso es el embalse de mayor tamaño del Caribe. Los propósitos principales del Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico, son controlar inundaciones, la recreación y suplir agua a los habitantes (U.S Geological Survey, 2008).

Los cambios en el clima y la contaminación amenazan los lagos y ríos, las fuentes de agua que se utilizan para el diario vivir al estar con contaminantes, dirigiendo al planeta a una crisis de agua (Natural Resources Defense Council, s.f). La contaminación en el agua se define como la incorporación de sustancias a un cuerpo de agua que deteriora su calidad, de forma tal que deja de ser apto para el uso que fue designado (JCA, 2003). Las causas principales de contaminación no naturales en los cuerpos de agua de Puerto Rico son: las descargas domésticas, descargas industriales, desperdicios agrícolas, sedimentación y erosión (JCA, 2003).

Uno de los principales contaminantes de agua son los metales pesados (JCA, 2003). Estos se encuentran de forma natural en la tierra y se convierten en contaminantes tóxicos si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades antropogénicas, como el uso de productos para la agricultura (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2009). Los metales pesados a diferencia de los contaminantes orgánicos, son persistentes en la naturaleza, por lo tanto, tienden a acumularse en distintos nichos de los ecosistemas (Madera-Parra et. al. 2014).

Es necesario que el agua esté en condiciones óptimas por el bien de la salud de las comunidades. Los metales pesados llegan a ser tóxicos en las personas y el ambiente (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2009), incluso, es probable desarrollar enfermedades al estar en contacto con agua contaminada por metales pesados en

cantidades altas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2009). Bajo estas circunstancias, se percibe una ausencia de investigaciones relacionadas con la presencia de metales pesados en el Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico. Por tal razón, se realizó un monitoreo de metales pesados como parámetro para determinar la calidad del agua en el Embalse Cerrillos de Ponce. El propósito de esta investigación fue analizar la presencia y concentración de metales pesados en el Embalse Cerrillos de Ponce como parte de un monitoreo de la calidad en el agua.

REVISIÓN DE LITERATURA

En un estudio realizado por Olgunoğlu, et. al. (2015) al nores del mar Mediterráneo, se estudiaron los niveles de metales pesados en los músculos y branquias de 4 especies distintas de peces, para luego comparar ambas cantidades encontradas. Para realizar este estudio se recolectaron muestras de *Merluccius merluccius*, *Lophius budegassa*, *Helicolenus dactylopterus* y *Chlorophtalnus agassizi*, a una profundidad entre 459 y 582 m. Luego de recolectar las muestras, las mismas fueron enjuagadas con agua limpia de mar, separadas por especies, guardadas en embaces, preservadas en hielo y transferidas al laboratorio donde el peso y el tamaño fueron medidos y los tejidos y branquias fueron separados.

Las muestras fueron ubicadas en bolsas con polyetileno y guardadas a -20 Co hasta el proceso de analizar la presencia de metales. En la investigación se recolectaron 16 muestras de cada especie en el área de muestreo, al analizar la presencia de metales pesados se encontró una mayor cantidad de metales pesados (Fe>Zn>Cu>Pb>Cd) en las branquias que en los músculos. Las cantidades variaron entre especies por sus distintos hábitos alimenticios y de vivir, a pesar de que se encontraban en la misma área. Olgunoğlu, et. al. (2015) concluyeron que los niveles de metales pesados encontrados en los peces, a pesar de ser altos, estaban dentro de lo permitido por las regulaciones de los alimentos. Al determinar que el ingerir los peces analizados no son un riesgo para los seres humanos.

No obstante, Abubakar, et. al. (2015) realizaron un estudio en Kaduna, Nigeria de la presencia de metales pesados en la superficie del agua. Para realizar este estudio hicieron un estudio de reconocimiento, colección de muestras y análisis en el laboratorio, el cual fue realizado para conocer las fuentes de contaminantes en toda el área sur del

Río Kaduna. Un total de 5 muestras fueron obtenidas alrededor del Río Kaduna y los desagües de Kakuri-Makera, las primeras muestras fueron obtenidas en el desagüe de Kakuri-Makera, llamándola el punto A. Coleccionaron tres muestras en distintas áreas del punto A a intervalos de 50 m., lo mismo hicieron con las muestras B, C, D y E, obtenidas en el área del punto B a intervalos de 100 m., las muestras fueron preservadas con ácido nítrico y luego ubicadas en el refrigerador antes de llevarlas para el análisis en el laboratorio, donde prepararon las muestras para analizarlas en el XRF-X ray y analizar la presencia de metales pesados.

Los resultados de esta investigación presentaron presencia de Cr, Fe, Cu, Zn, As y Pb, se encontró que Cr y Pb pasaron el límite de cantidad aceptada en todas las muestras, el Fe paso el límite de cantidad aceptada en las muestras A y B, el Cu paso el límite de cantidad aceptada en la muestra A, el Zn se mantuvo bajo el nivel aceptado y As paso el límite en las muestras A y B. Los autores concluyeron que hubo una contaminación por la alta presencia de estos metales pesados a causa de las descargas urbanas, municipales e industriales.

Otro estudio realizado por Madera-Parra et. al. (2014) durante 60 días en la micro-estación de investigación de biología en la Universidad del Valle, se estudió el efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. Las tres especies tropicales seleccionadas fueron: *Gynerium sagittatum*, *Colocasia esculenta* y *Heliconia psittacorum*, obtenidas de un vivero local.

El diseño experimental de Madera-Parra et. al. (2014), incluyó dos factores: especie de plantas y concentración de metales pesados en el lixiviado, los reactores se alimentaron con lixiviado sintético, condición empleada en otros estudios que buscan minimizar potenciales efectos inhibitorios en la fitorremediación. Clorofila, potencial hídrico y concentración de metales pesados fueron medidos en tejidos de las plantas, el potencial hídrico no cambió entre las especies y la distribución de metales pesados en los tejidos de las plantas decreció en el siguiente orden: raíz, hoja, tallo. Las plantas evaluadas demostraron la potencialidad para la fitorremediación de lixiviado y todas ellas se pueden clasificar como acumuladores de los metales pesados.

En un estudio realizado por Lychagin, et. al (2015) en la

desembocadura del Río Volga en Rusia, se estudió la presencia de metales pesados en el agua, plantas y sedimento, este estudio tuvo como propósito obtener información de las características de la estructura geoquímica terrestre y acuática del delta. En la investigación se recolectaron 150 muestras de agua, 160 muestras de materia suspendida y más de 100 muestras de sedimento y plantas en las ramas del delta más grandes, la contaminación del sistema acuático estuvo manifestada en el exceso de metales pesados en materia suspendida, más notable en el periodo de inundaciones; el contenido de macrofitos varió dependiendo de las características ecológicas y morfológicas de la especie. De esta manera, los autores concluyeron que las condiciones del delta del Río Volga siguen relativamente seguras, especialmente cuando se comparan con otros estuarios de grandes ríos.

Monikh, et. al. (2015) en el noreste del Golfo Pérsico, estudiaron las concentraciones de metales pesados en el sedimento, camarones y dos especies de peces, se escogieron tres localidades para muestreo, incluyendo la desembocadura del Río Arvand, el estuario Meleh y el estuario Musa. Un total de 60 peces, 50 camarones y 15 sedimentos fueron las muestras recogidas en cada localidad en el verano del 2010, las muestras fueron ubicadas en hielo y llevadas diariamente al laboratorio para congelarlas hasta ser analizadas. Las muestras de peces fueron separadas en músculos, branquias e hígado, mientras que los camarones fueron separados en músculos y hepatopáncreas, cada parte fue sumergida por separado en ácido nítrico y ácido perclórico hasta que estuviesen completamente disueltas.

Las muestras de sedimento de cada estación fueron secadas en el horno hasta alcanzar un peso constante, digeridas en HNO₃ y ácido clorhídrico para luego diluirlas en agua destilada y filtrada. Las concentraciones de metales pesados fueron determinadas con un espectrómetro de absorción atómica, los sedimentos y organismos de la desembocadura del Río Arvand mostraron mayor concentración de metales que las demás áreas, los investigadores demostraron el resultado de influencias antropogénicas en la presencia de metales, los niveles de metales pesados en el hígado del pez y en la hepatopáncreas del camarón fue significativamente más alto que los niveles de metal en los tejidos de músculos y branquias.

Otra investigación vinculada con la presencia de metales en el agua, fue la realizada por Haiyan Li et. al. (2013) en

Beijing, China, estos autores analizaron los efectos del pH, temperatura, oxígeno disuelto y velocidad de flujo en la liberación de metales pesados en los sedimentos de las alcantarillas. Las muestras de sedimentos fueron recogidas en una alcantarilla situada en North Lishi Road, Beijing, luego, fueron transportadas al laboratorio para ser estudiadas, cada muestra fue preparada para detectar cada uno de los metales pesados que contenían las muestras de sedimento (Pb, Cu, Zn, Cr, Cd) y los clasificaron de acuerdo con sus características y concentraciones.

Los resultados indicaron que el efecto de pH en la liberación de los metales pesados aumentó en condiciones ácidas y alcalinas, pero la liberación mayor fue con un pH bajo. En cuanto a la temperatura, la liberación de metales pesados en el sedimento aumentó mientras la temperatura incrementaba, el comportamiento de la liberación de los metales con la influencia del oxígeno disuelto fue similar entre los mismos metales, la liberación aumentó rápido bajo condiciones aeróbicas y la absorción ocurrió bajo condiciones anaeróbicas. El único metal que reaccionó distinto fue el Cd, su liberación ocurrió bajo condiciones anaeróbicas y aumentó más aún cuando la concentración de oxígeno disuelto era baja, la velocidad de flujo indicó que en una alta velocidad libera metales pesados con mucha efectividad, pero a la misma vez cambia las condiciones de pH y oxígeno disuelto. Haiyan Li et. al. (2013), concluyeron que la liberación de metales pesados es diferente en distintas velocidades de flujo.

No obstante, Voica et. al (2013) investigaron los metales pesados en el Río Aries en Rumania al utilizar el instrumento o técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente ICP-MS por sus siglas en inglés. Decidieron comenzar este estudio debido a la preocupación de posible contaminación por una mina cercana, de acuerdo a estudios pasados el trabajo realizado en las minas ocasiona contaminación de metales pesados en las áreas cercanas, las muestras fueron tomadas en un periodo lluvioso en 9 localidades del Río Aries, las muestras fueron filtradas para luego ser analizadas en el ICP-MS.

La concentración de metales pesados mostró un patrón común en sus concentraciones para todas las localidades, excepto en la localidad de Bahía de Aries, allí las concentraciones de Pb, As, Fe, Se, Cu y Zn excedieron en comparación a las demás localidades. La Bahía de Aries fue una mina de extracción de oro hasta el 2004, a pesar de que se encontró una pequeña fracción de contaminación por

metales pesados en el agua es obvio que la antigua mina en el área llevó a la contaminación de las aguas del Río con metales pesados.

Sin embargo, Ajami y Fataei (2015) determinaron los niveles de metales pesados en las aguas para uso de agricultura en el Río Meshkinshahr ubicado el noreste de Irán, las muestras de agua fueron tomadas en la época de alta precipitación y baja precipitación, cada muestra fue esterilizada y luego sometida en el dispositivo de absorción atómico para medir los niveles de metales pesados, los resultados luego fueron comparados con los valores estándares de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), World Health Organization (WHO) acerca del límite permitido de metales pesados. En la época de alta precipitación los valores de plomo y cromo se encontraron por debajo de los límites de la EPA, WHO, pero los valores de cadmio fueron mayores a los límites estipulados por la EPA y WHO. En la época de baja precipitación los valores de plomo y cromo sobrepasaron los límites de la EPA, WHO.

Iannacone y Salazar (2007), estudiaron el efecto toxicológico de muestras de agua en el organismo invertebrado *Chironomus calligraphus* en el Lago Junín ubicado en Perú, el objetivo de la investigación fue determinar el grado de toxicidad por metales pesados en muestras de aguas superficiales de tres localidades del Lago Junín, Perú, usando como herramienta ecotoxicológica a *C. calligraphus*. Las masas de huevos de *C. calligraphus* fueron extraídas para luego ser trasladadas en recipientes de plástico, en el laboratorio las masas de huevos se separaron del sustrato a la cual estaban adheridas, los huevos fueron incubados para analizar las larvas, que es el más susceptible a metales pesados en ensayos de toxicidad.

Las masas de huevos fueron colectados todos los meses de la laguna, con el fin de determinar la concentración letal media para todas las muestras de agua procedentes de los tres puntos de estudio del Lago Junín se emplearon cinco diluciones: 6.25%; 12.5%; 25%; 50% y 100%. Las larvas de *C. calligraphus* fueron expuestas durante 48 horas en las mismas condiciones de laboratorio que fueron incubados los huevos, se usaron cuatro repeticiones, en total 240 larvas de primer instar de *C. calligraphus*, las cuales no fueron alimentadas durante el ensayo, todos los bioensayos se realizaron paralelamente a ensayos con sulfato de cobre como tóxico de referencia para evaluar la sensibilidad de *C. calligraphus* y de esta forma asegurar la salud de los organismos.

De los análisis químicos en las aguas, las concentraciones de plomo y cadmio estuvieron por encima de los límites máximos permitidos de calidad de agua de Perú. Los metales Fe, Mn y Zn causaron los efectos ecotoxicológicos de mortalidad en términos de concentración letal media observados en los bioensayos con *C. calligraphus* con las muestras de las tres localidades. Sin embargo, la disminución de la toxicidad ocurrió por la disminución del pH y con un aumento del Fe. De las tres localidades donde se recolectó agua; Pari, Represa de Upamayo y Puente de Upamayo, Pari tuvo el valor de concentración mayor de oxígeno disuelto con un 7.17, se observó que mientras menos cantidad de oxígeno disuelto, menor cantidad de metales se encontraron. Iannacone et al. (2007) concluyeron que el uso del organismo *C. calligraphus* confirma que las muestras del Lago Junín mostraron efectos toxicológicos.

METODOLOGÍA

Recolección de muestras

Se recolectaron muestras de agua en tres zonas del Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico, se utilizarán botellas de polietileno para recolectar las muestras, éstas evitan que la muestra se adhiera a las paredes de la botella y se pierda parte de la muestra. Al momento de realizar el muestreo se considerarán dos observaciones para evi-

tar la contaminación de la muestra: no tocar la boca de la botella y utilizar guantes sin polvo; se sumergieron las botellas en el agua y al obtener la muestra, rápidamente se cerraron y guardaron en una nevera con hielo. Para una preservación apropiada la muestra no será filtrada. Se utilizó ácido nítrico (1+1) para ser acidificada a un pH menor de 2 y preservar la muestra de forma apropiada. Luego de 16 horas se revisará el pH, y si permanece a un pH menor de 2, la muestra se almacenará por un período de 6 meses antes de su análisis.

Localización de las zonas de muestreo

Para esta investigación se hizo un muestreo simple en tres zonas del Embalse Cerrillos de Ponce por un periodo de nueve meses, que fueron identificados como zona A, B y C. La zona A, se realizó en la entrada del río principal que supe agua al Embalse. La zona B se llevó a cabo en un punto medio del embalse, donde se encuentra el atracadero de los botes de pesca.

Finalmente, la zona C, es la parte de más profundidad y almacenaje de agua del embalse (ver figura 1). El motivo del muestro simple fue porque se considera que las características del embalse son homogéneas, es de cir, cuando el cuerpo de agua no presenta alteraciones en su composición espacio-temporal (Mezquida, 2012).



Imagen N° 1. Puntos de muestreo en el Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico. Tomada de Google Earth.

Procedimiento analítico

Las muestras se analizaron en el Inductor de Plasma Acoplado por Emisión de Espectroscopia óptica (ICP-OES 3300 XL). Se procedió a utilizar el método 200.7 de la EPA (Agencia de Protección Ambiental, por sus siglas en inglés). Al momento de analizar las muestras se transfirieron 50 ml de la muestra previamente preservada a un vaso de 250 ml.

Se añadió 1 ml de HNO₃ (1+1) y 0.5 ml de HCl (1+1) para romper los enlaces químicos y eliminar productos no metálicos. Se colocó el vaso en un plato caliente previamente ajustado a una temperatura no mayor de 85° C. El vaso se cubrió con un cristal de reloj para prevenir la contaminación de la muestra. El volumen de la muestra se redujo a 10 ml.

Para reducir evaporación adicional se recalentó por 15 minutos adicionales, después de recalentar se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente, se transfirió la solución a un matraz volumétrico de 50 ml y se llevó hasta la marca de calibración con agua deionizada.

El instrumento se calibró al utilizar un blanco de calibración compuesto de HCl y HNO₃. Los metales a analizar fueron: Be, Cd, Co, Cr, Se, Si, Ag, Zn, As, Fe, Mn, Ni, Cu, Ca, Mg, V, Ba, Na, Pb y Al. Para este análisis se utilizaron dos estándares multielementales certificados de la compañía PelkinElmer, uno de los estándares tuvo 1,000 ug/mL de K, 500 ug/mL de Si, 100 ug/mL de Al, B, Ba, Na y 50 ug/mL de Ag mientras el otro de 100 ug/mL de As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, V y Zn. Se realizó una curva de calibración de 3 puntos. Para hacer esta curva se prepararon 3 concentraciones a 0, 3 y 5 ppm de cada metal a analizar.

RESULTADOS

Tabla N° 1. Metales pesados encontrados en el embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico en noviembre 2015.

Metal	Noviembre 2015		
	A	B	C
Ag (mg/L)	1.26	0.8	1.17
As (mg/L)	0.46	9.8	8.3
Ca (mg/L)	45.3	35	40.4
Cr (mg/L)	0.41	0.5	0.44
Cu (mg/L)	0.2	---	0.28
Fe (mg/L)	0.02	---	---
Mg (mg/L)	5.68	3.6	4.43
Pb (mg/L)	---	---	0.33
Si (mg/L)	61.7	49	50.9
V (mg/L)	0.91	1.1	0.87

Tabla N° 2. Metales pesados encontrados en el embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico en el año 2016.

Metal (mg/L)	Enero			Febrero			Marzo		Abril		Septiembre			Octubre			Diciembre				
	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
			0.74																		
Ag	0.372	1.85	4	1.47	1.84	0.619	1.91	0.49	0.914	1.54	1.25	1.81	1.33	0.34	1.65	1.24	1.2	---	---	---	
As	12.8	11.7	11.4	---	14.4	1.03	7.71	2.85	5.01	9.63	4.35	9.2	16.2	12.4	10.5	14.2	8.35	7.06	16	13	
Ba	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.06	0.1	0.08	
Be	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Ca	45.2	37.7	35.6	38.9	32.9	34.1	34.3	33.7	36	34.5	33.4	36.6	32.5	31.4	0.012	0.021	0.02	54.2	53	60.6	
Cd	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.122	0.1	0.1	---	---	---	
Co	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Cr	0.305	0.372	0.362	0.403	0.345	0.368	0.358	0.377	0.375	0.362	0.37	0.37	0.373	0.49	0.655	0.623	0.68	---	---	---	
Cu	0.009	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.026	0.07	0.04	---	---	---	
Fe	0.012	---	0.027	0.056	0.032	0.047	---	---	0.082	---	---	0.01	0.071	---	---	0.031	---	---	---	---	
Mg	4.94	3.9	3.52	5.1	3.67	4.09	4.92	4.42	4.23	4.17	4.28	4.38	3.85	4.36	0.532	0.864	0.77	3.1	3.1	3.2	
Mn	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Na	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	49.6	57.2	44.7	59.6	72	59.8	
Ni	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Pb	---	---	0.414	---	0.29	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Se	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Si	66	59	54.5	40.1	34	35.2	39.7	38.4	40.6	37.2	42.1	39.6	40.4	39.4	0.543	1.03	0.33	73.8	69	66.4	
V	1.07	1.08	1.15	1.05	1.23	1.06	0.925	1.16	0.805	1.29	0.978	0.91	0.878	1.19	0.883	0.812	0.52	---	---	---	
Zn	---	---	---	4.94	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.229	0.203	0.2	---	---	---	

Tabla N° 3. Metales pesados encontrados en el embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico en el año 2017.

Metal	Enero 2017		
	A	B	C
As (mg/L)	15.7	17.3	8.02
Ba (mg/L)	0.055	0.071	0.09
Ca (mg/L)	33.4	47.5	51.9
Fe (mg/L)	0.018	---	---
Mg (mg/L)	---	2.56	2.64
Na (mg/L)	56.9	62.7	67.9
Si (mg/L)	38.1	53.3	56.9

Tabla N° 4. Nivel del agua en el Embalse Cerrillos en los meses que se analizaron las muestras. (U.S Geological Survey).

Año	Meses	Promedio (pies)
2015	Noviembre	558.02
	Enero	555.42
2016	Febrero	551.89
	Marzo	551.39
	Abril	550.49
	Septiembre	555.40
	Octubre	569.22
2017	Diciembre	573.35
	Enero	572.44

Tabla N° 5. Metales pesados que alcanzaron los límites establecidos por la OMS y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades * en noviembre 2015, en el año 2016 y enero 2017.

Mes/Muestra	Ag (mg/L)	As (mg/L)	Cr (mg/L)	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	V (mg/L)	Zn (mg/L)
Noviembre (2015)	A	1.26	0.46	0.409	---	---	0.913
	B	0.785	9.78	0.459	---	---	1.11
	C	1.17	8.3	0.443	---	0.33	0.869
Enero (2016)	A	0.372	12.8	0.305	---	---	1.07
	B	1.85	11.7	0.372	---	---	1.08
	C	0.744	11.4	0.362	---	0.414	1.15
Febrero (2016)	A	1.47	---	0.403	---	---	1.05
	B	1.84	14.4	0.345	---	0.29	1.23
	C	0.619	1.03	0.368	---	---	1.06
Marzo (2016)	A	1.91	7.71	0.358	---	---	0.925
	B	0.49	2.85	0.377	---	---	1.16
	C	0.914	5.01	0.375	---	---	0.805
Abril (2016)	A	1.54	9.63	0.362	---	---	1.29
	B	1.25	4.35	0.37	---	---	0.978
	C	1.81	9.2	0.368	---	---	0.905
Septiembre (2016)	A	1.33	16.2	0.373	---	---	0.878
	B	0.343	12.4	0.49	---	---	1.19
	C	1.65	10.5	0.655	0.122	---	0.883
Octubre (2016)	A	1.24	14.2	0.623	0.1	---	0.812
	B	1.2	8.35	0.678	0.096	---	0.52
	C	---	7.06	---	---	---	---
Diciembre (2016)	A	---	16.4	---	---	---	---
	B	---	13	---	---	---	---
	C	---	15.7	---	---	---	---
Enero (2017)	A	---	17.3	---	---	---	---
	B	---	8.02	---	---	---	---
	C	---	---	---	---	---	---
Estándar	0.01 mg/L	0.01 mg/L	0.05 mg/L	0.003 mg/L	0.01 mg/L	0.22 mg/L*3 mg/L	

Tabla N° 6. Prueba de Kruskal Wallis.

	Elementos detectados
Chi-cuadrado	.467
gl	2
Sig.	.792

a. Prueba de Kruskal-Wallis
b. Variable de agrupación: Puntos de muestreo

Tabla N° 7. Prueba de ANOVA en la regresión lineal.

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Promedio del cuadrado	F	Sig.
1	Regresión	12.776	1	12.776	16.422	.005b
	Residual	5.446	7	.778		
	Total	18.222	8			

a. Variable dependiente: Metales detectados que sobrepasaron el límite
b. Predictor: (Constante), Nivel de agua en el embalse

Tabla N° 8. Resumen del modelo de regresión lineal.

Resumen del Modelo				
Modelo	R	R Cuadrado	R Cuadrado ajustado	Error estándar estimado
1	.837a	.701	.658	.882

a. Predictor: (Constante), Nivel de agua en el embalse

Tabla N° 9. Prueba de regresión lineal

Coeficientes ^a						
Modelo		B	Error estándar	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	80.007	18.895		4.234	.004
	Nivel de agua en el embalse	-.137	.034	-.837	-4.052	.005

a. Variable dependiente: Metales detectados que sobrepasaron el límite.

DISCUSIÓN

Conforme a la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades, los metales que excedieron el límite en el mes de noviembre del año 2015 fueron: Plata (Ag), Arsénico (As), Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Vanadio (V). Por otra parte, los metales que excedieron el límite en los meses de enero, febrero, marzo, abril, septiembre, octubre y diciembre del año 2016 fueron: Plata (Ag), Arsénico (As), Cromo (Cr), Cadmio (Cd),

Plomo (Pb), Vanadio (V) y Zinc (Zn). Finalmente, el único elemento que excedió el límite en enero del año 2017 fue Arsénico (As). Estos resultados se observan en la Tabla 5.

Para discutir la pregunta de investigación: ¿Cómo se diferencia la cantidad de elementos detectados en los distintos puntos de muestreo en el Embalse Cerrillos de Ponce? se llevó a cabo una prueba no paramétrica para tres muestras

independientes. La prueba de Kruskal Wallis se realizó para probar si no existe diferencia significativa en la cantidad de elementos detectados y los puntos de muestreo en el Embalse Cerrillos de Ponce. Se utilizó una prueba no paramétrica, dado que no se cumplió el supuesto de normalidad (Shapiro-Wilk = $p < 0.05$) en los tres puntos de muestreo para comparación (Field, 2015). Los resultados de la prueba no fueron significativos, χ^2 (N= 26) = .467, $p = .792$. Este valor de p , si se compara a una significancia de 0.05 ($p > 0.05$) indica que no se rechaza la hipótesis nula. Por tanto, no existe diferencia significativa en la cantidad de elementos detectados y los puntos de muestreo en el Embalse Cerrillos de Ponce (ver Tabla 6). Esto demuestra que no hay un punto específico que represente mayor cantidad de elementos detectados como un foco de contaminación.

La plata tiende acumularse y causar toxicidad en organismos acuáticos, específicamente niveles tróficos bajos (Ratte et. al 1999), también afecta a organismos de mayor nivel, como el pescado, a través de la transferencia de plata en las redes alimenticias acuáticas (Luoma et. al 1999). En este estudio se encontraron concentraciones de Ag elevadas en cada punto de muestreo, los promedios de las concentraciones mencionadas en la Tabla 5 son los siguientes: punto A (1.34 mg/L), punto B (1.29 mg/L) y punto C (0.887 mg/L). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la concentración de plata no debe exceder de 0.01 mg/L.

El arsénico es muy tóxico, es una de las 10 sustancias químicas que la OMS considera más preocupantes para la salud pública. Según Jabeen G. et. al. (2011), el enriquecimiento significativo de As en los órganos de los peces tiene una dependencia directa con la toxicidad de As en el agua, al mostrar bioacumulación de este toxico afectando las cadenas alimentarias de los ecosistemas, los promedios de las concentraciones mencionadas en la Tabla 5 son los siguientes: punto A (8.5 mg/L), punto B (12.49 mg/L) y punto C (10.95 mg/L). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la concentración de arsénico no debe exceder de 0.01 mg/L.

De acuerdo con Song et. al 2016, el cromo es uno de los metales pesados más peligrosos, los efectos tóxicos del Cr en el crecimiento y desarrollo de las plantas incluyen alteraciones en el proceso de germinación, así como en el crecimiento de raíces, tallos y hojas, que afectan la producción y el rendimiento (Shanker et. al 2005). Los promedios de las concentraciones mencionadas en la Tabla 5 son los

siguientes: punto A (0.410 mg/L), punto B (0.416 mg/L) y punto C (0.452 mg/L). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la concentración de cromo no debe exceder de 0.05 mg/L.

Otro de los elementos encontrados que excedió la concentración de la Organización Mundial de la Salud fue el cadmio, este elemento en las plantas se acumula y causa cambios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y estructurales al incluir problemas en el crecimiento (Benavides et. al 2005). Las concentraciones mencionadas en la Tabla 5 del mes de octubre son los siguientes: punto A (0.122 mg/L), punto B (0.1 mg/L) y punto C (0.096 mg/L).

En cuanto al plomo, los niveles elevados en la sangre no sólo causan trastornos del sistema nervioso central, sino que también afectan los riñones, la sangre y el sistema cardiovascular a medida que los niños crecen y se desarrollan. Los problemas de salud derivados de la contaminación ambiental por plomo son un grave problema de salud pública en muchos países en desarrollo (Falk, 2003). De acuerdo con Radulescu et. al. (2014) el Pb tiene una fuerte toxicidad para la biota acuática al modificar las propiedades, los promedios de las concentraciones mencionadas en la Tabla 5 son los siguientes: punto A (0 mg/L), punto B (0.29 mg/L) y punto C (0.372 mg/L). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la concentración de plomo no debe exceder de 0.01 mg/L.

Para discutir la pregunta de investigación: ¿Cómo incide el nivel de agua en el Embalse Cerrillos de Ponce en los metales pesados que alcanzaron los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades? se llevó a cabo una regresión lineal. La regresión lineal se realizó para probar que el nivel de agua en el Embalse Cerrillos de Ponce no incide en los metales pesados que alcanzaron los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades. Cabe señalar, que para dicho análisis de regresión lineal se cumplió con los supuestos de la escala de medición de variables, la normalidad (Shapiro-Wilk = $p > 0.05$) y la linealidad (Field, 2015).

Al analizar la prueba de ANOVA de la regresión lineal (Tabla 7) se establece que el modelo de metales detectados que sobrepasaron el límite y nivel de agua en el embalse fue significativo ($p < 0.005$). Esto demuestra que el nivel de agua en el embalse incide significativamente en los me-

tales detectados que sobrepasan el límite de contaminación. Además, de que ambas variables están linealmente relacionadas, en la Tabla 8 se observa que el coeficiente de determinación (R²) ajustado explica que el nivel de agua en el embalse incide en un 65.8% los resultados de los metales detectados que sobrepasaron el límite; no obstante, para analizar los coeficientes en la predicción del modelo se interpreta que el valor de la pendiente del modelo de regresión (-.137), indica cuanto cambia la variable dependiente (metales detectados que sobrepasaron el límite) dado un cambio en la variable independiente (nivel de agua en el embalse). Según esto, la ecuación de regresión queda de la siguiente manera: Pronóstico en metales pesados que sobrepasan el límite = 80.007 - .137 (nivel de agua embalse en pies).

Durante los meses de diciembre 2016 y enero 2017 la elevación del agua en el Embalse Cerrillos alcanzó los 573.35 y 572.44 pies respectivamente, estos meses registraron la mayor cantidad de agua durante el periodo estudiado en el Embalse. De acuerdo con la Tabla 5, las concentraciones de metales pesados que sobrepasaron el límite fueron menores durante los meses de diciembre 2016 y enero 2017 (Ver Tabla 5), esto demuestra que mientras haya una alta cantidad de agua en el Embalse, menor concentración de metales pesados se encontrará en el mismo. Este

hallazgo concuerda con la investigación de Ajami y Fataei (2015), donde en la época de baja precipitación los valores de plomo y cromo sobrepasaron los límites de la Agencia de Protección Ambiental y la Organización Mundial de la Salud.

CONCLUSIONES

A base de los resultados de la investigación se demuestra que los elementos Plata (Ag), Arsénico (As), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Vanadio (V), Cadmio (Cd) y Zinc (Zn) excedieron el límite permitido por las agencias: Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades. Además, se concluye que durante los meses que se analizó el embalse, no existe diferencia significativa en la cantidad de elementos detectados y los puntos de muestreo en el Embalse Cerrillos de Ponce. Por tanto, en todo el Embalse Cerrillos de Ponce, Puerto Rico, hubo la misma cantidad de elementos detectados en los meses del estudio. Finalmente, se estableció un modelo de predicción en el Embalse Cerrillos de Ponce para la detección de metales pesados que sobrepasan el límite de las agencias reguladoras OMS y la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades.

Pronóstico en metales pesados que sobrepasan el límite = 80.007 - .137 (nivel de agua embalse en pies).

REFERENCIAS

- Abubakar, A. J., Yusuf, S. & Shehu, K., (2015).** Heavy Metals Pollution on Surface. Water Sources in Kaduna Metropolis, Nigeria. *Science World Journal*, 10 (2), 1-5.
- Ajami, F. & Fataei, E. (2015).** Determination of Heavy Metals level (lead, cadmium, chrome) in waters of Meshkinshahr River for agricultural use. *Advances in BioResearch*, 6 (3), 12-15.
- Benavides, M., Gallego, S. & Tomaro, M. (2005).** Cadmium toxicity in plants. *Toxic metals in Plants*, 17 (1), 21-34.
- EPA. (30-Julio-2013).** Clean Lakes. 03-October-2015, de Environmental Protection Agency. Web: <http://water.epa.gov/type/lakes/>
- Falk, H. (2003).** International environmental health for the pediatrician: case study of lead poisoning. *Pediatrics*, 112 (1), 259-264.
- Field, A. (2015).** *Discovering Statistics using IBM SPSS Statistics*. Sage Publications, Estados Unidos
- Perlman, H. (07-Mayo-2015).** Distribución del agua de la Tierra. (03-October-2015), de U.S Geological Survey. Web: <https://water.usgs.gov/gotita/waterdistribution.html>
- Iannacone J. & Salazar N. (2007).** Efecto Toxicológico de Muestras de Agua del Lago Junín, Peru, sobre *Chironomus calligraphus* (Diptera: Chironomidae). Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (17-Agosto-2009).** Metales Pesados. 03-October-2015, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Web: <http://www.inecc.gob.mx/sqe-temas/763-aqre-metales>

Jabeen G. & Javed M. (2011). Evaluation of Arsenic Toxicity to Biota in River Ravi (Pakistan) Aquatic Ecosystem, *International Journal of Agriculture & Biology*, 13(6), 929-934. JCA. (Abril 2003). Contaminación de Agua. 03-October-2015, de Junta de Calidad Ambiental. Web:<http://agricultura.uprm.edu/es-correntia/Fuentes%20de%20contaminacion/JCA%20contaminacion%20agua.pdf>

Li, H., Shi, A., Li, M. & Zhang, X. (2013). Effect of pH, Temperature, Dissolved Oxygen, and Flow Rate of Overlying Water on Heavy Metals Release from Storm Sewer Sediments. *Journal of Chemistry*, Volume 2013, Article ID 434012.

Luoma S.N., Hogstrand, C. Bell, R.A., Bielmyer, G.K., Galvez, F., LeBlanc, G.A. & B.G. Lee (1999). Silver in the environment: transport, fate, and effects. In *University of Wisconsin Sea Grant (A.W. Andren and T.W. Bober, Eds), Wisconsin*, p 65-97.

Lychagin, M. Y., Tkachenko, A. N., Kasimov, N. S. & Kroonenberg, S. B. (2015). Heavy Metals in the Water,

Plants, and Bottom Sediments of the Volga River Mouth Area. *Journal of Coastal Research*, 31 (4), 859-868.

Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J. & Solar-te-Soto, J. A. (2014). Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Ingeniería y Competitividad*, 16 (2), 179-188.

Mezquida, R. (2012). Toma de muestras. Corporación autónoma regional de los valles del Sinu y del San Jorge, cvs laboratorio de calidad de aguas. Versión 5; 2012-10-23 Recuperado de http://www.cvs.gov.co/jupgrade/images/stories/docs/varios/MT-LAB-CVS_04_Toma_de_muestras_V4.pdf.

Monikh, F. A., Maryamabadi, A., Savari, A. & Ghanemi, K. (2015). Heavy metals' concentration in sediment, shrimp and two fish species from the northwest Persian Gulf. *Toxicology & Industrial Health*, 31 (6), 554-565.

- Morales D. (2015).** ICP-OES 3300XL Inductor de Plasma Acoplado por Emisión de Espectroscopía Óptica. Natural Resources Defense Council. (s.f.). Water. 03-Octubre-2015, de Natural Resources Defense Council. Web: <http://www.nrdc.org/water/>
- Olgunoğlu, M. P., Artar, E. & Olgunoğlu, İ. A. (2015).** Comparison of heavy metal levels in muscle and gills of four benthic fish species from the Northeastern Mediterranean Sea. Polish Journal of Environmental Studies, 24 (4), 1743-1748.
- Organización Mundial de la Salud. (2006).** Guías para la Calidad del Agua Potable. 1 (1), 243-362.
- Radulescu, C., Dulama, I. D., Stih, C., Ionita, I., Chilian, A., Necula, C. & Chelarescu, E.D. (2014).** Determination of heavy metal levels in water and therapeutic mud by atomic absorption spectrometry. Romanian Journal of Physics, 1 (59), 1057-1066.
- Ratte, H.T. (1999).** Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: a review. Environ ToxicolChem, 18, 89-108.
- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H. & Avudainayagam, S. (2005).** Chromium toxicity in plants. Environmental International, 31 (5), 739-753.
- Song, D., Pan, K., Tariq, A., Azizullah, A., Sun, F., Li, Z. & Xiong, Q. (2016).** Adsorptive Removal of Toxic Chromium from Waste-Water Using Wheat Straw and Eucapatorium adenophorum. Plos ONE, 11(12), 1-15.
- Water-Year Summary for USA, 2017-04-01** de U.S Geological Survey
Web:https://waterdata.usgs.gov/nwis/wys_rpt/?site_no=11147500&agency_cd=USGS
- USGS Current Conditions for Puerto Rico, 2017-04-03** de U.S Geological Survey Web: <https://waterdata.usgs.gov/pr/nwis/rt>
- Voica, C., Kovacs, M. & Feher, I. (2013).** Determinations of Heavy Metals in Surface Waters from Transylvania," Romanian Journal of Physics, 57, (6-7), 1184-1193.