

# Concentración de metales en sedimento y su relación con los patrones de deposición en la presa José Antonio Alzate, Estado de México

Juan Antonio García Aragón  
Carlos Díaz Delgado  
Pedro Morales Reyes

Centro Interamericano de Recursos del Agua  
Universidad Autónoma del Estado de México

Pedro Ávila Pérez  
Samuel Tejeda Vega  
Graciela Zarazúa Ortega

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

*Ante la gran diversidad de industrias que descargan al río Lerma, entre las cuales se encuentra la metal-mecánica, química y textil, se han intensificado los estudios de contaminación por metales pesados en el embalse José Antonio Alzate, el cual es el primero sobre el curso del río Lerma. En este trabajo se presentan los resultados de la concentración de algunos metales en columnas de sedimento. Se analizaron capas sedimentarias de 5 y 7 cm de espesor hasta profundidades de un metro, por medio de espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía, en diferentes zonas del embalse. Además, se dan los resultados de una campaña de muestreo de sedimentos en suspensión en la entrada del embalse para determinar el volumen de azolve y la tasa de sedimentación. Los volúmenes retenidos y las concentraciones de metales presentes en la columna sedimentaria permiten establecer los probables periodos de acumulación de algunos metales. Finalmente se asocian estos resultados con las acciones de saneamiento que se han realizado sobre la cuenca alta del río Lerma para determinar el efecto que éstas han tenido sobre el ecosistema.*

**Palabras clave:** metales, contaminación, sedimentos, azolve, saneamiento, hidrología, columna sedimentaria, fluorescencia de rayos X.

## Introducción

El embalse José Antonio Alzate es el primero sobre el curso del río Lerma en el Estado de México. Se encuentra situado treinta kilómetros aguas abajo de la zona de descarga de aguas residuales del corredor industrial Toluca-Lerma, donde se sitúan diversas industrias con diferentes giros. De esas aguas residuales industriales, sólo se trata adecuadamente el 30%. Lo anterior ha generado un problema de contaminación del embalse, el cual presenta elevados índices de eutrofización y viene funcionando como laguna de estabilización (Barceló, 2000 y Ávila, 2001).

Debido a los procesos fisicoquímicos de precipitación y sedimentación, algunos de los metales pesados que se introducen en un sistema acuático se depositan en los sedimentos (Ávila y Zarazúa, 1993; Baruah *et al.*, 1996; Dekov *et al.*, 1997; Rodríguez y Ávila, 1997). De tal manera, los sedimentos proveen información muy valiosa sobre la historia de la calidad del cuerpo de agua (Baryshev *et al.*, 1995; von Gunten *et al.*, 1997). El análisis de metales pesados de núcleos de sedimento, combinado con otras mediciones, ha sido empleado para interpretar la historia de la contaminación en cuerpos de agua (Croudace y Cundy, 1995). El aumento en las concentraciones de cobre, zinc y cadmio ha estado asociada con

el crecimiento de la producción industrial metal-mecánica del sector metalúrgico y extractivo, mientras que el plomo puede asociarse con el aumento de combustibles enriquecidos con plomo (von Gunten *et al.*, 1997), pigmentos, esmaltes, industria metal-mecánica, cerámica y odontológica, entre otras sustancias.

La presencia de algunos metales pesados puede ser un indicador de ciertas actividades industriales que provocaron el aumento en sus niveles dentro de los sedimentos. Sin embargo, es necesario considerar que los sedimentos del embalse Alzate se forman bajo un aporte importante de suelos de origen volcánico y lacustre, que pueden contribuir significativamente con los niveles de ciertos elementos y no deberse exclusivamente a la contaminación provocada por la actividad industrial. En efecto, en el valle se identifican sedimentos lacustres y aluviales, intercalados con materiales clásticos de origen volcánico, que se formaron a partir del Eje Neovolcánico Transmexicano (Deman, 1978; Esteller y Díaz, 2002), ya que la cuenca está constituida por una franja de naturaleza volcánica de tipo calcoalcalino. La secuencia litológica está constituida por diversos tipos de rocas volcánicas del terciario, fundamentalmente basaltos y andesitas, así como materiales piroclásticos y brechas, los cuales afloran en las sierras que rodean el valle.

Los materiales sedimentarios lacustres están constituidos por arenas de grano fino a grueso, con cantidades significativas de limos claros y arcillas oscuras de espesor variable, que tienden a concentrarse en sitios específicos dentro de la presa. Las capas oscuras contienen minerales arcillosos y materia orgánica en partículas que genera el color oscuro. Las capas de grano fino también contienen calcita. La secuencia de gradación es normal, disminuyendo el tamaño del grano hacia arriba a la base del lecho. El espesor variable de las capas finas se debe a que el material en suspensión a la entrada es diferente durante el año (Reyes *et al.*, 1999).

Con respecto a los contaminantes inorgánicos presentes en el embalse Alzate, particularmente los metales pesados, se han determinado niveles altos de cromo, hierro, plomo, cobre, zinc y cadmio en fase acuosa (Ávila, 1995), y en sedimentos (Barceló *et al.*, 1996).

Por otro lado, los sedimentos son transportadores y fuentes potenciales de contaminantes en sistemas acuáticos; estos materiales también pueden afectar la calidad del agua subterránea y los productos agrícolas cuando se depositan en los terrenos aledaños por los trabajos de desazolve en el trayecto de los cuerpos de agua. Cuando existen embalses en un curso de agua se disminuye la velocidad de la corriente, provocando el depósito de la materia en suspensión, lo que genera el azolve de embalses, afectando su vida útil (Yang, 1996). Desde el pun-

to de vista ecológico, esto modifica los patrones normales de calidad de agua de un río. Diversos contaminantes hidrófobos, asociados con la materia en suspensión, se acumulan en esos depósitos y, de acuerdo con las condiciones hidrológicas y fisicoquímicas, pueden inmovilizarse o regresar a la columna de agua por procesos de desorción y resuspensión (Mehlich, 1981). Así pues, el aumento de la contaminación de la columna de agua se refleja en el incremento de la contaminación del sedimento.

Finalmente, en este trabajo se analizó la presencia de metales en las columnas sedimentarias del embalse Alzate, con la intención de explicar la evolución espacio-temporal de la contaminación presente y su relación con los procesos de deposición.

## **Materiales y métodos**

### *Muestreo de sedimentos en suspensión en el río Lerma*

Las mediciones de sedimentos en suspensión en el río Lerma se efectuaron en el sitio del puente de la carretera Toluca-Temoaya. Este lugar se localiza dos kilómetros aguas arriba del poblado San José Pathé, donde comienza el embalse Alzate; por lo tanto, es una medida de la entrada de sedimentos a la presa a través del río Lerma.

Se efectuaron mediciones de perfiles de concentración en la vertical, con periodicidad semanal durante un año calendario. Las profundidades de muestreo variaron de acuerdo con el tirante del río. En tirantes bajos, menores de dos metros, se efectuaron cada veinte centímetros; para tirantes medios, de hasta tres metros, cada treinta centímetros, y para tirantes altos, mayores de tres metros, cada cuarenta centímetros. Se utilizaron botellas de 300 ml, las cuales se fijaron a una varilla, con el espaciamiento en la vertical anteriormente indicado. Las muestras se llevaron al laboratorio de calidad del agua del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), donde, por medio del método de evaporación y posterior peso de la muestra seca, se determinó la concentración de sedimentos para cada altura medida.

### *Determinación de la relación caudal líquido-caudal sólido.*

Con el objetivo de determinar el volumen afluente de sedimentos, se calculó una concentración media en mg/l para cada perfil. Con esta concentración media y el caudal estimado con base en el tirante medido, se calculó la carga sólida correspondiente en toneladas por día. Posteriormente, se efectuó una correlación caudal sólido ( $Q_s$ )-caudal líquido ( $Q_l$ ), con el propósito de poder inferir los

caudales sólidos para los valores promedio multianuales de caudales líquidos. Lo anterior, en vista del corto periodo de muestreo de sedimentos en suspensión y de la valiosa disponibilidad de datos de caudal líquido de más de cuarenta años. Posteriormente se procedió a un análisis estacional de los perfiles. Este análisis presentó parámetros estadísticos mucho más aceptables para el caso de los meses de lluvias. La correlación resultante se muestra en la ilustración 1.

*Cálculo del aporte medio anual de sólidos al embalse*

El volumen total anual medio de sólidos que ingresa al embalse Alzate se estimó con base en el caudal líquido medio mensual multianual del río Lerma. Con dicho caudal y las correlaciones  $QI-Qs$  se estimó el caudal sólido medio mensual. Posteriormente se infirió la capacidad de retención de sólidos en el embalse por medio de la siguiente relación propuesta por Churchill (1948):

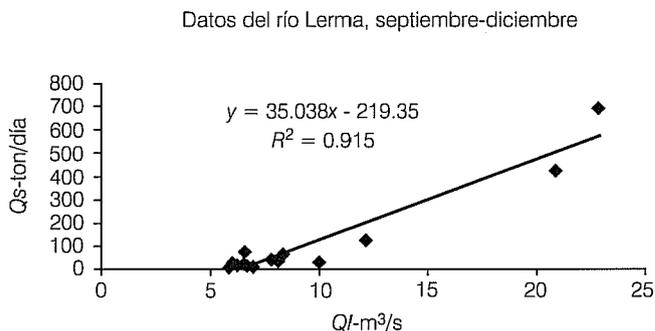
$$Pr = 100 - \left[ 800(IS)^{-0.2} - 12 \right]$$

donde:

- $Pr$  = porcentaje de sedimentos retenidos.
- $IS$  = índice de sedimentación =  $Tr/V$ .
- $Tr$  = tiempo de retención = volumen/caudal medio afluente.
- $V$  = velocidad media del flujo.

El tiempo de retención se determinó con base en el volumen medio para cada mes, el cual se dividió por el caudal medio del mismo mes. La velocidad media se calculó considerando 14 secciones transversales del embalse, obtenidas con base en la topografía del terreno

**Ilustración 1. Relación caudal líquido-sólido afluentes al embalse para los meses de lluvia.**



antes de la construcción. Así, bajo el empleo de la ecuación de continuidad con el caudal medio de cada mes, se obtuvo un valor medio de velocidad para cada sección. La velocidad promedio para cada mes en el embalse se obtuvo promediando la velocidad resultante en las secciones consideradas. El volumen medio en cada mes se calculó con los datos de operación del embalse proporcionados por la Comisión Nacional del Agua desde su construcción hasta 1997 (García et al., 2000).

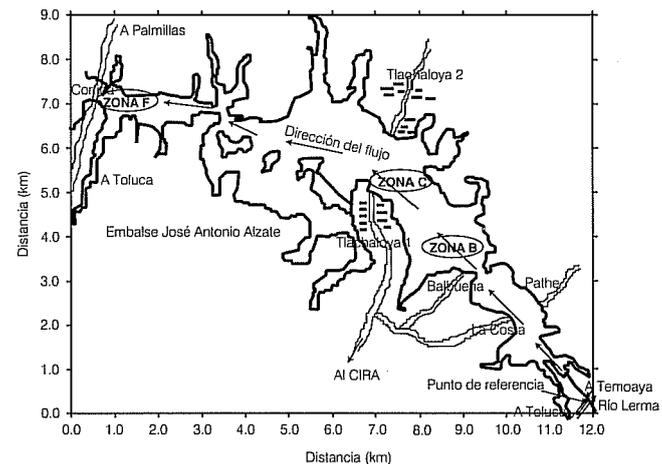
*Muestreo de sedimentos para determinar la concentración de metales*

La ilustración 2 muestra la ubicación de las zonas de muestreo de los sedimentos. Los núcleos obtenidos en cada zona del embalse en los dos periodos de muestreo fueron los siguientes: zona B, 1 y 2; zona C, 1, 2, 3 y perfil; zona F, 1 y 2.

Se realizaron dos muestreos en los meses de abril y mayo de 1999, con lo cual se obtuvieron dos núcleos en la zona F; cuatro núcleos de la zona C frente al embarcadero de Tlachaloya, donde tres de ellos se colectaron con el "nucleador" y otro con espátula, en un perfil a la orilla del río hasta una profundidad de 84 cm, y dos núcleos en la zona B, a 150 m de distancia del cauce principal del río y retirado del área de maniobras para desazolve.

Los núcleos de sedimento y las muestras obtenidas del perfil se congelaron de inmediato con nitrógeno líquido y se transportaron en hieleras al laboratorio para su análisis. En el laboratorio, los núcleos de sedimento se cortaron a cada 5 o 7 cm, y junto con los perfiles se secaron en una estufa a cincuenta grados centígrados durante 48 horas. Posteriormente, las muestras de sedimento

**Ilustración 2. Zonas de muestreo en el embalse José Antonio Alzate.**



se molieron en mortero de ágata y se pasaron a través de un tamiz de malla número 200. Se utilizaron dos gramos del material molido y tamizado para preparar pastillas de 3.1 cm de diámetro a cinco toneladas de presión para el análisis de metales.

#### Análisis de concentración de metales

Se determinaron las concentraciones de potasio, calcio, titanio, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, galio, plomo, rubidio, estroncio y circonio en núcleos de sedimento de las zonas B, C y F (ver ilustración 2), a través de la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (EDXRF). La evaluación de los espectros se realizó bajo el empleo del programa AXIL (van Espen *et al.*, 1993) y la concentración de cada elemento se determinó mediante el programa SAX (Valdés y Jaramillo, 1994), utilizando curvas de calibración de patrones externos y los materiales de referencia Soil-7 y CRM-277 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y de la Comunidad Europea de Estándar para el control analítico de los resultados.

El equipo utilizado consiste en un detector de Si-Li, marca KEVEX, con voltaje de operación de 900 V, y resolución de 185 eV a 5.9 KeV; un amplificador Ortec, modelo 572; un multicanal Norland, modelo 5400, y una computadora HP-Vectra 486, con coprocesador integrado. Como fuentes de excitación se utilizaron tres fuentes radiactivas: la primera de <sup>55</sup>Fe, para el análisis de silicio, azufre, potasio y calcio; la segunda de <sup>238</sup>Pu para analizar potasio, calcio, titanio, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc y galio, y la tercera, de <sup>109</sup>Cd, se empleó para analizar rubidio, estroncio y circonio.

Cada muestra se analizó por triplicado, con un tiempo de colección del espectro de mil segundos. Las muestras se cuantificaron mediante el método de comparación de estándar, utilizando el método de corrección por Compton para corregir los efectos de matriz.

Se determinaron las concentraciones de cada elemento en tres núcleos identificados como B, C y F, a profundidades de 37, 84 y 45 cm, con incrementos de 7, 5 y 5 cm, respectivamente, a partir de la superficie del lecho.

#### Factores de enriquecimiento de metales en sedimentos

Con el objeto de determinar las contribuciones naturales y antropogénicas de los elementos en los sedimentos del embalse, se determinaron los factores de enriquecimiento (Lawson y Winchester, 1979; Poissant *et al.*, 1994). El cálculo de los factores se llevó a cabo mediante la ecuación:

$$FE = \frac{CA_{muestra} / CR_{muestra}}{AXS / ARS}$$

donde:

- FE = factor de enriquecimiento.
- CA<sub>muestra</sub> = concentración del elemento x en la muestra.
- CR<sub>muestra</sub> = concentración del elemento de referencia en la muestra.
- AXS = abundancia del elemento x en sedimentos derivados de rocas ígneas.
- ARS = abundancia del elemento de referencia en sedimentos derivados de rocas ígneas.

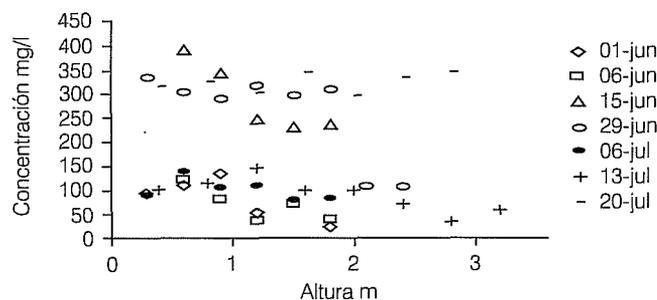
Como elemento de referencia en el embalse se utilizó al hierro, debido a que en trabajos anteriores se ha podido determinar que este elemento tiene un origen mayoritariamente natural en la presa (Ávila, 1995; Ávila *et al.*, 1999; Barceló, 2000).

### Resultados y discusión

#### Aporte de sedimentos al embalse José Antonio Alzate

La ilustración 3 muestra algunos resultados de la medición de la concentración de sedimentos en suspensión en el río Lerma. Se puede observar que durante los meses de junio-julio, las concentraciones no superan los 400 mg/l; en cambio, en el periodo agosto-septiembre, se encuentran concentraciones superiores a 800 mg/l. Esto indica que en ese lapso se llevó a cabo el mayor transporte de sedimentos al embalse Alzate. Estos meses corresponden al inicio de las mayores precipitaciones. Sin embargo, no son necesariamente los meses de mayor caudal líquido. El fenómeno puede estar asociado con la mayor disponibilidad de sedimentos en la cuenca, los

Ilustración 3. Medición de sedimentos en suspensión en el río Lerma (junio-julio de 1999).



cuales son arrastrados por las primeras lluvias de alta intensidad, lo que genera un lavado del terreno. Los caudales de los meses subsiguientes, aunque grandes por el efecto del flujo base, no encuentran sedimentos en tal cantidad y, por lo tanto, las concentraciones decrecen para caudales similares a los de agosto.

El cuadro 1 presenta los resultados del cálculo del volumen sedimentario promedio anual acumulado en el embalse Alzate.

En el cuadro 1 se puede observar que durante los meses de mayo-septiembre se acumula el 82% del volumen total anual. Históricamente, durante esos meses el embalse por efectos de operación (García *et al.*, 2000) se encuentra en los niveles más bajos, con un volumen menor a 15 Mm<sup>3</sup>. De acuerdo con la curva de capacidad del embalse, ese volumen corresponde a 2,560 metros sobre el nivel del mar (msnm). En la curva de área *versus* elevación (ilustración 4) se comprueba que en ese nivel el área del embalse es menor a doscientas hectáreas.

Con base en lo anterior es posible estimar que el espesor medio del depósito sedimentario en las doscientas hectáreas por debajo de la cota de 2,562 msnm del embalse José Antonio Alzate es de aproximadamente 80 cm (1.6 Mm<sup>3</sup>/200 ha).

#### Concentración de metales en los sedimentos

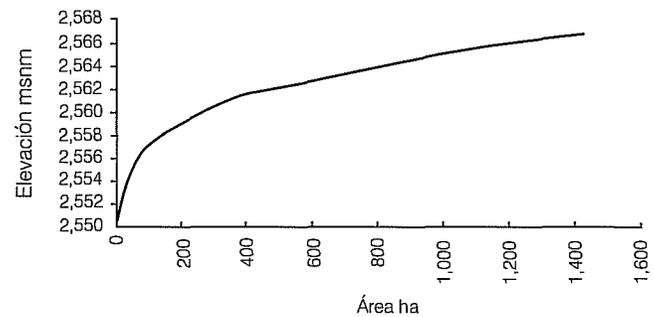
Las concentraciones medidas de los elementos analizados en los núcleos de sedimento se presentan en el cuadro 2. Los elementos se agruparon de acuerdo con el

sitio o zona de muestreo, y con el número de núcleo correspondiente.

La composición química de los sedimentos, al menos hasta la profundidad que se muestreó, no presenta grandes diferencias en la concentración de cada elemento analizado, ya que los valores están dentro del mismo orden de magnitud para cada elemento específico. Sin embargo, en cada zona se detecta una variación de las concentraciones con la profundidad (ver ilustración 5). Los picos encontrados difieren en profundidad, pero presentan una similar variación de concentración en la columna (ver ilustraciones 6, 7 y 8), lo cual puede ser indicativo de eventos coincidentes en la deposición de metales como el cobre, plomo y zinc.

En general, los valores de níquel, cobre, zinc y plomo en los sedimentos del embalse no superan en promedio

Ilustración 4. Curva área-elevación del embalse José Antonio Alzate.



Cuadro 1. Cálculo del volumen acumulado de sólidos en el embalse José Antonio Alzate.

	QI promedio m <sup>3</sup> /s	Entradas Mm <sup>3</sup> /mes	Caudal sólido ton/día	Caudal sólido kg/mes	Caudal sólido m <sup>3</sup> /mes	Almac. medio Mm <sup>3</sup>	tiempo retención días	IS=Tr/Vmed	% retenido	Acum. sólidos m <sup>3</sup> /mes
Enero	5.30	13.93	46.23	1,405,854.30	878.66	35.15	76.78	331,698,662.31	96.19	845.8
Febrero	4.60	12.09	42.14	1,281,477.40	800.92	33.96	85.47	246,155,712.01	95.22	762.62
Marzo	4.20	11.04	38.64	1,175,042.40	734.40	27.62	76.15	219,317,561.34	94.83	696.40
Abril	4.30	11.30	40.12	1,220,049.20	762.53	18.68	50.29	144,846,341.93	93.34	711.75
Mayo	4.35	11.43	41.34	1,257,149.40	785.72	11.29	30.06	86,560,748.62	91.32	717.49
Junio	4.56	11.98	42.12	1,280,869.20	800.54	9.48	24.07	41,594,343.78	88.05	704.89
Julio	5.82	15.29	109.45	3,328,315.50	2,080.20	9.68	19.25	33,260,933.90	86.96	1,808.86
Agosto	16.00	42.04	973.05	29,590,389.68	18,493.99	11.69	8.46	14,615,250.91	82.48	15,253.69
Septiembre	12.82	33.68	229.84	6,989,348.04	4,368.34	18.17	16.41	28,350,639.10	86.14	3,763.02
Octubre	7.18	18.86	55.65	1,692,316.50	1,057.70	32.51	52.42	90,581,109.89	91.50	967.83
Noviembre	6.51	17.10	52.23	1,588,314.30	992.70	38.43	68.35	590,555,116.93	97.91	971.97
Diciembre	6.00	15.76	48.34	1,470,019.40	918.76	37.01	71.43	411,408,655.49	96.86	889.88
							Total	Lerma	(m <sup>3</sup> /año)	28,094
							Total	Embalse	(m <sup>3</sup> /año)	40,134

**Cuadro 2. Concentración de metales pesados en los núcleos del sedimento del lecho del embalse José Antonio Alzate.**

**Zona B, núcleo 2**

**Concentración en mg/kg**

Profundidad (en cm)	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Zr
7	3,829 ± 225	6,566 ± 48	5,021 ± 108	494 ± 12	38,786 ± 399	16 ± 4	22 ± 2	121 ± 4	22 ± 1	18 ± 1	69 ± 16	197 ± 30	245 ± 21
12	4,729 ± 131	7,190 ± 66	4,896 ± 25	456 ± 25	37,113 ± 177	17 ± 5	25 ± 5	160 ± 4	20 ± 2	24 ± 1	73 ± 16	211 ± 31	204 ± 18
17	3,953 ± 123	5,367 ± 84	4,765 ± 49	365 ± 27	35,390 ± 192	22 ± 1	24 ± 1	132 ± 1	25 ± 2	25 ± 1	98 ± 20	167 ± 27	209 ± 19
22	3,994 ± 210	4,052 ± 10	5,091 ± 152	245 ± 2	38,759 ± 208	19 ± 6	27 ± 1	142 ± 4	24 ± 3	20 ± 1	77 ± 17	139 ± 21	236 ± 22
27	3,567 ± 116	5,788 ± 194	5,192 ± 40	243 ± 26	37,777 ± 79	24 ± 6	33 ± 5	145 ± 6	22 ± 5	22 ± 1	122 ± 20	201 ± 20	218 ± 20
32	4,081 ± 305	11,370 ± 264	6,064 ± 45	366 ± 14	35,574 ± 251	18 ± 5	16 ± 2	109 ± 5	24 ± 3	12 ± 1	83 ± 19	351 ± 30	258 ± 22
37	3,845 ± 227	7,649 ± 105	5,952 ± 185	376 ± 33	37,209 ± 150	19 ± 3	22 ± 1	119 ± 1	22 ± 3	17 ± 3	69 ± 16	251 ± 25	224 ± 20

**Zona C, núcleo 3**

**Concentración en mg/kg**

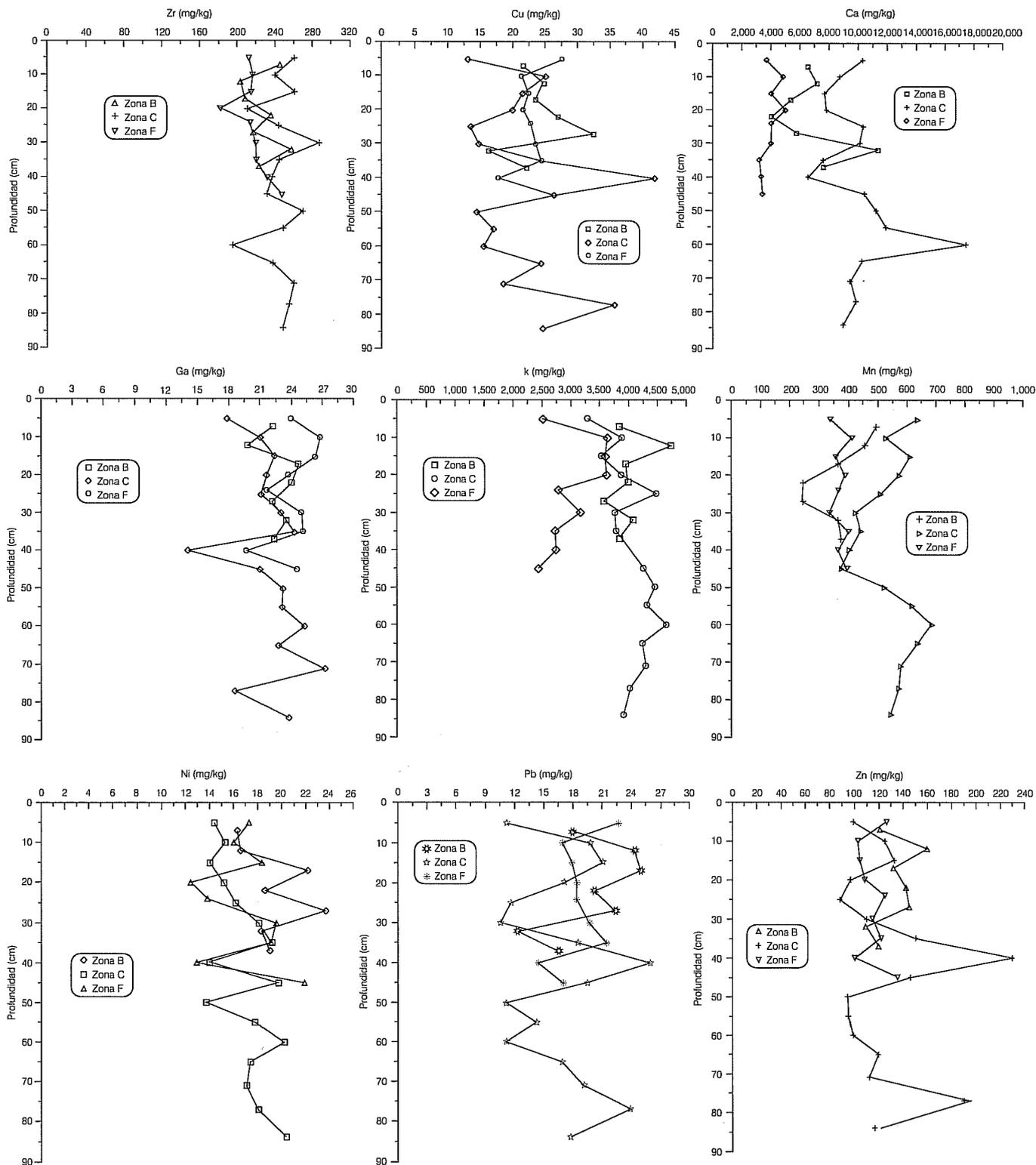
Profundidad (en cm)	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Zr
5	3,300 ± 480	10,312 ± 355	6,175 ± 375	636 ± 48	39,794 ± 639	14 ± 1	13 ± 4	99 ± 8	18 ± 1	11 ± 4	58 ± 12	316 ± 37	261 ± 25
10	3,886 ± 203	8,770 ± 198	5,363 ± 65	528 ± 10	36,673 ± 75	15 ± 1	25 ± 1	125 ± 1	21 ± 1	20 ± 1	98 ± 15	276 ± 24	240 ± 23
15	3,542 ± 196	515 ± 66	5,597 ± 303	612 ± 40	39,580 ± 455	14 ± 1	22 ± 1	132 ± 4	22 ± 3	21 ± 2	95 ± 15	228 ± 20	262 ± 19
20	3,888 ± 136	7,131 ± 33	4,047 ± 94	573 ± 16	33,495 ± 406	15 ± 2	20 ± 3	97 ± 1	22 ± 1	17 ± 4	41 ± 8	257 ± 21	212 ± 19
25	4,493 ± 29	10,356 ± 269	6,175 ± 123	510 ± 45	38,570 ± 688	6 ± 2	14 ± 4	88 ± 1	21 ± 1	12 ± 1	139 ± 16	318 ± 27	245 ± 20
30	3,763 ± 87	10,131 ± 428	6,545 ± 133	424 ± 24	38,475 ± 91	18 ± 1	15 ± 1	110 ± 1	23 ± 1	11 ± 3	82 ± 9	323 ± 30	288 ± 25
35	3,799 ± 65	7,652 ± 234	6,169 ± 189	442 ± 7	40,001 ± 765	19 ± 1	24 ± 3	150 ± 2	24 ± 1	19 ± 1	88 ± 11	233 ± 24	245 ± 24
40	4,050 ± 340	663 ± 70	4,476 ± 77	404 ± 20	34,628 ± 213	14 ± 1	42 ± 2	230 ± 4	14 ± 1	26 ± 2	64 ± 13	208 ± 18	238 ± 21
45	4,266 ± 203	10,465 ± 50	5,315 ± 53	376 ± 7	34,645 ± 40	20 ± 1	27 ± 2	146 ± 3	21 ± 1	20 ± 1	58 ± 10	351 ± 20	232 ± 22
50	4,457 ± 327	11,280 ± 154	6,234 ± 99	522 ± 10	37,980 ± 265	14 ± 1	15 ± 3	95 ± 3	23 ± 3	11 ± 1	128 ± 13	386 ± 25	271 ± 25
55	4,328 ± 378	11,967 ± 437	6,631 ± 313	618 ± 13	38,792 ± 138	18 ± 3	17 ± 1	95 ± 1	23 ± 1	14 ± 1	92 ± 12	376 ± 31	250 ± 22
60	4,657 ± 276	17,524 ± 40	8,639 ± 40	687 ± 40	42,148 ± 636	20 ± 1	16 ± 2	98 ± 3	25 ± 1	11 ± 3	29 ± 4	477 ± 25	197 ± 19
65	4,251 ± 182	10,312 ± 119	6,396 ± 100	637 ± 20	41,239 ± 700	17 ± 2	25 ± 1	119 ± 1	23 ± 1	17 ± 1	56 ± 9	320 ± 26	239 ± 21
71	4,308 ± 145	9,541 ± 221	5,387 ± 155	579 ± 12	37,623 ± 103	17 ± 4	19 ± 3	112 ± 4	27 ± 2	19 ± 2	65 ± 8	288 ± 16	262 ± 25
75	4,030 ± 334	9,919 ± 128	5,908 ± 161	573 ± 22	37,954 ± 286	18 ± 1	36 ± 1	195 ± 6	19 ± 1	24 ± 3	84 ± 12	317 ± 19	257 ± 24
84	3,927 ± 330	9,063 ± 40	5,146 ± 100	546 ± 55	38,965 ± 50	20 ± 2	25 ± 2	121 ± 5	24 ± 2	18 ± 2	95 ± 10	287 ± 24	250 ± 23

**Zona F, núcleo 1**

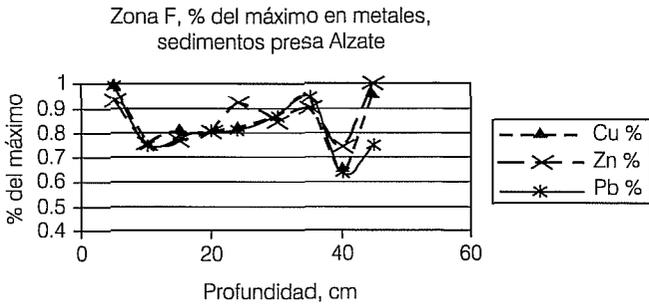
**Concentración en mg/kg**

Profundidad (en cm)	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Zr
5	2,517 ± 42	3,666 ± 121	4,614 ± 91	339 ± 27	41,235 ± 467	17 ± 3	28 ± 1	126 ± 2	24 ± 1	23 ± 1	56 ± 7	145 ± 20	213 ± 10
10	3,629 ± 189	4,830 ± 113	4,417 ± 90	411 ± 22	36,548 ± 211	16 ± 3	21 ± 1	103 ± 3	27 ± 3	17 ± 1	80 ± 11	146 ± 13	217 ± 8
15	3,598 ± 58	4,015 ± 150	4,084 ± 118	358 ± 13	38,642 ± 150	18 ± 4	22 ± 1	104 ± 5	26 ± 4	18 ± 2	73 ± 10	120 ± 9	216 ± 8
20	3,619 ± 180	5,002 ± 88	4,263 ± 71	389 ± 9	34,935 ± 194	12 ± 2	22 ± 1	109 ± 2	24 ± 1	18 ± 2	34 ± 2	105 ± 7	113 ± 9
24	2,781 ± 227	4,034 ± 265	4,441 ± 248	366 ± 16	37,638 ± 858	14 ± 1	23 ± 1	125 ± 11	22 ± 4	18 ± 2	6 ± 1	134 ± 12	215 ± 11
30	3,172 ± 153	4,037 ± 318	4,645 ± 78	337 ± 21	40,970 ± 778	20 ± 2	24 ± 2	115 ± 3	25 ± 4	20 ± 1	88 ± 14	116 ± 12	221 ± 9
35	2,724 ± 58	3,219 ± 119	4,820 ± 120	401 ± 14	43,623 ± 456	19 ± 4	25 ± 4	122 ± 4	25 ± 1	22 ± 1	69 ± 10	104 ± 8	221 ± 8
40	2,740 ± 36	3,359 ± 150	4,362 ± 155	366 ± 10	36,406 ± 263	13 ± 1	18 ± 1	100 ± 2	20 ± 1	14 ± 2	79 ± 12	91 ± 11	233 ± 10
45	2,436 ± 14	3,459 ± 132	4,754 ± 300	396 ± 19	44,696 ± 680	22 ± 4	26 ± 2	135 ± 2	25 ± 1	17 ± 1	64 ± 9	363 ± 12	248 ± 8

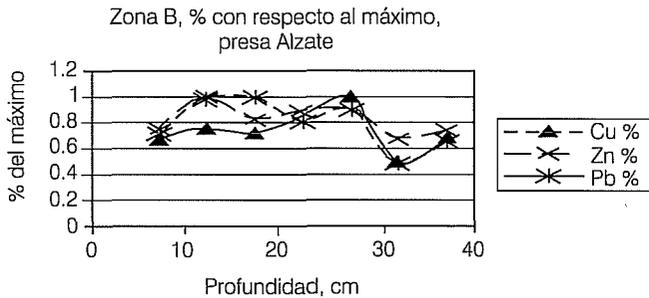
Ilustración 5. Perfil de metales en los núcleos de sedimentos en la presa José Antonio Alzate. La profundidad 0 cm representa la base del lecho; es decir, los sedimentos superficiales.



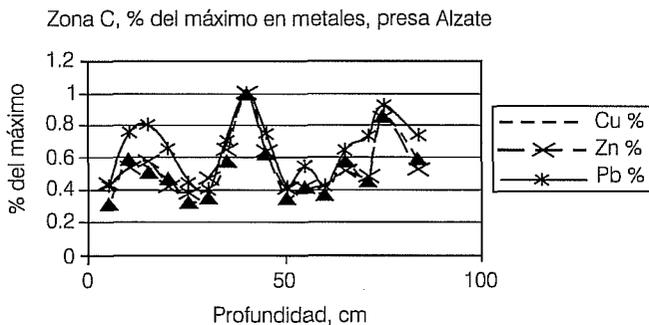
**Ilustración 6. Variación de concentraciones relativas en la columna sedimentaria, zona F.**



**Ilustración 7. Variación de concentraciones relativas en la columna sedimentaria, zona B.**



**Ilustración 8. Variación de concentraciones relativas en la columna sedimentaria, zona C.**



los niveles indicados por la EPA (1975) para la disposición en suelos de sedimentos dragados, aunque algunos picos, especialmente el cobre y el zinc, superan el criterio utilizado por la Agencia Ambiental del Canadá de 25 y 100 mg/kg, respectivamente (Kuntz, 1988). Los valores que se determinaron para el hierro se pueden considerar altos, ya que estas concentraciones superan el límite máximo considerado por la EPA para la disposición de sedimentos dragados en suelos, que es de 25,000 mg/kg. Sin embargo, las concentraciones promedio en-

contradas en los sedimentos se encuentran dentro de los valores promedio normales de sedimentos de origen lacustre y de rocas ígneas (Mason y Moore, 1982).

Las concentraciones de los metales en los núcleos de sedimento del embalse se presentan en el siguiente orden: Fe > Ca > Ti > K > Mn > Sr > Zr > Zn > Rb > Ga > Cu > Pb > Ni.

Cabe mencionar que los núcleos de sedimentos se obtuvieron en sitios ubicados aguas abajo de afluentes municipales e industriales, así como de importantes cursos de agua tributarios que drenan zonas con actividad agrícola significativa.

#### Factores de enriquecimiento en los sedimentos

Los resultados obtenidos de los cálculos de los factores de enriquecimiento se muestran en los cuadros 3 y 4. Se tiene que para la mayoría de los elementos existen bajas contribuciones naturales y antropogénicas a los sedimentos del embalse, debido a que la mayoría de los elementos presentaron bajos factores promedio de enriquecimiento. Los elementos que presentaron los mayores valores promedio fueron zinc = 2.336; galio = 2.000; plomo = 1.857; circonio = 1.835, y titanio = 1.565 (cuadro 3); y de manera individual fueron zinc = 4.740 y 3.076; plomo = 2.717, y 2.888 y titanio = 2.329 (cuadro 4). Lo anterior implica que para el caso del zinc, plomo y titanio existe alguna contribución por fuentes naturales o antropogénicas hacia la presa.

#### Variación de concentraciones de metales en la columna de sedimento

El cuadro 2 presenta las concentraciones de los metales pesados analizados y la ilustración 5 muestra los perfiles de estos metales en las tres zonas de muestreo. Los datos se evaluaron en términos de caracterizar ciertos litotipos, por un lado, y la fuente de origen de los metales, por otro, poniendo atención a varios elementos o grupos de elementos. Las curvas presentan, básicamente, el mismo comportamiento para todos los elementos analizados. Las concentraciones de los metales tienen una amplia variabilidad, en algunos casos son menores en la superficie, tal como el potasio y el níquel de las zona B y C; en otros casos presentan aumentos en la concentración a diferentes profundidades, como el calcio en las zonas B y C, y el zinc en la zona C y en otros más; también se presenta un comportamiento prácticamente homogéneo, tal como el galio y el circonio en la zona C. Existen fuertes gradientes para la mayoría de los elementos, excepto para el titanio, hierro, rubidio y estroncio. También se observa que el núcleo C presenta mayores

**Cuadro 3. Factores de enriquecimiento para los diferentes elementos en los sedimentos del embalse José Antonio Alzate.**

Elemento	Núcleo F	Núcleo B	Núcleo C	Promedio
K	0.148	0.209	0.205	0.187
Ca	0.138	0.256	0.360	0.251
Ti	1.317	1.626	1.753	1.565
Mn	0.499	0.518	0.747	0.588
Fe	1.000	1.000	1.000	1.000
Ni	0.284	0.347	0.284	0.305
Cu	0.533	0.591	0.524	0.549
Zn	2.090	2.564	2.355	2.336
Ga	2.038	2.050	1.913	2.000
Pb	1.806	2.063	1.703	1.857
Rb	1.029	1.280	1.157	1.155
Sr	0.420	0.784	1.083	0.762
Zr	1.676	1.870	1.959	1.835

**Cuadro 4. Factores de enriquecimiento máximo para algunos metales pesados en el sedimento del embalse José Antonio Alzate.**

Elemento	Núcleo F	Núcleo B	Núcleo C
K	—	—	—
Ca	—	—	—
Ti	—	1.937	2.329
Mn	—	—	—
Fe	—	—	—
Ni	—	—	—
Cu	—	0.831	1.103
Zn	2.159	3.076	4.740
Ga	—	—	—
Pb	2.117	2.717	2.888
Rb	—	1.911	2.006
Sr	—	—	1.507
Zr	—	2.199	—

concentraciones que los núcleos B y F para el potasio, calcio, titanio, manganeso, estroncio y circonio (ilustración 5), lo que indica que la zona C es un sitio significativo, donde existe acumulación de metales.

Las arcillas que se tienen en la superficie del lecho tienden a regular los efectos de acidificación por enlace con el H<sup>+</sup>, dando como resultado pH acuosos significativamente altos (Baruah *et al.*, 1996). Las crecientes concentraciones en los primeros ochenta centímetros probablemente se deban a un aumento de lixiviados, descomposición y oxidación de materia orgánica. Se considera que especialmente para el zinc y el plomo existen otras fuentes no naturales que juegan un papel importante en la carga de metales al embalse, tal como la con-

taminación difusa de origen antropogénico provocada por el arrastre de contaminantes por lluvia y erosión, así como por la contaminación puntual de descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

#### *Determinación del periodo de acumulación de metales*

Las ilustraciones 6, 7 y 8 muestran las concentraciones relativas con respecto al máximo medido en cada metal para las tres zonas del embalse, con el objeto de determinar si hay similitud en los patrones temporales de deposición o, en su defecto, disparidad.

En las ilustraciones 6, 7 y 8 se puede observar que los aumentos en la concentración de los metales estudiados

corresponden en profundidad para cada zona, no así entre zonas. Lo anterior puede deberse a que la sedimentación no es uniforme en el embalse o a la presencia de eventos naturales o antropogénicos que provocaron la acumulación de estos metales en las fechas a las que corresponden los aumentos en la concentración en la columna de sedimentos. El aumento más pronunciado en la concentración de los metales de la zona C se encuentra a cuarenta centímetros; el correspondiente a la zona B está a 27.5 cm y éstos se pueden relacionar con el pico de la zona F, en 32.5 cm.

Considerando una tasa de acumulación media en el embalse, de acuerdo con las mediciones de entrada de sedimentos de 40,134 m<sup>3</sup>/año (ver cuadro 1), y con una acumulación preferencial en las doscientas hectáreas por debajo de la cota de 2,560 msnm (ver ilustración 4), existe una deposición media de 2 cm por año. Así pues, el pico observado en la zona C correspondería a comienzos de la década de los ochenta. La disminución en los años siguientes se puede correlacionar con el inicio de las acciones de tratamiento de aguas residuales industriales que se han venido realizando en la cuenca. En efecto, la planta tratadora de aguas residuales industriales EPCCA (hoy Reciclagua), con capacidad para 0.3 m<sup>3</sup>/s, se construyó en 1984, lo que coincide con la hipótesis antes enunciada.

La explicación para el aumento de las concentraciones en la zona F después de 1995 puede estar relacionada con la hidrología e hidrodinámica propia del embalse. En efecto, las entradas de metales indican una disminución gradual a partir de 1985 en las tres zonas hasta 1995. A partir de esa fecha, sólo en la zona F empiezan a incrementarse nuevamente. Esa fecha coincide con el comienzo de un periodo lluvioso que tuvo su culminación con las inundaciones de la zona industrial en 1998. Por otro lado, las bajas velocidades en la cortina del embalse permiten la sedimentación de metales asociados con la materia en suspensión. Esta materia se pudo ver incrementada a partir de 1995 por el arrastre de sedimentos de la parte alta de la cuenca y la resuspensión de sedimentos contaminados (en especial de la zona C, durante el periodo de recuperación del nivel del embalse, en septiembre-octubre).

## Conclusiones

La problemática de contaminación del embalse Alzate posee varias facetas. Las principales son la contaminación de origen orgánico, inorgánico y bacteriológico (Gobierno del Estado de México, 2000). Cada una de éstas es grave en la presa y requiere de estudios profundos.

En este trabajo se hizo énfasis principalmente en la contaminación por metales y, por lo tanto, no se pretende efectuar un diagnóstico completo de la salud de este cuerpo de agua. Sin embargo, en relación con la problemática de contaminación por metales se puede concluir lo siguiente:

- De acuerdo con los valores reportados en Estados Unidos de América y Canadá para la disposición de sedimentos dragados, las concentraciones encontradas para la mayoría de los metales no muestran una alta concentración en los sedimentos, lo cual no indica peligrosidad de los mismos. Aun así, particularmente las concentraciones de zinc y cobre, sobrepasan los criterios utilizados por la Agencia Ambiental del Canadá para determinar el nivel de riesgo en sedimentos de dragado.
- Algunos metales como el plomo y el zinc presentan concentraciones, factores de enriquecimiento y características de deposición tales, que permiten determinar la presencia de importantes contribuciones de origen natural o antropogénicas en los sedimentos del embalse.
- La forma de operación del embalse, fundamentalmente para el control de avenidas, permite la exposición del lecho en época de lluvias, lo cual facilita la resuspensión de sedimentos contaminados por metales e incluso el arrastre. Hay indicios en este estudio de que la zona del embalse cercana a la cortina se está viendo más afectada que las otras en periodos recientes.
- El volumen afluente de sedimentos es particularmente importante durante los meses de julio a agosto. Durante esa época se envía un volumen importante de agua para irrigación en la región del Bajío y el nivel desciende muy cerca del volumen mínimo de operación (10 Mm<sup>3</sup>). En vista de que la movilidad de la mayor parte de los metales estudiados tiene que ver con la dinámica de los sedimentos, es imprescindible e impostergable tomar precauciones con respecto a la calidad del agua efluente del embalse.
- El modo de operación del embalse contribuye a la problemática de calidad del agua del mismo. Niveles superiores durante la época de lluvia (julio-octubre) permitirían una mayor capacidad de retención de sólidos y evitarían la resuspensión de sedimentos contaminados.
- Por otro lado, se presenta una tendencia generalizada de disminución de las concentraciones de metales a partir de 1985, atribuible a las acertadas acciones de saneamiento en la cuenca. Sin embargo, en la zona F se presenta un aumento en época reciente.

- La problemática de contaminación actual del embalse mejoraría sin duda notablemente con mayores acciones de saneamiento de los ríos tributarios. El río Lerma, que aporta el 79% del caudal afluente total, presenta nulos valores de oxígeno disuelto desde enero hasta junio, en el tramo del corredor industrial al embalse (Gobierno del Estado de México, 2000). En época de estiaje, prácticamente la totalidad del caudal del río Lerma proviene de aguas residuales. El análisis de caudales mínimos muestra que la media diaria de periodo de retorno de dos años es 0.62 m<sup>3</sup>/s y la media móvil para siete días sólo aumenta 0.68 m<sup>3</sup>/s (García et al., 1999). Además, sólo se trata el 50% del promedio anual de caudales, lo cual impide la labor autodepuradora del río Lerma. El río Tejalpa, segundo afluente de importancia en la cuenca, presenta picos de caudal pronunciados durante la época de lluvias (máximo histórico aforado 59 m<sup>3</sup>/s) y, por lo tanto, contribuye de manera importante en el aporte de sólidos al embalse. Finalmente, se recomienda efectuar acciones de prevención de erosión en la cuenca, así como la formulación e implementación de un plan estratégico para una apropiada gestión de la cuenca.

Recibido: 05/03/2002  
Aprobado: 25/01/2003

## Referencias

- ÁVILA, P.P. *Evaluación de los metales pesados Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb y Hg en agua, sedimento y lirio acuático (Eichhornia crassipes) de la presa José Antonio Alzate, Estado de México*. Tesis de maestría en Ecología. México: Universidad Autónoma del Estado de México. 1995, 102 pp.
- ÁVILA, P.P. *Dinámica de metales pesados no esenciales en la interacción agua-sedimento-biota de la presa J.A. Alzate*. Tesis doctoral. México: Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. 2001, 223 pp.
- ÁVILA, P.P. y ZARAZÚA-ORTEGA, G. Concentración de metales pesados en ostiones (*Crassostrea virginica*) del Canal el Chijol, Ver., México. *Inter. Journ. of environ. pollut.* Vol. 9, núm. 2, 1993, pp. 53-64.
- ÁVILA, P.P., BALCÁZAR, M., ZARAZÚA, G., BARCELÓ, I. y DÍAZ, C. Heavy metal concentrations in water and bottom sediments of a Mexican reservoir. *The science of the total environment*. Núm. 234, 1999, pp. 185-196.
- BARCELÓ, I. *Estudio de la movilidad de Ca, Cd, Cu, Fe Mn, Pb y Zn en sedimentos de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México*. Tesis doctoral. México: Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. 2000, 252 pp.
- BARCELÓ, I., GARCÍA, J.A., ÁVILA, P. y SOLÍS, C.H. La presa José Antonio Alzate y el desarrollo del Valle de Toluca. *Memorias del X Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C.* 1996 (del 14 al 16 de febrero). Toluca, México.
- BARUAH, N.K., KOTOKY, P., BHATTACHARYYA, K.G. y BORAH, G.C. Metal speciation in Jhanji river sediments. *The science of the total environment*. Núm. 193, 1996, pp. 1-12.
- BARYSHEV, V.B., GOLUBEV, A.V., DVURECHENSKAYA, S.Y., SOKOLOVSKAYA, I.P. y TRUNOVA, V.A. Multielemental analysis of Novosibirsk reservoirs and some of its tributaries bottom sediments by the SRXFA technique. *Nuclear instruments and methods in physics research*. Vol. A, núm. 359, 1995, pp. 305-306.
- CHURCHILL, M.A. Discussion of: Analysis and use of reservoir sedimentation data (Gottschalk, L.C., autor). *Proceedings of FIASC*. Washington, 1948.
- CROUDACE, I.W. y CUNDY, A.B. Heavy metal and hydrocarbon pollution in recent sediments southern England: a geochemical and isotopic study. *Environ. sci. technol.* Vol. 29, núm. 5, 1995, pp. 1288-1296.
- DEKOV, V.M., KOMY, Z., ARAUJO, F., VAN PUT, A. y VAN GRIEKEN, R. Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse). *The science of the total environment*. Núm. 201, 1997, pp. 195-210.
- DEMAN, M. *El Eje Neovolcánico Transmexicano*. México: Congreso Latinoamericano de Geología. Instituto de Geología. UNAM. 1978.
- EPA. *Regulations governing discharge of dredged or filled material in navigable waters*. Federal Register. 1975, pp. 40, 173, 41, 282-98.
- ESTELLER, M.V. y DÍAZ, C. Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the highlands of Mexico. *Environmental management journal Springer Verlag*. Vol. 29, núm.2, 2002, pp. 266-278.
- GARCÍA, J.A., HUNT, J., DÍAZ, C. y ÁVILA, P. *Dinámica de sedimentos y contaminantes en embalses y sistemas estuarinos*. Reporte final. Proyecto U. California Mexus-Conacyt CN98014, Estados Unidos de Norteamérica, 1999.
- GARCÍA, J.A., DÍAZ, C., MORALES, P. y REYES, R. Estimación del volumen y distribución de azolve en el embalse J.A. Alzate, Estado de México. *Memorias del XVI Congreso Nacional de Hidráulica*. Morelia, México. noviembre de 2000.
- GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO. *Atlas ecológico de la cuenca hidrográfica del río Lerma*. Tomo V: Industrial. México: Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma, 2000.
- KUNTZ, K.W. Contaminants in bottom sediments of the St. Lawrence River in June 1975. *Environment Canada report*. Inland Waters Directorate. Water Quality Branch-Ontario Region. Burlington-Ontario: Tech. Bull. 147. 1988.

- LAWSON, D.R. y WINCHESTER, J.W. A standard crystal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric environment journal*. Núm. 13, 1979, pp. 925-930.
- MASON, B. y MOORE, B.C. *Principles of geochemistry*. Cuarta edición. New York: John Wiley & Sons. 1982, pp. 176-177.
- MEHLICH, A. Charge properties in relation to sorption and desorption of selected cations and anions. *Chemistry in soil environment*. Dowdy, R.H. et al. (editores). Asa Spec. Publ. 4, 1981, pp. 47-75.
- POISSANT, L., SCHMIT, J.P. y BERON, P. Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island. *Atmospheric environment journal*. Núm. 24, 1994, pp. 339-345.
- REYES, R., HERNÁNDEZ, H. y GARCÍA, J.A. *Determinación de zonas de azolve en la presa Alzate, Estado de México*. Toluca, México: IV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales (ANUIES). Facultad de Química-UAEM. Noviembre de 1999.
- RODRÍGUEZ, A.S. y ÁVILA, P. Stock of immobilised metals in Jose Antonio Alzate dam mud sediment samples in the State of Mexico, Mexico. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. Vol. 221, números 1-2, 1997, pp. 231-234.
- VALDÉS, F.M. y JARAMILLO, A.M. Sistema para el análisis por fluorescencia de rayos X. *Manual del usuario*. La Habana: Centro de Estudios Aplicados al Desarrollo Nuclear, 1994, 76 pp.
- VAN ESPEN, P., JANSSENS, K. y SWENTERS, I. Axil X-ray analysis software. *User manual*. Seiberdoff, Austria: Canberra Packard, Benelux, IAEA, 1993, 81 pp.
- VON GUNTEN, H.R., STURM, M. y MOSER, R.N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations. *Environ. sci. technol.* Núm. 31, 1997, pp. 2193-2197.
- YANG, C.T. *Sediment transport theory and practice*. New York: McGraw Hill, 1996.

### Abstract

GARCÍA ARAGÓN, J.A., DÍAZ DELGADO, C., MORALES REYES, P., ÁVILA PÉREZ, P., TEJEDA VEGA, S. & ZARAZÚA ORTEGA, G. *Metal concentration in sediment and its relationship with deposition patterns in the José Antonio Alzate reservoir, State of Mexico. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). October-December, 2003, vol. 18, no. 4, pp. 59-71.*

*Taking into account the large diversity of industries discharging into the Lerma River, such as the metal-mechanical, chemical, and textile, the studies of pollution by metals in the José Antonio Alzate reservoir, which is the first reservoir over the Lerma River, have increased. Results of metal concentrations in sediments in different zones of the José Antonio Alzate reservoir are presented. Sediment layers of 5 and 7 cm wide, from samples of sediment columns, were analysed by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry. The results of a suspended sediment sampling campaign are also presented in this work in order to establish the reservoir filling and the sedimentation rate. Sediment accumulation and metal concentrations in the bottom sediment column allow us to establish the accumulation periods of some metals. Finally, the wastewater treatment practices carried out in the Lerma River in order to improve the pollution indexes of the reservoir are also analysed in this paper.*

**Keywords:** *metals, pollution, sediments, reservoir sedimentation, wastewater treatment, hydrology, sediment column, X-ray fluorescence.*

### Dirección institucional de los autores:

*Juan Antonio García Aragón  
Carlos Díaz Delgado  
Pedro Morales Reyes*

Centro Interamericano de Recursos del Agua,  
Universidad Autónoma del Estado de México,  
CIRA-FI-UAEM,  
Cerro de Coatepec,  
Ciudad Universitaria,  
Toluca, Estado de México, CP 50020,  
jgarcia@uaemex.mx.

*Pedro Ávila Pérez  
Samuel Tejeda Vega  
Graciela Zarazúa Ortega*

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares,  
km 20.5 carretera México-Toluca,  
Salazar, Estado de México,  
pap@nuclear.inin.mx.