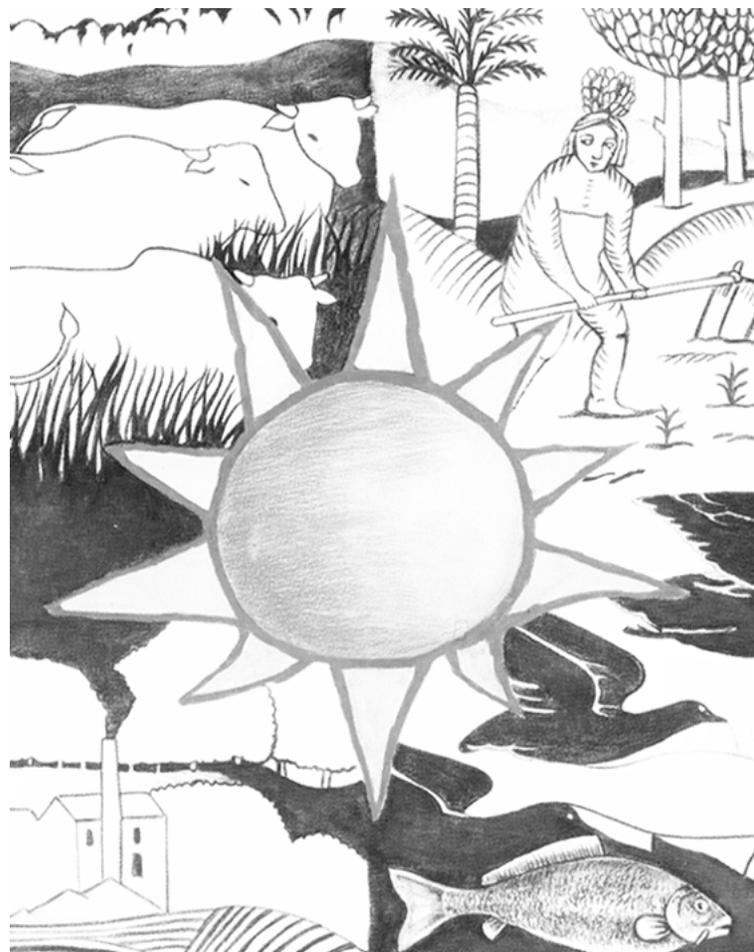


**CARACTERÍSTICAS Y PROCESOS VINCULADOS CON LA CALIDAD  
FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA DEL EMBALSE EL SALTO,  
CIENFUEGOS, CUBA**

Characteristics and processes related to the physico-chemical water quality of El Salto  
reservoir, Cienfuegos province, Cuba

*Carmen Betancourt<sup>1</sup>, Roberto Suárez<sup>2</sup> & Liliana Toledo<sup>2</sup>*



<sup>1</sup>Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Calle 17, esq. Ave 46 s/n, Reparto Reina, Código Postal 55100, Cienfuegos, Cuba. Correo electrónico: carmen@gestion.ceac.cu. <sup>2</sup>Universidad de Cienfuegos, Carretera a Rodas km 3, Código Postal 59430, Cienfuegos, Cuba.

## RESUMEN

El embalse El Salto se localiza al Noreste de la provincia de Cienfuegos, Cuba y su principal uso es la cría de peces y el riego agrícola. La identificación de las características y procesos vinculados con la calidad físico-química de sus aguas constituyó el objetivo de esta investigación. Para el análisis de los componentes mayoritarios del agua se realizaron muestreos cuatrimestrales durante el período 1986-2005. El análisis descriptivo de estas variables indicó un agua medianamente salina, muy dura y bicarbonatada cálcica. La influencia de los procesos atmosférico, antrópico y de lavado de la roca fue analizada por las relaciones iónicas y los diagramas triangular y de Gibbs y confirmada por el análisis de componentes principales que además permitió reducir el número de variables y extraer información sobre los procesos influyentes sobre la calidad del agua. Resultó predominante el lavado de la roca, específicamente de carbonatos y silicatos, identificado mediante las relaciones iónicas y en concordancia con la geología de la cuenca. Para la determinación del estado trófico del embalse y del nutriente limitante se diseñaron cinco muestreos entre los años 2008-2009 y se analizaron las variables diagnóstico: transparencia, concentración de nutrientes y de clorofila *a*. Las aguas de este embalse estuvieron limitadas por nitrógeno y clasificaron como eutróficas según las ecuaciones del índice del estado trófico medio propuesto por Toledo y colaboradores. Las concentraciones de fósforo resultaron elevadas a pesar de los altos valores de la dureza del agua y se relacionaron con las fuentes de contaminación presentes en la cuenca.

Palabras clave: embalse, componentes mayoritarios, eutrofización, lavado de la roca.

## ABSTRACT

El Salto reservoir is located at the northeast of Cienfuegos province, Cuba and is used mainly for aquaculture and agricultural irrigation. The aim of this work was to identify the characteristics of and the processes related to the physico-chemical quality of this reservoir. The major ions were analyzed by means of four-monthly measurements and recorded from 1986 to 2005. According to the descriptive analysis of these variables, the water was moderately saline, very hard, with a prevalence of calcium and bicarbonate ions. The influence of atmospheric, anthropic and rock weathering processes on water chemical quality was revealed by ionic ratio and ternary and Gibbs diagrams, and confirmed by principal component analysis (PCA), which also allowed to reduce the numbers of variables and to get information about influential processes into water quality. Rock weathering was the predominant process, specifically of carbonates and silicates; this was identified by means of ionic ratio and in accordance to basin's geology. In order to determine the reservoir's trophic state and the limiting nutrient, five samplings were designed between 2008 and 2009, where the diagnostic variables: transparency, concentrations of nutrients and chlorophyll *a* were analyzed. The water of this reservoir was limited by nitrogen and classified as eutrophic according to the equation of mean trophic state index proposed by Toledo and collaborators. The phosphorous concentrations were high in spite of elevated hardness levels and related to pollution sources in the watershed.

Keywords: reservoir, major ions, rock weathering, eutrophication.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos son particularmente vulnerables a los cambios ambientales, esta característica los convierte en integradores y centinelas de estos cambios, tanto a escala local como global (Williamson et al. 2008).

La evaluación de la calidad del agua de los embalses, además de su utilidad para detectar cambios globales y locales, posee interés económico, social y científico, y es determinante para el eficiente manejo del recurso. Una gran parte de la calidad del agua puede visualizarse a través del estudio de sus características físico-químicas, como el contenido salino, la conductividad eléctrica (CE) y los nutrientes.

El estudio de los componentes mayoritarios del agua se usa para entender procesos que influyen en la calidad química del agua, como el lavado de las rocas, la evaporación-cristalización y la lluvia (Gibbs 1970, Kumar et al. 2009). La presencia y proporción de los iones se relaciona con la geología de las cuencas (McNeil 2005, Rajmohan & Elango 2007, Jha et al. 2009), una de las herramientas aplicadas para estos fines son las relaciones iónicas (Hren et al. 2007, Al-Rawajfeh & Al-Shamaileh 2007, Ryu & Chang 2007, Ryu et al. 2008).

Otras variables usadas en el estudio de la calidad del agua son los nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo. Su excesiva incorporación a los embalses genera procesos de eutrofización de las aguas, con cambios esenciales en el estado trófico (Dodds 2006).

El estado trófico se caracteriza por la disponibilidad de energía para la cadena alimentaria y define la base de la integridad de las comunidades y el funcionamiento del ecosistema (Dodds 2007). Para su descripción se requiere una aproximación estequiométrica (razón de nutrientes) ya que la fuente de carbono está ligada a la disponibilidad de fósforo y nitrógeno.

El embalse El Salto se localiza en una cuenca cuya geología está constituida fundamentalmente por rocas sedimentarias (margas, aleurolitas, calizas, conglomerados, areniscas y arcillas), y se usa para la cría de peces y el riego agrícola. No ha sido estudiado hasta el momento a pesar de que ha estado expuesto a la contaminación de asentamientos humanos, cría de ganado (vacuno, porcino) y residuales industriales provenientes de la industria azucarera. El objetivo del presente trabajo es identificar las características del agua y los procesos influyentes. La aplicación del análisis factorial a los componentes mayoritarios medidos en este embalse por un período de 20 años, permitió encontrar grupos con significado común, reducir la dimensionalidad de los datos y explicar al máximo la información que contenían originalmente. El conocimiento extraído al aplicar las relaciones iónicas, los diagramas de Gibbs y triangular y el análisis de componentes principales, además de constituir una herramienta para una mejor gestión del recurso, constituye una referencia para la observación de cambios en los procesos geoquímicos influyentes en las aguas embalsadas.

La identificación del nitrógeno como nutriente limitante de forma predominante y estado eutrófico del agua, permitirá elaborar planes encaminados a disminuir la carga de nitrógeno vertida y mitigar la eutrofización del embalse.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Área de estudio*

El embalse el Salto se localiza al noreste de la provincia de Cienfuegos en el río Lajas afluente del río Damují, Cuba, en las coordenadas 22° 25' 24" de latitud norte y 80° 20' 27" de

longitud oeste (Fig. 1). Algunas características del embalse y de la cuenca se presentan en la Tabla 1.

Características	
Año de construcción del embalse	1975
Altitud del embalse (msnm)	52
Altitud de la cuenca (msnm)	76
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	80,0
Área del embalse (km <sup>2</sup> )	2,46
Volumen de almacenamiento (hm <sup>3</sup> )	9,5

TABLA 1. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO. Información tomada del archivo provincial de Recursos Hidráulicos.

Some characteristics of the study site.

### Metodología

La base de datos para el estudio de los componentes mayoritarios del agua procede de la Red de Calidad de las Aguas de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Cienfuegos y corresponde a 94 muestreos, realizados a la profundidad del punto de toma (3,7 m aproximadamente de la superficie) durante la etapa 1986-2006. Incluye conductividad eléctrica (CE), dureza total ( $D_T$ ) y los iones bicarbonato [ $(\text{HCO}_3)^-$ ] cloruro (Cl), sulfato [ $(\text{SO}_4)^{2-}$ ], calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio más potasio ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ). Las sales solubles totales (SST) se calcularon mediante la suma de los iones antes mencionados.

Durante los meses de abril, agosto, octubre y diciembre de 2008 y marzo de 2009, se muestreó el punto de toma del embalse en dos

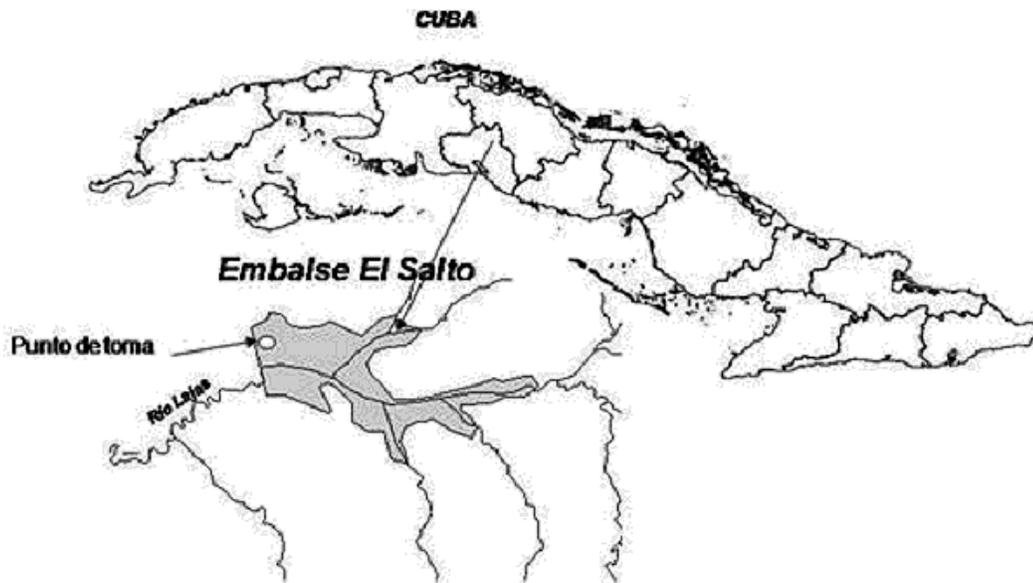


FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDIO, EMBALSE EL SALTO, CUBA.

Study site, El Salto reservoir, Cuba

profundidades (subs superficial y a la profundidad donde se extrae el agua). Para evaluar el estado trófico del embalse, se determinaron en la superficie los nutrientes, la transparencia con un disco de Secchi (DS) y la clorofila *a*. En la profundidad del punto de toma sólo se analizaron los nutrientes.

La concentración de nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) se analizó por medio de la formación de indofenol azul (APHA 1998). El nitrógeno de nitrito (N-NO<sub>2</sub>) se cuantificó por medio de la formación de un compuesto diazo altamente coloreado del ión nitrito con la sulfanilamida, y el dicloruro de N-(1-naftil)-etilendiamina (APHA 1998). El nitrógeno de nitrato (N-NO<sub>3</sub>) por reducción con hidracina (APHA 1998). El fósforo de ortofosfato (P-PO<sub>4</sub>) se cuantificó por formación de un complejo con molibdato de amonio y tartrato de antimonio, posteriormente reducido con ácido ascórbico para obtener un complejo altamente coloreado de azul (APHA 1998). Para la cuantificación del fósforo total (P<sub>T</sub>), todas las formas de fósforo fueron convertidas a ortofosfato, previa oxidación de las muestras con persulfato de amonio en medio ácido (APHA 1998). Los límites de cuantificación expresados en mg/l, fueron N-NH<sub>4</sub>; 0,045, N-NO<sub>2</sub>; 0,001, N-NO<sub>3</sub>; 0,006, P-PO<sub>4</sub>; 0,005, P<sub>T</sub>; 0,013. La clorofila *a* se midió por el método de fluorescencia con un fluorímetro marca: TD 700 Turner FIGURES, según (APHA 1998). Los valores menores se consideraron cero para la confección de los gráficos.

Para el tratamiento estadístico de los datos se empleó el Statistical Package for Social Sciences (SPSS) en su versión 15,0. Para comprobar la existencia de diferencias significativas entre el período húmedo (mayo-octubre) y seco (noviembre-abril) en relación con los componentes mayoritarios, se aplicó la prueba *t* de Student para dos muestras independientes, con un nivel de significación de 0,05 y previa verificación del supuesto de

normalidad. La correlación entre los componentes mayoritarios se comprobó mediante la matriz de Pearson, y se estudió el sistema de relaciones entre las variable de forma conjunta mediante un análisis factorial por el método de análisis de componentes principales (ACP). En el ACP se extrajeron tantos factores como autovalores mayores que la unidad tuvo la matriz analizada. Se trabajó con variables sin estandarizar.

La clasificación trófica se hizo mediante un índice de estado trófico (IET) sugerido por Carlson (1977) y modificado por Toledo et al. (1983) para zonas tropicales. Las ecuaciones usadas en el cálculo de los índices para las variables diagnóstico (transparencia DS, P<sub>T</sub>, PO<sub>4</sub> y CHL *a*) así como el índice de estado trófico medio que combina los índices de cada una de las variables mencionadas se expresan:

$$IET_{Modificado}(DS) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{0,64 + \ln(DS)}{\ln 2} \right) \right]$$

$$IET_{Modificado}(P_T) = 10 * \left[ 6 - \frac{\ln \left( \frac{80,32}{P_T} \right)}{\ln 2} \right]$$

$$IET_{Modificado}(PO_4) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{\ln \left( \frac{21,67}{PO_4} \right)}{\ln 2} \right) \right]$$

$$IET_{Modificado}(CHLa) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{2,04 - 0,695 \ln CHLa}{\ln 2} \right) \right]$$

$$IET_{Modificado}(medio) = \frac{IET(DS) + 2[(IETP_T) + IET(PO_4) + IET(CHLa)]}{7}$$

Con el resultado del cálculo del IET<sup>modificado</sup> (medio) se clasificó el estado trófico de las aguas según el siguiente intervalo: Oligotrofia < 44; Mesotrofia 44 < IET < 54 y Eutrofia > 54.

Se siguió el criterio propuesto por Morris & Lewis (1988) para evaluar la relación Ni<sub>T</sub>: P<sub>T</sub> (nitrógeno inorgánico total: fósforo total), como indicadora del nutriente que limita la productividad del sistema. Estos autores

consideran limitaciones de nitrógeno cuando la relación es menor que 0,5, para el intervalo 0,5-4,0, ambos limitan y para valores superiores a 4 es el fósforo el nutriente limitante.

## RESULTADOS

### *Composición de las aguas y procesos químicos*

El análisis de una serie de tiempo de valores de los componentes mayoritarios del agua, medidos durante 20 años (1986-2005) en el punto de toma del embalse El Salto, reveló las

principales características fisicoquímicas del agua y los procesos vinculados con dichas características. En la Tabla 2 se muestran los estadísticos descriptivos. Los valores medios de la  $D_T$  correspondieron a un agua *muy dura* de acuerdo a la clasificación de Durfor & Becker (1964). Los valores medios de la CE clasifican el agua como *medianamente salina* según el criterio de Serruya & Pollinger (1983), con predominio de los iones Ca y  $\text{HCO}_3^-$ . La composición de los componentes mayoritarios, expresada en mg/L, quedó en el siguiente orden:  $\text{Ca} > \text{Na} + \text{K} > \text{Mg}$  y  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ .

	n	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
CE ( $\mu\text{mhos/cm}$ )	94	310	680	479	69
$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)	94	147	308	220	31
Cl (mg/L)	94	14	46	27	6
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	94	9	43	23	7
Ca (mg/L)	94	21	84	48	12
Mg (mg/L)	94	5	58	16	7
Na+K (mg/L)	94	11	56	32	9
$D_T$ (mg/L)	94	72	452	185	46

TABLA 2. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, DUREZA TOTAL Y LOS IONES MAYORES.

Descriptive statistics of electrical conductivity, total hardness and major ions.

No se observó diferencia significativa ( $p > 0,05$ ) entre el período seco y húmedo para los iones mayores, la  $D_T$  y la CE. Resultó una excepción

el ión  $\text{SO}_4^{2-}$ , que registró un valor medio significativamente superior ( $p < 0,05$ ) en el período lluvioso.

Los valores medios de la suma de los iones  $\text{Ca}+\text{Mg}$  y  $\text{HCO}_3$  resultaron bastante similares, lo cual informa sobre el predominio de la *dureza temporal* (en ambos períodos seco y lluvioso) y la procedencia de rocas carbonatadas de los iones  $\text{Ca}$  y  $\text{Mg}$ .

En la Fig. 2 se puede observar la distribución dispersa de los puntos por arriba y por debajo de la línea 1:1 con un valor medio de la razón  $\text{HCO}_3/(\text{Ca}+\text{Mg})$  igual a 1,0. Tanto la relación del  $\text{Ca}+\text{Mg}$  con el total de cationes (TC) expresado a través del modelo lineal ( $p < 0,05$ ,  $R^2=0,714$ ) (Fig. 3) como el valor medio de la razón  $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{TC}$  (0,72), expresan la contribución de estos iones al TC.

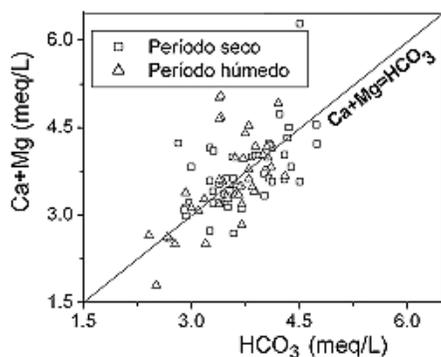


FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE  $\text{HCO}_3$  Y  $\text{Ca}+\text{Mg}$ .

Relationship between the content of  $\text{HCO}_3$  and  $\text{Ca}+\text{Mg}$ .

El valor medio de la razón  $\text{Cl}/\text{Na}$  resultó baja (0,59). El 93,6% de las mediciones de  $\text{Cl}$  fueron inferiores a 1 meq/L, lo que se muestra con una línea discontinua en la Fig. 4, mientras que solo el 12,8% de las observaciones  $\text{Na}+\text{K}$ , fueron inferiores a este valor. Los puntos por debajo de la línea 1:1, demuestran la asociación de estos cationes con otros aniones diferentes al  $\text{Cl}$ .

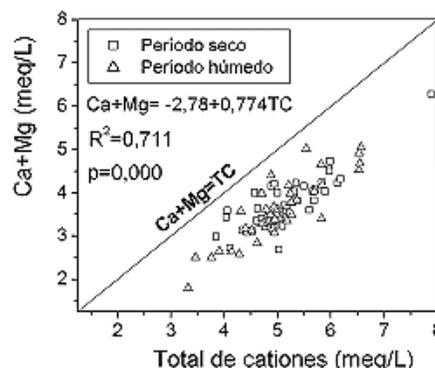


FIGURA 3. RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE  $\text{Ca}+\text{Mg}$  Y EL TOTAL DE CATIONES.

Relationship between the content of  $\text{Ca}+\text{Mg}$  and the total cations.

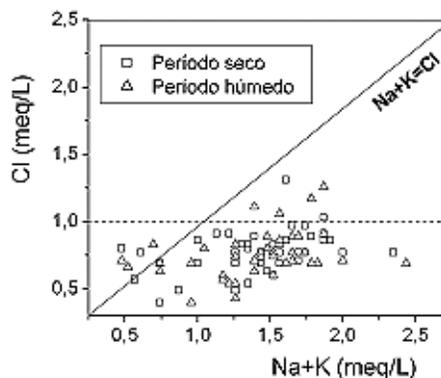


FIGURA 4. RELACIÓN ENTRE EL CLORURO Y LA SUMA DE  $\text{Na}+\text{K}$ .

Relationship between the content of  $\text{Cl}$  and the  $\text{Na}+\text{K}$ .

El valor medio de la razón  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  fue 5,39 y significa que en la cuenca el lavado de las rocas se verifica por los protones del ácido carbónico. Cuando esta razón es superior a la unidad, los protones del ácido sulfúrico no pueden reemplazar a los del ácido carbónico

en el lavado de las rocas (Stallard & Edmond 1983).

No se registró diferencia significativa ( $p > 0,05$ ) entre las razones iónicas calculadas para ambos períodos (seco y húmedo) (Fig. 2, 3 y 4).

Para comprender los posibles mecanismos vinculados con la composición química del agua en estudio, se graficaron los valores SST vs las razones  $(Na+K)/(Na+K+Ca)$  y  $Cl/(Cl+HCO_3)$  (Fig. 5). Todos los puntos se ubicaron en el área que se corresponde con el lavado de la roca según el criterio de Gibbs (1970).

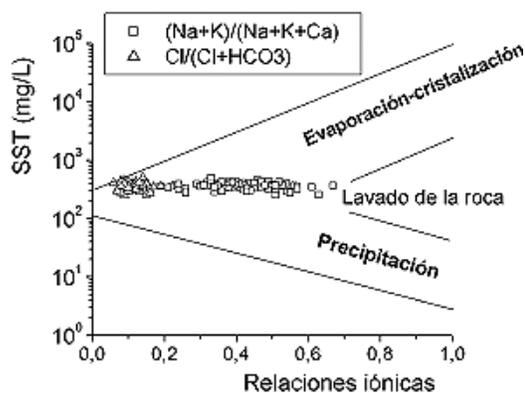


FIGURA 5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DEPENDENCIA ENTRE LAS SALES SOLUBLES TOTALES Y LAS RELACIONES IÓNICAS DEL AGUA: SST VS  $Cl/(Cl+HCO_3)$  Y SST VS  $(Na+K)/(Na+K+Ca)$ .

Dependence between total soluble salts and ionic relations of the water: TSS VS  $Cl/(Cl+HCO_3)$  and TSS VS  $(Na+K)/(Na+K+Ca)$ .

El uso del diagrama triangular mostró resultados similares a los obtenidos con el modelo de Gibbs (1970). La mayor cantidad de observaciones se ubicaron próximas a los vértices que corresponden al lavado de la roca (iones  $Ca$  y  $HCO_3$ ) (Fig. 6). Los puntos que

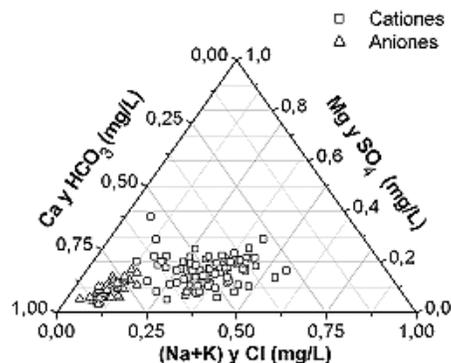


FIGURA 6. COMPOSICIÓN RELATIVA DE ANIONES Y CATIONES (DIAGRAMA TRIANGULAR).

Ternary diagram of cations and anions.

representan a los cationes en ambos diagramas, se acercaron al área del gráfico que le corresponden mayores proporciones de  $Na+K$ .

### Correlaciones y Análisis de Componentes Principales

Se encontraron correlaciones significativas entre las variables estudiadas. La CE resultó la variable de mayor número de correlaciones significativas (Tabla 3).

La aplicación del ACP resultó apropiada para la reducción de datos. La medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) fue superior a 0,500 (0,523), la prueba de esfericidad de Bartlett fue significativa ( $p < 0,05$ ), el determinante tuvo un valor aceptable (0,015) y la matriz de componentes registró valores adecuados para este análisis.

Se obtuvieron dos factores que explican el 60,5% de la varianza total de los datos evaluados. El primer factor es el que más aporta a la varianza total de los datos con un

	CE	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Na+K	D <sub>T</sub>
CE (μS/cm)	1							
HCO <sub>3</sub> (mg/L)	0,529*	1						
Cl (mg/L)	0,397*	0,274*	1					
SO <sub>4</sub> (mg/L)	0,301*	0,042	0,385*	1				
Ca (mg/L)	0,465*	0,541*	0,020	0,109	1			
Mg (mg/L)	0,384*	0,409*	0,172	0,209	0,137	1		
Na+K (mg/L)	0,135	0,059	0,401*	0,275*	-0,207	-0,149	1	
D <sub>T</sub> (mg/L)	0,544*	0,652*	0,167	0,187	0,736*	0,714*	-0,195	1

TABLA 3. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE PEARSON DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DUREZA TOTAL Y LOS IONES MAYORES. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Pearson's correlation matrix for electrical conductivity, total hardness and mayor ions.

37,0%, agrupa a las variables CE, HCO<sub>3</sub>, Ca, Mg y D<sub>T</sub> y fue nominado como «el aporte del lavado de la roca a la calidad química del agua». El segundo factor explica el 23,5% de la varianza total, agrupa a las variables Cl, SO<sub>4</sub> y Na+K, y se designó como «el aporte atmosférico y antrópico a la calidad química del agua». En la matriz de componentes se pueden observar las correlaciones de cada una de las variables con el factor (Tabla 4).

La comunalidad más baja corresponde al HCO<sub>3</sub> (0,443) y la más alta a la D<sub>T</sub> (0,900). Esta última variable registra la correlación más alta con el primer factor.

*Comportamiento del nitrógeno, el fósforo, la clorofila a y la transparencia*

La medida de las concentraciones de los nutrientes nitrógeno y fósforo en la superficie y profundidad, permitió conocer el comportamiento de estos nutrientes en la

	Factor 1	Factor 2
CE	0,775	0,203
HCO <sub>3</sub>	0,658	-0,099
Cl	0,394	0,708
SO <sub>4</sub>	0,389	0,571
Ca	0,681	-0,350
Mg	0,684	-0,124
Na+K	-0,011	0,810
D <sub>T</sub>	0,903	-0,289

TABLA 4. FACTORES DE CARGA DE LAS VARIABLES PARA LOS DOS PRIMEROS EJES.

Loadings factor of the variables measured for the first two axes.

columna de agua del punto de toma del embalse. El Ni<sub>T</sub> (nitrógeno inorgánico total) registró valores en el intervalo 0,001-0,362 mg/L. En la profundidad del punto de toma los

valores fueron ligeramente más altos que en la superficie. La especie que más aportó fue el nitrato; el nitrito siempre estuvo presente con valores bajos, excepto en el mes de octubre que hizo su mayor aporte en ambos puntos de muestreo (Fig. 7 y 8). El nitrógeno amoniacal sólo se pudo cuantificar a concentraciones

cercanas al límite, en los meses de octubre y diciembre en superficie y profundidad del punto de toma respectivamente.

La mayor fracción de fósforo estuvo en forma de  $P-PO_4$ , y siempre registró valores superiores a 0,55 (Fig. 9).

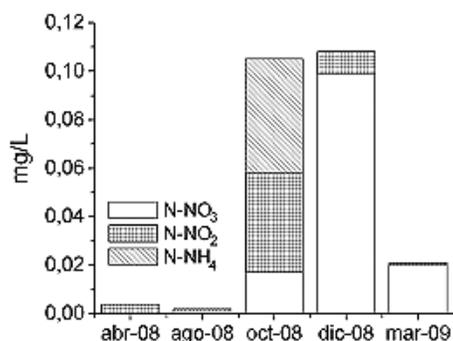


FIGURA 7. COMPOSICIÓN DEL NITRÓGENO INORGÁNICO TOTAL EN LA SUPERFICIE DEL PUNTO DE TOMA. EL N-NO<sub>3</sub> FUE LA ESPECIE CON MAYOR PREDOMINIO.

Inorganic nitrogen composition in the outlet point surface.

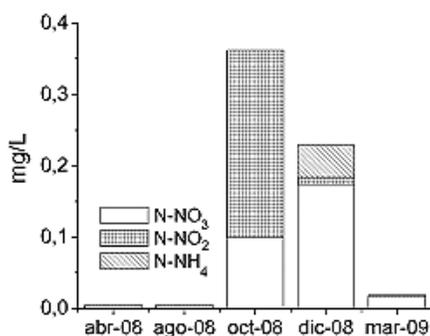


FIGURA 8. COMPOSICIÓN DEL NITRÓGENO INORGÁNICO TOTAL EN LA PROFUNDIDAD DEL PUNTO DE TOMA. EL N-NO<sub>3</sub> FUE LA ESPECIE CON MAYOR PREDOMINIO.

Inorganic nitrogen composition in the outlet point depth.

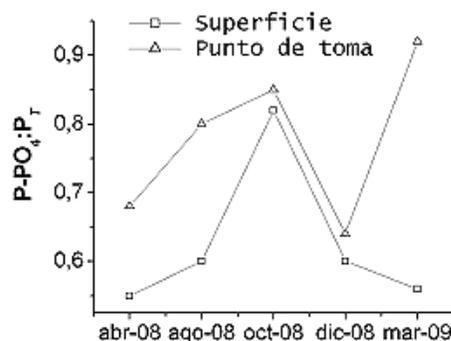


FIGURA 9. FRACCIÓN DEL P-PO<sub>4</sub> RESPECTO AL P<sub>T</sub> EN AMBOS PUNTOS DE MUESTREO.

P-PO<sub>4</sub> ratio regarding total phosphorous in both sampling stations.

Los valores más bajos de esta fracción corresponden a la superficie, zona donde se desarrolla el mayor consumo de esta especie, por parte del fitoplancton. El comportamiento fue similar en ambos puntos de muestreo, es decir aumentan con el avance del verano y alcanzan su valor máximo en octubre, al final del verano en Cuba, y disminuyen con el transcurso del invierno.

De igual modo ocurre con las concentraciones de  $P-PO_4$  y  $P_T$ . Constituyen excepciones la fracción  $(P-PO_4)/P_T$  correspondiente al mes de marzo de 2009 y las concentraciones, tanto de  $P_T$  como de  $P-PO_4$  en el mes de agosto, todas en la profundidad del punto de toma (Fig. 10).

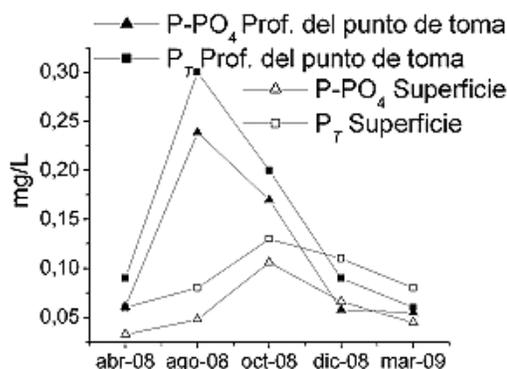


FIGURA 10. VARIACIÓN DEL CICLO DEL FÓSFORO EN AMBOS PUNTOS DE MUESTREO.

Phosphorous cycle variation in in both sampling stations.

Los valores medios de la CHL *a* y transparencia fueron de 6,5  $\mu\text{g/L}$  y 1,7 m respectivamente.

#### Clasificación trófica y relación entre el $N_{i_T}$ y el $P_T$

El uso de las concentraciones de las variables diagnóstico ( $P_T$ ,  $\text{PO}_4$ , clorofila *a* y transparencia), permitió calcular los IET de cada variable y posteriormente el cálculo del IET<sub>modificado</sub> medio, mediante las ecuaciones correspondientes según el criterio de Carlson (1977), modificado por Toledo *et. al.* (1983) para zonas tropicales. El valor de dicho índice fue 63, lo cual clasifica al embalse como eutrófico. La razón  $N_{i_T} : P_T$  obtenida a partir de las mediciones realizadas en la superficie, mostró al nitrógeno como nutriente limitante en los muestreos realizados en abril, agosto y marzo. En octubre y diciembre ambos nutrientes limitaron el desarrollo fitoplanctónico (Fig. 11).

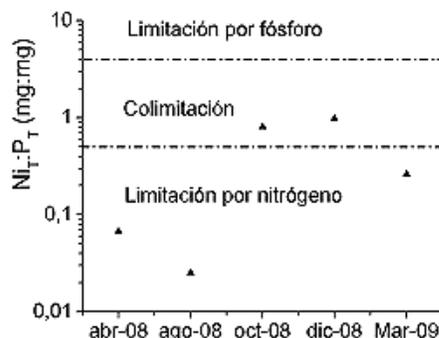


FIGURA 11. RELACIONES ENTRE EL NITRÓGENO INORGÁNICO Y EL FÓSFORO TOTAL. LAS LÍNEAS HORIZONTALES INDICAN NIVELES DE LA RAZÓN DE  $N_{i_T}$  Y  $P_T$  SUGERIDOS POR MORRIS & LEWIS (1988) PARA DIFERENCIAR ENTRE LIMITACIÓN POR NITRÓGENO O FÓSFORO PARA EL FITOPLANCTON.

Relationships between  $N_{i_T}$  and  $P_T$ , the horizontal lines indicate ratios suggested by Morris & Lewis (1988) to differentiate between nitrogen and phosphorus limitation of phytoplankton.

## DISCUSIÓN

La alta proporción de Ca con relación al resto de los cationes puede explicarse por el predominio en la cuenca de carbonatos y silicatos. El Ca y el Mg presentes en las aguas se deben al lavado de carbonatos, silicatos y evaporitas; y el Na, al lavado de evaporitas y silicatos (Meybeck 1987).

Los valores medios de las razones  $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{TC}$  y  $\text{HCO}_3/(\text{Ca}+\text{Mg})$ , (0,72 y 1,01 respectivamente) indicaron que en la cuenca ocurrió el lavado de carbonatos y silicatos. De acuerdo a Jha *et al.* (2009), un valor elevado de la razón  $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{TC}$  (en el orden de 0,68), es atribuible a aguas que discurren por carbonatos, silicatos o evaporitas, mientras que valores inferiores a 2,00 para la razón  $\text{HCO}_3/(\text{Ca}+\text{Mg})$  corrobora el lavado de silicatos.

El valor medio de la razón  $(Ca+Mg)/(Na+K)$  (2,92) está en el orden de los encontrados por Zhu & Yang (2007) y Jha et al. (2009) para aguas que discurren por silicatos, lo cual mostró la influencia del lavado de este tipo de roca en la calidad química del agua del embalse.

La escasa probabilidad del lavado de evaporitas se demostró por los resultados de las razones  $(Ca+Mg)/(Na+K)$  y  $Cl/(Na+K)$  (2,92 y 0,59 respectivamente). Bajos promedios de la primera razón (0,89) fueron encontrados por Zhu & Yang (2007) en un estudio realizado en varios ríos de China que discurren por evaporitas. Este valor fue significativamente inferior ( $p < 0,5$ ) a los encontrados en esta investigación. Cuando el lavado de la evaporita influye sobre la composición química del agua, se esperan valores de la razón  $Cl/(Na+K)$  cercanos a la unidad (Xu et al. 2008).

Los principales mecanismos que controlan la calidad química del agua son: la cristalización- evaporación, el lavado de las rocas y la precipitación atmosférica (Gibbs 1970). Valores altos de las SST y de las relaciones iónicas se relacionan con la cristalización- evaporación; moderada salinidad y predominio de los iones  $Ca$  y  $HCO_3$  con el lavado de la roca; y aguas del tipo clórica sódica, con baja salinidad corresponden a la precipitación atmosférica. El uso de este diagrama reveló la influencia del lavado de la roca sobre la calidad del agua al ubicarse las observaciones en el área que corresponde con el lavado de la roca (Fig. 5).

El diagrama triangular también se usa para explicar los mecanismos naturales que intervienen en la composición química de las aguas (Baca & Threlkeld 2000). Estos autores señalan que cuando las observaciones se localizan próximas a los vértices correspondientes al  $Ca$  y al  $HCO_3$  indican que la calidad química del agua se vincula con

procesos de meteorización de rocas carbonatadas. Cuando las observaciones se localizan próximas a los vértices correspondientes al  $Cl$  y  $SO_4$  indican el lavado de la evaporita. El uso de este diagrama ratificó la influencia del lavado de carbonatos sobre la composición química del agua y la ausencia del lavado de la evaporita.

Los valores bajos de la razón  $Cl/(Na+K)$  (0,59) y el porcentaje alto de las observaciones por encima de la línea 1:1 (Fig. 4), indicaron además la presencia de otras fuentes diferentes que aportan  $Na$  al agua. Autores como: Das et al. (2005) y Krishnaswami & Singh (2005), plantean que las actividades antrópicas aportan  $Na$  al agua y otros consideran que este catión se puede incorporar desde la atmósfera (Gao et al. 2009, Jha et al. 2009). Por tanto, el valor medio de  $Cl/(Na+K)$ , así como el ligero acercamiento al área del gráfico que le corresponden mayores proporciones de  $Na+K$  en los diagramas de Gibbs (1970) y triangular, pueden ser consecuencia de las actividades antrópicas desarrolladas en la cuenca de alimentación del embalse y de procesos atmosféricos como lluvia.

Quedó demostrado por el uso de las relaciones iónicas, los diagramas de Gibbs (1970) y triangular que el lavado de la roca fue el proceso natural de mayor influencia sobre la química del agua durante la etapa estudiada. Este resultado fue corroborado con el ACP, al identificar al factor de mayor aporte a la varianza total de los datos con *el aporte del lavado de la roca*. La identificación del segundo factor obtenido en el ACP con *el aporte atmosférico y antrópico a la calidad química del agua*, está en concordancia con el significado de la razón iónica  $Cl/(Na+K)$  obtenida y con el ligero acercamiento al área del gráfico que le corresponden mayores proporciones de  $Na+K$  en los diagramas de Gibbs (1970) y triangular. Estos resultados

constituyen una referencia para observar cambios en la composición química del agua por la influencia de procesos naturales.

La influencia de las actividades antrópicas sobre la calidad del agua también se reveló en el IET<sub>modificado</sub> medio. Las altas concentraciones de  $P_T$  en las aguas del embalse se deben a la presencia en su cuenca de fuentes de contaminación, que contienen residuos ricos en fósforo como los desechos de la cría de ganado y de los asentamientos humanos.

Estos valores se alcanzan a pesar de que altas concentraciones de Ca en el agua, pueden limitar las de fósforo en solución, pues el Ca es considerado una de las especies químicas que afecta el ciclo geoquímico del P. Margalef (1983), señaló que concentraciones de Ca cercanas a 40 mg/L limitan fuertemente las concentraciones de P soluble, manteniéndolas en bajos niveles debido a su reactividad con estos cationes. Además se ha propuesto que la precipitación del fosfato con el  $CaCO_3$  es el principal mecanismo que controla su solubilidad en aguas duras previniendo la eutrofización (Estrada 1978).

En el embalse El Salto los altos valores de Ca (media de 48 mg/L), no limitaron las concentraciones de  $P_T$  pero a pesar que estas fueron altas no se correspondieron con las concentraciones de CHL *a* registradas. El escaso desarrollo fitoplanctónico en relación a los altos niveles de P encontrados puede ser consecuencia de la incidencia de varios factores: limitación por nitrógeno y una presión de herbivoría superior a la tasa bruta de crecimiento del fitoplancton. Aunque se observó limitación de nitrógeno en los meses de abril, agosto y marzo y se conoce que este embalse se usa para fines acuícolas donde la presión de herbivoría puede controlar el desarrollo fitoplanctónico, esta investigación no permite aclarar al respecto por el reducido número de variables y de datos, estudios

posteriores deberán esclarecer cuál es el factor predominante o si en realidad todos inciden de forma similar.

El conocimiento del nutriente que limita el desarrollo fitoplanctónico permite controlar el proceso de eutrofia en el embalse si se disminuyen o limitan los vertidos de nitrógeno desde la cuenca.

## CONCLUSIONES

El agua embalsada resultó medianamente salina y muy dura, con predominio de los iones Ca y  $HCO_3^-$ , en relación con la geología de la cuenca que alimenta al embalse.

La calidad química del agua estuvo determinada por los procesos *aporte por el lavado de la roca y aporte atmosférico y antrópico*. El lavado de la roca resultó el proceso predominante tanto por el ACP, como por las razones iónicas y los diagramas usados.

El proceso de antropización fue observado en las relaciones iónicas Cl/Na+K y en las elevadas concentraciones de fósforo, que permanecieron en la columna de agua a pesar de los valores elevados de Ca.

Según el IET<sub>modificado</sub> medio calculado, las aguas de este embalse clasificaron como eutróficas y predominó el nitrógeno como nutriente limitante.

## AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a la MSc. Fanny Jorge Lazo por su colaboración en la traducción al inglés.

## LITERATURA CITADA

- Al-RAWAJFEHA & EM Al-SHAMAILEH (2007) Assessment of tap water resources quality and its potential of scale formation and corrosivity

- in Tafila Province, South Jordan. *Desalination* 206: 322-332.
- APHA, ed (1998) Standard methods for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> ed. Editorial American Public Health Association, Washington, USA. 22648 pp.
- BACA RM & ST THRELKELD (2000) Inland dissolved salt chemistry: statistical evaluation of bivariate and ternary diagram models for surface and subsurface waters. *Journal Limnology* 59(2): 156-166.
- CARLSON RE (1977) A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography* 22: 363-369.
- DAS A, S KRISHNASWAMI, MM SARIN & K PANDE (2005) Chemical weathering in the Krishna Basin and Western Ghats of the Deccan Traps, India: Rates of basalt weathering and their controls. *Geochimica Cosmochimica Acta* 69(8): 2067-2084.
- DODDS WK (2006) Eutrophication and trophic state in rivers and streams. *Limnology and Oceanography* 51: 671-680.
- DODDS WK (2007) Trophic state, eutrophication and nutrient criteria in streams. *Trends in Ecology & Evolution* 22(12): 669-676.
- ESTRADA M (1978) Relationship among biological and physicochemical parameters in Spanish reservoirs. *Verichtr Internationalen Verhinen Limnologie* 20: 1642-1646.
- GAO Q, Z TAO, X HUANG, L NAN, K YU & Z WANG (2009) Chemical weathering and CO<sub>2</sub> consumption in the Xijiang River basin, South China. *Geomorphology* 106(3-4): 324-332.
- GIBBS RJ (1970) Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 170: 1088-1090.
- HREN MT, CP CHAMBERLAIN, GE HILLEY, PM BLISNIUK & B BOOKHAGEN (2007) Major ion chemistry of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra river: Chemical weathering, erosion, and CO<sub>2</sub> consumption in the southern Tibetan plateau and eastern syntaxis of the Himalaya. *Geochimica Cosmochimica Acta* 71(12): 2907-2935.
- JHAPK, J TIWARI, UK SINGH, M KUMAR & V SUBRAMANIAN (2009) Chemical weathering and associated CO<sub>2</sub> consumption in the Godavari river basin, India. *Chemical Geology* 264(1-4): 364-374.
- KRISHNASWAMI S & SK SINGH (2005) Chemical weathering in the river basins of the Himalaya, India. *Current Science* 89(5): 841-849.
- KUMAR P, J TIWARI, U KUMAR, M KUMAR & V UBRAMANIAN (2009) Chemical weathering and associated CO<sub>2</sub> consumption in the Godavari river basin, India. *Chemical Geology* 264: 364-374.
- MARGALEF R, ed (1983) *Limnología*. Editorial Omega. Barcelona, España. 1010 pp.
- MCNEIL V, M COX & M PREDA (2005) Assessment of chemical water types and their spatial variation using multi-stage cluster analysis, Queensland, Australia. *Journal Hydrology* 310: 181-200.
- MEYBECK M (1987) Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science* 287: 401-428.
- MORRIS DP & WM LEWIS (1988) Phytoplankton nutrient limitation in Colorado lakes. *Freshwater Biology* 20: 315-327.
- OSGOOD RA (1983) Discussion on using differences among Carlson's trophic state index values in regional water quality assessment. *Water Resources Bulletin* 19: 307-309.
- PARINET B, A LHOTE & B LEGUBE (2004) Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system. *Ecological Modelling* 178: 295-311.
- RAJMOHAN N & L ELANGO (2007) Hydrogeochemistry and its relation to groundwater level fluctuation in the Palar and Cheyyar river basins, southern India. *Hydrological Processes* 20: 2415-2427.
- RYU JS, KS LEE & HW CHANG (2007) Hydrogeochemical and isotopic investigations of the Han River basin, South Korea. *Journal of Hydrology* 345 (1-2): 50-60.
- RYU JS, K LEE, HW CHANG & HS SHIN (2008) Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea. *Chemical Geology* 247(1-2): 66-80.
- SERRUYAC & U POLLINGHER, ed (1983) *Lakes of the warm belt*. Cambridge University Press 569 pp.
- STALLARD RF & JM EDMOND (1983) *Geochemistry of the Amazon*. The influence of

geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal Geophysics Research* 88: 9671-9688.

- TOLEDO AP, M TALARICO, SJ CHINEZ & EG AGUDO (1983) A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Camboriú, Brasil. 57 pp.
- WILLIAMSON CE, W DODDS, TK KRATZ & MA PALMER (2008) Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Front Ecology Environmental* 6(5) : 247-254.
- XU H, Z HOU, Z AN, X LIU, & J DONG (2010) Major ion chemistry of waters in Lake Qinghai catchments, NE Qinghai-Tibet plateau, China. *Quarter. Int.* 212 (1): 35-43.

Recibido 21/04/2011; aceptado 05/10/2011