

ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA DE ZUPITLÁN, MUNICIPIO DE ACATLÁN, ESTADO DE HIDALGO.

Anallely Ávila Ortiz¹, Misael Cruz Sánchez¹, Patricia Girón García² y Cecilia Salcedo Luna³

¹Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Ciudad Universitaria, carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, C.P. 42184, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hgo. e-mail: anallelyavila@yahoo.com.mx.

²Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C. P. 04510, México D. F.

³USAI, Facultad de Química, UNAM, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C. P. 04510, México D. F.

RESUMEN

Se realizaron diversos análisis fisicoquímicos al agua de la Laguna de Zupitlán, en los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre del 2008 para establecer su calidad en función a su uso. Su calidad como agua de riego es aceptable, salvo su baja salinidad y su elevada concentración de Cd. De acuerdo a los límites recomendados para la protección de la vida acuática, se observa contaminación inorgánica con NH₃, Cu, Ag, Cd y Pb cuyas concentraciones afectan la sobrevivencia de los peces.

INTRODUCCIÓN

La Laguna de Zupitlán se localiza en el municipio de Acatlán, Estado de Hidalgo (figura 1). Es un cuerpo de agua endorreico léntico de régimen perenne que tiene una superficie de 9.143 km², capacidad de 2.08 millones de m³ y una profundidad de 10 m aproximadamente. Las principales fuentes de recarga de la laguna son la precipitación pluvial, las escorrentías y una recarga subterránea que se encuentra en la parte SW del cuerpo de agua. Hasta hace diez años, éste lugar fue uno de los centros recreativos más importantes del municipio de Acatlán, representando una fuente de empleo para muchas personas de la región debido a las actividades piscícolas y en particular a la pesca de carpa y tilapia. Esta

actividad ha desaparecido gradualmente en los últimos 6 años, a consecuencia de la disminución de la población y tamaño de los peces. Actualmente el agua de la laguna se utiliza para la irrigación de zonas agrícolas en la región, donde el maíz, la alfalfa y el frijol representan los principales cultivos.

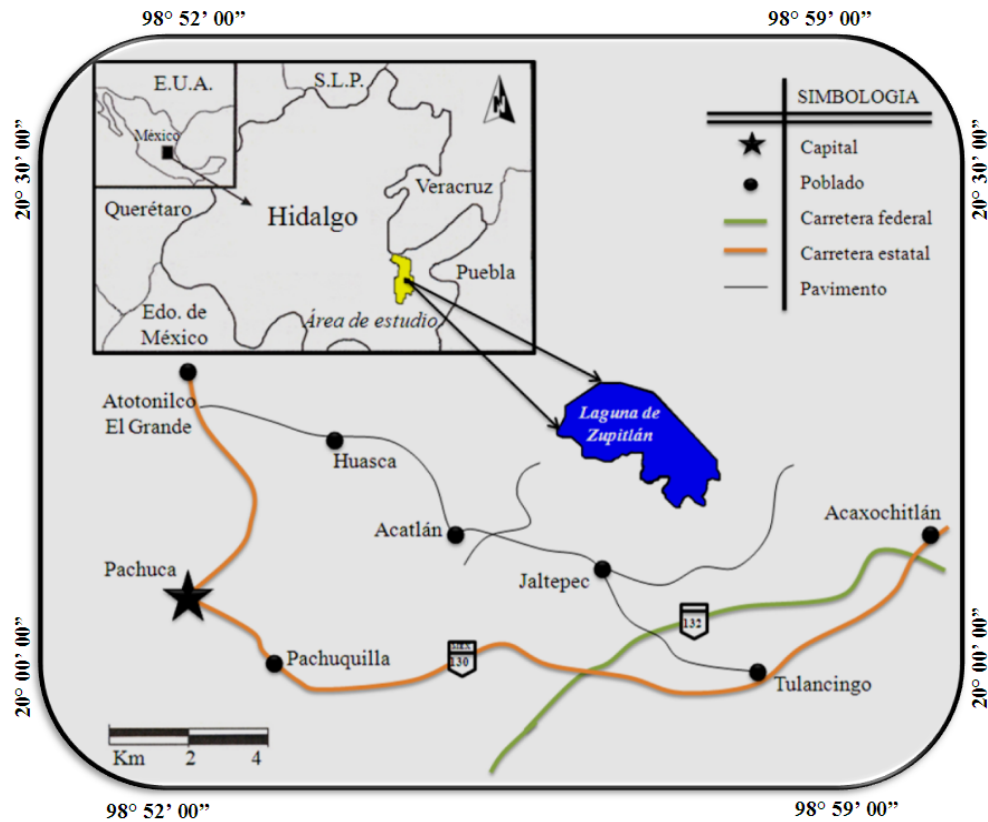


Figura 1. Ubicación geográfica de la Laguna de Zupitlán, municipio de Acatlán, Estado de Hidalgo.

OBJETIVO

Determinar la calidad del agua de la Laguna de Zupitlán mediante análisis fisicoquímicos considerando sus principales usos.

METODOLOGÍA

(a) Toma de muestras

Con base en las características morfológicas de la Laguna de Zupitlán, se determinó la toma de 10 muestras simples de agua con un volumen de 1 L empleando botellas de polietileno. Se colectaron 6 muestras en la periferia de la laguna distribuidos en función de su accesibilidad y 4 de manera aleatoria en el interior de la laguna. La toma de muestras simples se realizó en los primeros 30 cm de la columna de agua con el apoyo de una lancha en los meses de Marzo (primavera), Junio (verano), Septiembre (otoño) y Diciembre (invierno) de 2008. Una vez tomadas las muestras simples de agua, se etiquetaron con un número de registro, fecha, hora, temperatura y coordenadas geográficas. Se colocaron en una hielera para trasportarlas al laboratorio en un lapso de tiempo no mayor a 3 h, conservándolas a 4 °C. Una vez transportadas al laboratorio, se preparó una muestra integrada para cada mes de muestreo, mezclando volúmenes equivalentes de las 10 muestras simples en un recipiente de mayor volumen (Lazarova *et al.*, 2005). De esta manera la muestra integrada fue sujeta a diversos análisis fisicoquímicos, realizando cada análisis por triplicado.

(b) Análisis fisicoquímicos

Las muestras integradas fueron filtradas empleando una bomba de vacío, matraz Kitazato y embudo Buchner, adaptado con papel filtro Whatman No. 42. El agua filtrada se separó en tres fracciones: una se aciduló con HNO₃ (0.5 N) hasta pH 3, otra se aciduló con H₂SO₄ (0.5 N) hasta pH 2 y la tercera fracción se conservó con su pH natural para determinar los distintos parámetros fisicoquímicos (tabla 1).

Tabla 1. Determinaciones fisicoquímicas realizadas a las muestras de agua de la Laguna de Zupitlán (Lazarova *et al.*, 2005).

Determinación	Método	Referencia
Agua acidulada con HNO₃		
Análisis multielemental (Al, Ca, Cr, Fe, Mn, Mg, Ni, Na, K, Cd, Co, Cu, Pb, Si, Zn, Ag, As, Ba, Mo y Se)	Foto emisión en plasma de Argón (ICP)	
Agua acidulada con H₂SO₄		
Nitrógeno amoniacal	Espectrofotométrico	Welcher, 1995
Agua sin tratamiento		
pH	Potenciométrico	ASTM D 1125-91.
Conductividad eléctrica	Conductimétrico	ASTM D 1125-91.
Sólidos totales disueltos (STD)	Gravimétrico	Richards, 1980.
Alcalinidad o dureza total	Titulación	ASTM D 1126-92
Cloruros (Cl ⁻)	Titulación	ASTM D 1125-91
Fosfatos (PO ₄ ²⁻)	Espectrofotométrico	Eaton, <i>et al.</i> , 1995.
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Gravimétrico	Eaton, <i>et al.</i> , 1995.
Carbonatos (CO ₃ ²⁻)	Titulación	ASTM 1067-92.
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	Titulación	ASTM 1067-92.
Nitratos (NO ₃ ⁻)	Espectrofotométrico	Eaton, <i>et al.</i> , 1995.

(c) Cálculo de índices de calidad del agua de riego

Cuando el agua lleva grandes cantidades de sodio en solución, este tiende a acumularse paulatinamente en el suelo hasta alcanzar valores elevados de concentración. De esta forma, el ion sodio tiende a sustituir a los iones calcio y magnesio en el complejo de intercambio, con ello se genera un desequilibrio eléctrico en el suelo produciendo cargas negativas en sus partículas. En consecuencia, aumentan las repulsiones electrostáticas en las partículas que constituyen el suelo, favoreciendo la disgregación (defloculación) y pérdida de estructura. De esta forma, con la pérdida de la estructura y en consecuencia de la porosidad, se reduce la permeabilidad dificultándose la infiltración del agua, afectando el desarrollo normal de los cultivos. Los tres índices más usados para

conocer el riesgo de sodificación son: la relación de adsorción de sodio (RAS), carbonato de sodio residual (CSR) y porcentaje de sodio posible (PSP).

Relación de adsorción de sodio (RAS)

Es el índice más usado para conocer el riesgo de sodificación por efecto del agua. En este se relaciona el contenido de sodio con el contenido de calcio y magnesio. Mientras mayor sea el RAS, existe un mayor peligro de sodificación. El RAS se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{RAS} = [\text{Na}^+] / ([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] / 2)^{1/2} \quad (1)$$

El RAS ajustado se calcula mediante la expresión:

$$\text{RAS}_{\text{aj}} = \text{RAS} (1 + (8.4 - \text{pH}_c)) \quad (2)$$

donde:

$$\text{pH}_c = (\text{pK}_2 - \text{pK}_{\text{ps}}) + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alk}) \quad (3)$$

donde:

$$\text{pK}_2 = -\log K_{a2} \text{ de } \text{H}_2\text{CO}_3 \quad (4)$$

$$\text{pK}_{\text{ps}} = -\log K_{\text{ps}} \text{ de } \text{CaCO}_3 \quad (5)$$

$$\text{pCa} = -\log [\text{Ca}^{2+}] \quad (6)$$

$$\text{p}(\text{Alk}) = -\log [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] \quad (7)$$

Carbonato de sodio residual (CSR)

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el de calcio y magnesio, existe la posibilidad que se forme carbonato de sodio, ya que por su alta solubilidad puede permanecer en la solución del suelo aun después de que hayan precipitado el magnesio y el carbonato de calcio. En estas condiciones, la concentración total y relativa del sodio puede ser suficiente

para desplazar al calcio y el magnesio del complejo de intercambio, produciéndose la defloculación del suelo. El CSR se calcula mediante la expresión:

$$\text{CSR} = [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] \quad (8)$$

Porcentaje de sodio posible (PSP)

Es la cantidad de sodio que resultaría una vez precipitado CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4 los cuales al precipitar, aumentan relativamente la proporción de sodio sobre los demás cationes. Se calcula con la ecuación:

$$\text{PSP} = ([\text{Na}^+]/\text{SE}) \times 100 \quad (9)$$

Salinidad efectiva (SE)

Es una estimación del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, la cual considera la precipitación de carbonato de calcio y de magnesio así como de sulfato de calcio, los cuales dejan de tener efecto en la presión osmótica de la solución del suelo. La salinidad efectiva es más intensa cuando el agua tiene un mayor contenido de carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-).

$$\text{SE} = \Sigma[\text{cationes}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] \quad (10)$$

Para los cálculos anteriores, todos los iones se expresan en meq/L (Ángeles, 2000).

RESULTADOS

Para los meses evaluados, el pH del agua se encontró entre 7.10 y 9.52, con características predominantemente alcalinas, aunque cabe destacar que en Septiembre se determinó el mayor valor de pH (9.52), en tanto que en Diciembre

se encontró el menor valor de pH (7.10) siendo prácticamente neutra. La conductividad eléctrica se mantuvo entre 0.191 y 0.194 dS/m en Marzo, Junio y Septiembre, observándose el mayor valor en Diciembre (0.254 dS/m), siendo estos valores inferiores al límite recomendado (0.75 dS/m). La temperatura del agua tuvo muy pocas variaciones a lo largo del año, oscilando entre los 14 °C y 17 °C. Con relación a los aniones, destaca la abundancia de CO_3^{2-} en Marzo y Septiembre, con valores de 1.058 y 1.006 meq/L, respectivamente. Mientras que en Junio se presentó enriquecimiento de Cl^- (1.050 meq/L), cambiando en el mes de Diciembre a un predominio de HCO_3^- , con una concentración máxima de 1.942 meq/L. Por otra parte, los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ fueron los más abundantes durante los cuatro muestreos, predominando Ca^{2+} con valores entre 0.573 y 0.739 meq/L, seguido de Mg^{2+} que fue el más abundante en Diciembre (0.822 meq/L) y finalmente Na^+ , con ligeras variaciones a lo largo del año, encontrándose el mayor valor en Diciembre (0.639 meq/L). En menor proporción se encontró K^+ , cuyas concentraciones oscilan entre 0.148 y 0.302 meq/L (tabla 2). La clasificación química realizada mediante el diagrama de Piper (Drever, 1997), permitió observar que en Marzo y Diciembre de 2008, el agua presentó un comportamiento como bicarbonatada cálcica, en tanto que en Junio y Septiembre se presentó un enriquecimiento en cloruros cambiando a clorurada cálcica. Con base en los valores de conductividad eléctrica y de RAS para los cuatro muestreos en la Laguna de Zupitlán, el agua se clasifica como C1-S1 (Ayers y Westcot, 1987), es decir, agua de baja salinidad y con bajo contenido de sodio. Can *et al.* (2008), reportaron para la Laguna de Zupitlán valores de RAS de 0.102 y 0.0650 en Septiembre de 2004 y Marzo de 2005, respectivamente, clasificándola como C1-S1. De acuerdo al presente trabajo, aunque la clasificación de la salinidad de la laguna se encuentra dentro de la misma clasificación C1-S1, es evidente que en los últimos años se ha presentado un notable aumento de los valores de RAS, siendo de 0.720 el promedio para los cuatro muestreos realizados en 2008, lo cual implica un aumento en la salinidad del agua de la Laguna de Zupitlán.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos y de salinidad para la Laguna de Zupitlán, evaluados durante Marzo (M), Junio (J), Septiembre (S) y Diciembre (D) de 2008.

PARÁMETROS	M	J	S	D	LAR*
FISICOS					
pH	8.62	8.54	9.52	7.10	6.5 - 8.4
Conductividad Eléctrica, CE (dS/m) a 25 °C	0.193	0.191	0.194	0.254	<0.75
Temperatura (°C)	15	17	16	14	SR
ANIONES					
Carbonatos, CO ₃ ²⁻ (meq/L)	1.058	0.800	1.006	ND	<1.0
Bicarbonatos, HCO ₃ ⁻ (meq/L)	0.756	0.960	0.503	1.942	<1.5
Cloruros, Cl ⁻ (meq/L)	0.220	1.050	0.737	0.569	<4.0
Sulfatos, SO ₄ ²⁻ (meq/L)	0.082	0.240	0.164	0.129	<3.0
Fosfatos, PO ₄ ²⁻ (meq/L)	0.012	0.052	0.003	ND	SR
Nitratos, NO ₃ ⁻ (meq/L)	0.007	0.004	0.003	0.006	SR
CATIONES					
Calcio, Ca ²⁺ (meq/L)	0.573	0.704	0.739	0.628	<5.0
Magnesio, Mg ²⁺ (meq/L)	0.536	0.435	0.614	0.822	<4.0
Sodio, Na ⁺ (meq/L)	0.535	0.578	0.539	0.639	<3.0
Potasio, K ⁺ (meq/L)	0.148	0.302	0.168	0.206	<1.0
INDICES DE CALIDAD					
Sólidos Totales Disueltos, STD (mg/L)	121	125	120	177.5	SR
Salinidad Efectiva, SE (meq/L)	0.712	0.919	0.717	0.878	<3.0
Relación de adsorción de sodio, RAS	0.718	0.766	0.655	0.750	<3.0
RAS ajustado	0.637	0.839	0.512	0.801	SR
Contenido de sodio residual, CSR (meq/L)	0.705	0.621	0.156	0.492	<1.25
Porcentaje de sodio posible, PSP	75.140	62.894	75.174	72.779	<50%
OTROS					
Alcalinidad total, dureza (meq/L)	6.53	7.44	1.95	4.64	SR

*LAR, Límite para agua de riego (Ayers y Westcot, 1987; Richards, 1980); ND, no determinado; SR, sin referencia.

Las concentraciones de NH₃ para Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre de 2008 fueron de 0.53 mg/L, 0.71 mg/L, 0.18 mg/L y 0.60 mg/L, respectivamente. Todos estos valores son superiores a los límites de nitrógeno amoniacal establecidos para la sobrevivencia de peces (EPA, 2009). En un sistema acuático, durante la primera etapa del ciclo del nitrógeno, se producen NH₃ y NH₄⁺ como resultado de la degradación de proteínas. El pH del sistema determina cual de los dos productos va a prevalecer. Bajo condiciones ácidas, se favorece un dominio del ión NH₄⁺ con toxicidad relativamente nula, sin embargo, a valores de pH básicos, el amonio se transforma en NH₃, el cual es altamente soluble. En los

sistemas acuáticos el NH₃ es tóxico para los peces, produciendo daños severos tanto a las branquias como a las escamas; pérdida de su equilibrio, hipersensibilidad, sofocamiento, aumento del ritmo cardiaco y en casos extremos convulsiones, estado de coma y su muerte (Cruz, 2003).

Por otra parte, en el agua de la Laguna de Zupitlán se encuentran elementos como Al, Si, Fe, Co, Cu, Zn, Ag, Cd y Pb (tabla 3). Con base en la Norma Oficial Mexicana para uso de agua de riego (NOM-005-ECOL-2000), la mayoría de los metales pesados están dentro de los límites permisibles, excepto Cd, cuyo límite recomendado es de 0.05 mg/L, lo cual constituye un riesgo de toxicidad para los cultivos de la región, particularmente para el frijol.

Las concentraciones de Cu, Ag, Cd y Pb en el agua de la Laguna de Zupitlán (tabla 3) se encuentran por encima de los límites recomendados por la EPA (2009) para la conservación de la vida acuática (corregidos por la dureza) y pueden ser nocivos particularmente para los peces los cuales desarrollan problemas fisiológicos y metabólicos diversos como: cambios histológicos o morfológicos en los tejidos; cambios en la fisiología como supresión del crecimiento y desarrollo, torpeza para nadar, cambios en la bioquímica del organismo, trastornos del comportamiento y cambios en la reproducción.

Tabla 3. Elementos presentes en el agua de la Laguna de Zupitlán (mg/L) en Marzo (M), Junio (J), Septiembre (S) y Diciembre (D) de 2008.

Elemento	M	J	S	D
Al	0.165	0.846	0.367	ND
Si	21.3	22.7	23.2	20.1
Fe	ND	0.076	0.176	ND
Co	0.632	0.635	0.588	0.438
Cu	0.538 (0.045)*	0.713 (0.051)*	0.494 (0.013)*	0.513 (0.029)*
Zn	0.127	ND	ND	ND
Ag	0.365 (0.024)*	0.367 (0.031)*	0.580 (0.003)*	0.553 (0.014)*
Cd	0.476 (0.006)*	0.453 (0.007)*	0.411 (0.002)*	0.188 (0.0045)*
Pb	1.86 (0.152)*	1.98 (0.175)*	1.82 (0.042)*	1.68 (0.107)*

ND no detectado, *Límites recomendados para protección de la vida acuática (EPA, 2009).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los análisis fisicoquímicos del agua de la Laguna de Zupitlán, se ha establecido que su calidad como agua de riego es aceptable, sin embargo, su baja salinidad debe ser corregida con la adición de algún fertilizante inorgánico, posiblemente yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el cual puede contribuir a la conservación de la estructura del suelo reduciendo el riesgo de infiltración. La concentración de Cd supera los límites establecidos por la NOM-005-ECOL-2000 y puede constituir un riesgo de toxicidad para los cultivos de la región. Desde el punto de vista de la conservación de la vida acuática, se considera que la Laguna de Zupitlán presenta contaminación inorgánica, donde las concentraciones de NH_3 , Cu, Ag, Cd y Pb son superiores a los valores del límite recomendado para la sobrevivencia de los peces afectando sensiblemente su desarrollo, crecimiento y reproducción.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. Annual book of Standards (1994). Método ASTM D 1067-92; ASTM D 1125-91 y ASTM D 1126-92.
- Ángeles, M. V. (2000). Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado (Aspersión, microaspersión y goteo). Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de irrigación. Ed. Universitaria. Capítulo 3, pp. 114-123.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. Rev. 1. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. pp. 205-223.
- Can, C. A., Ramírez, A.C., Ortega, E. M., Trejo, L. C., Cruz, D. J. (2008). Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del Río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Terra Latinoamericana, pp. 243-252.
- Cruz, S.M. (2003). Reporte técnico del proyecto: Adsorción y desorción de amonio en zeolitas naturales. UAEH, pp. 5.
- Eaton, A. D., Cleceri, L. S. and A. E., Greenberg (1995). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA. pp. 72.
- EPA (2009). United States Environmental Protection Agency. National Recommended Water Quality Criteria. Office of Water, Office of Science and Technology, pp. 8-25.
- Drever, J.I. (1997). The Geochemistry of Natural Waters Surface and Groundwater Environments. 3rd Edition. Ed. Prentice Hall. United States of America, pp 410-412.
- Lazarova, V., Bouwer, H. and Bahri, A. (2005). Water Reuse for irrigation: landscape and turf grass, Chapter 2: Water Quality Considerations, pp. 55-80.
- NOM-005-ECOL-2000). Requisitos y especificaciones para la aplicación y certificación de buenas prácticas agrícolas.
- Richards, L. A. (1980). Diagnostico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual No. 60. U.S.D.A. Trad. De la primera edición en inglés por Sánchez D. N., Ortega T. E., Vera R. Z. y Chena G. R. Ed. Limusa. México. pp. 206-219.
- Welcher, F.J. (1995). Standard methods of chemistry analytical, 6th edition, Vol. 2, Part B, Ed. Krieger. pp. 161-170.