

# EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DEL LAGO DE AYARZA UTILIZANDO EL MODELO DE SIMULACIÓN WASP 7.41

Andrea Eunice Rodas Morán<sup>1</sup>  
Guatemala

**RESUMEN.** Se presenta la evaluación del estado trófico del Lago de Ayarza por medio del programa WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) versión 7.41 para el período de octubre 2010 a febrero 2011. El modelo toma en cuenta los nutrientes (nitrógeno (N) y fósforo (P)), morfología del lago, condiciones climáticas, calibración y validación de los resultados por medio de variables de calidad de agua como: temperatura, nitratos (NO<sub>3</sub>), amonio (NH<sub>4</sub>), nitrógeno total (TN), fosfato (PO<sub>4</sub>), fósforo total (TP), oxígeno disuelto (OD). Los resultados de la modelación muestran que se sigue las tendencias observadas en los parámetros fisicoquímicos observados en campo, en particular para los parámetros nitrato y fósforo total y fosfatos, no así para el nitrógeno total y amonio. El modelo determinado por medio de WASP7.41 permite simular la variación temporal de fósforo, nitrógeno y temperatura. Los valores de fósforo en todo el lago, presentan niveles de eutrofización, pero los valores de nitrógeno, indican que el lago puede soportar carga contaminante relativamente alta. Para realizar el postprocesamiento se utilizó el software libre GNUPLLOT y QtiPLOT,

**PALABRAS CLAVE:** calidad del agua, contaminación del agua, eutrofización, simulación

**ABSTRACT.** This article proposes the evaluation of trophic state of Ayarza Lake, using the program WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) version 7.41 for the period from October 2010 to February 2011. The model takes account of two nutrient cycles (N and P), lake morphology, weather conditions, calibration and validation of the results through water quality variables: temperature, nitrates (NO<sub>3</sub>), ammonium, total nitrogen (TN), phosphate (PO<sub>4</sub>), total phosphorus (TP), dissolved oxygen (OD). Modelation results show that the model follow the observed tendency of observation dates, in particular to nitrogen species: ammonium, nitrates and for phosphate species: total phosphorus and phosphates, but not to total nitrogen. Even so, the model created with WASP7.41 allows to simulate temporal variation for phosphorus species, nitrogen and temperature. Phosphorus values on the whole lake have eutrophication levels, but nitrogen mesotrophic values indicate that the lake can bear relatively height pollutant loads. Free Software GNUPLLOT and QtiPlot were used for postprocessing.

**KEYWORDS:** water quality, water pollution, eutrophication, simulation.

## INTRODUCCIÓN

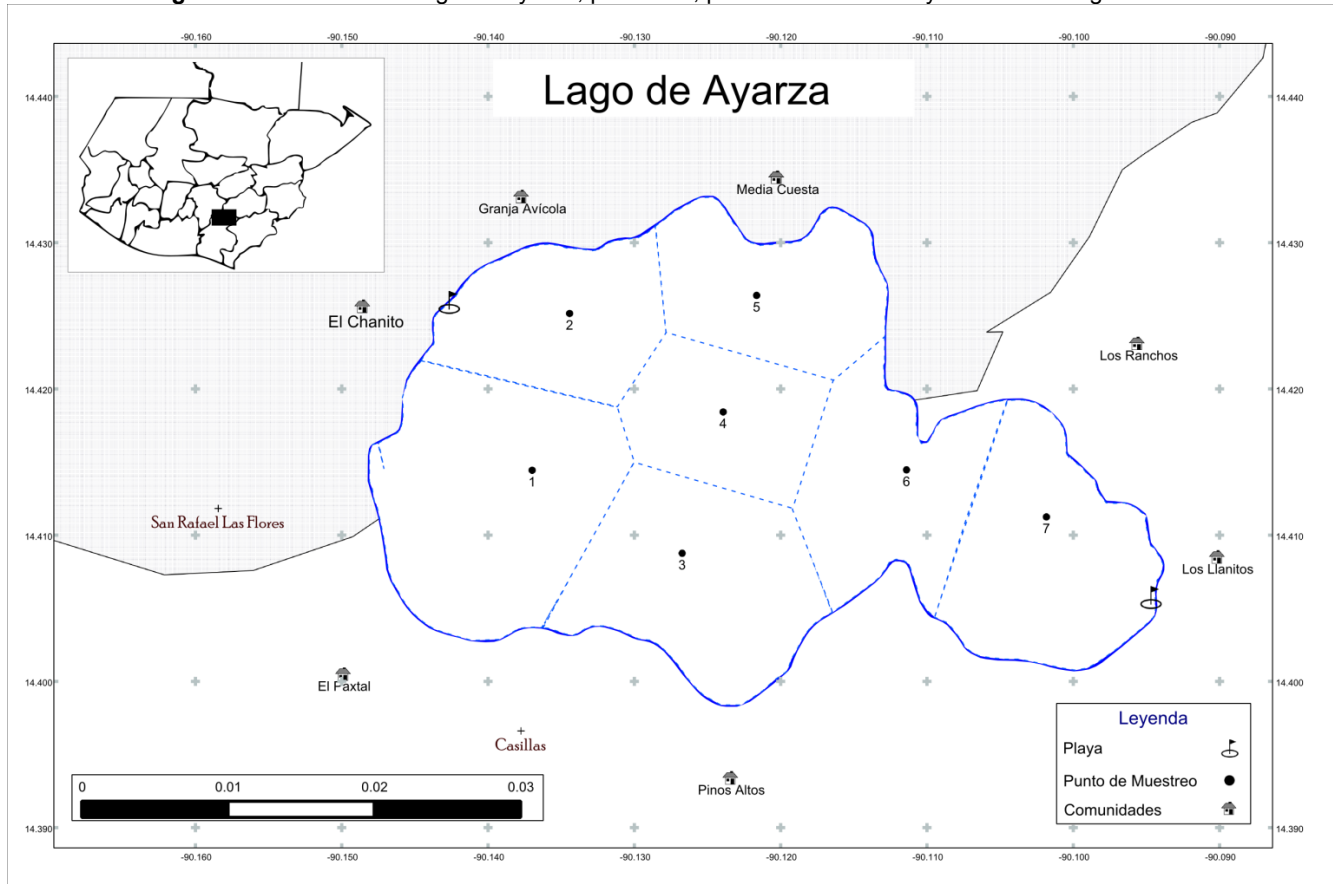
El lago de Ayarza se encuentra ubicado en el departamento de Santa Rosa, es uno de los siete lagos de Guatemala, que junto con Amatitlán y Atitlán representan el 17% de espejo de agua en lagos y el 13% de espejo de agua de todos los sistemas lacustres de Guatemala (Castañeda, 1995). Su extensión aproximada es de 14 km<sup>2</sup>, a una altitud de 1,409 metros sobre el nivel del mar, dos terceras partes pertenecen al municipio de Casillas y el resto al municipio de San Rafael las Flores (Figura 1). El lago de Ayarza es un ecosistema rico en diversidad biológica, cultural, arqueológica y turística como lo demuestran varios estudios en la zona (Flores C 2005, ADES 2006, Siwan Tukr 2008), se encuentra en un estado mesotrófico de contaminación (Chonay, C. et. al. 2002, Gil y Rico, 2003, Flores C 2005, ADES 2006, Siwan Tukr 2008, Ortega, I. 2010, Argueta D, 2011); no cuenta con un Plan de Manejo Integral de los Recursos Hídricos, ni con herramientas de planificación que aporten información objetiva para facilitar la toma de decisiones y la gestión de recurso hídrico que permitan interpretar, simular y predecir las respuestas del cuerpo de agua ante distintas condiciones ambientales. Los modelos de simulación de

calidad de agua, son herramientas de planificación que permiten explicar el comportamiento de los indicadores en el cuerpo de agua real o hipotético frente a acciones relacionadas a la calidad del agua. Existen varios modelos matemáticos de Calidad de Agua, uno de ellos en base al modelo de Di Toro-Fitzpatrick-Thomann, (1981), que es un sistema de modelación de transporte de contaminación en cuerpos de agua, que utiliza un sistema de balance de masas dinámico, conocido como WASP (Water Quality Analysis Simulation Program). Este programa permite modelar sistemas en uno, dos o tres dimensiones, con transporte por convección y dispersión entre compartimientos físicamente discretos. La ecuación principal puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial(uc)}{\partial x} - \frac{\partial(vc)}{\partial y} - \frac{\partial(wc)}{\partial z} + \frac{\partial(Dx \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(Dy \frac{\partial c}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(Dz \frac{\partial c}{\partial z})}{\partial z} \pm S(x, y, z, t)$$

Donde (x,y,z) son las coordenadas longitudinal, lateral,

Figura 1: Ubicación del Lago de Ayarza, población, puntos de muestreo y división de segmentos.



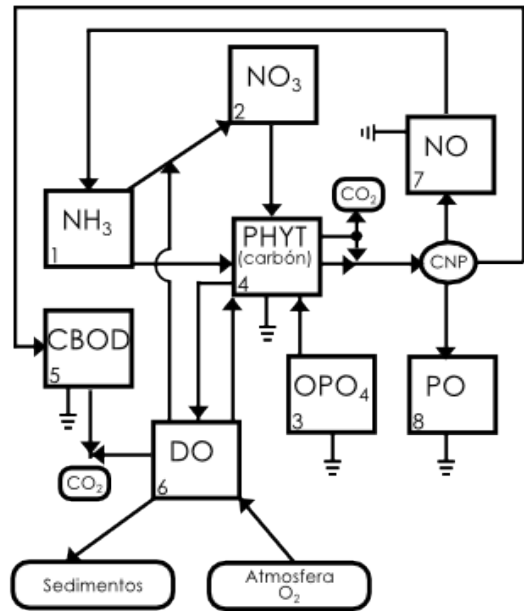
Fuente: Elaboración propia.

y vertical respectivamente;  $C$ , es la concentración;  $t$  es el tiempo,  $(u,v,w)$  es la velocidad de flujo en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente,  $D_x, D_y, D_z$  son los coeficientes de dispersión en las diferentes coordenadas y  $S$  es el aumento o pérdida de la concentración por actividades externas. En la figura 2, se presentan las principales interacciones cinéticas de los ciclos de los nutrientes y oxígeno disuelto que se trabaja en el modelo EUTRO dentro del programa WASP.

**ÁREA DE ESTUDIO**

El Lago de Ayarza se localiza en la latitud  $14^{\circ} 25' 00''$  y en la longitud  $90^{\circ} 07' 30''$ . Es un lago tectónico de doble caldera en forma de ocho; compuesto por un cráter del tipo Krakatoa, formado en el Cuaternario cuando las cimas de dos conos volcánicos colapsaron en la medida que se vaciaban de magma, principalmente por voluminosas erupciones de material piroclástico ácido. (Castañeda 1,995). La caldera de mayor tamaño tiene una profundidad máxima de 240 metros, mientras que la profundidad de la pequeña está compuesta por coalescencia de abanico delta, conectados por un canal profundo de aproximadamente 170 metros (Poppe, 1985).

Figura 2: Transporte y transformación de las variables de estado, Modelo WASP.



Fuente: modificado de Ambrose et. Al. (1993:50)

El clima del área es templado, sin estación fría bien definida, con temperaturas que oscilan entre  $18^{\circ}$  y  $23^{\circ}C$ . En los meses de Marzo y Abril el calor se acentúa (Flores,

2005). La precipitación pluvial oscila entre 1,100 y 1,200 mm anuales, distribuidos en aproximadamente 120 días (Siwan Tukr, 2008), siendo los meses de junio y agosto en donde se registran las precipitaciones más altas de la temporada (ADES, 2005). Durante los meses de Noviembre a Enero soplan vientos propios de la estación fría.

## METODOLOGÍA

El modelo realizado a partir del software WASP versión 7.41, toma en cuenta los nutrientes (nitrógeno (N) y fósforo (P)), morfología del lago, condiciones climáticas, calibración y validación de los resultados por medio de variables de calidad de agua: temperatura, nitratos (NO<sub>3</sub>), amonio (NH<sub>4</sub>), nitrógeno total (TN), fosfato (PO<sub>4</sub>), fósforo total (TP), oxígeno disuelto (OD). Los datos para la calibración y construcción del modelo se obtuvieron del muestreo de los parámetros fisicoquímicos presentados en el trabajo del Ing. Dennis Argueta denominado "Caracterización fisicoquímica de la Laguna de Ayarza, ubicada entre los municipios de Casillas y San Rafael Las Flores del Departamento de Santa Rosa, de la República de Guatemala" (Argueta D, 2011) en el cual se realizó un muestreo durante cinco meses del 10 de Octubre del 2010 al 06 de Febrero del 2011, tomando 7 puntos de muestreo (ver figura 1). En cada toma de muestras se realizaron 5 réplicas, tomando valores in situ, de temperatura y analizando las muestras en el laboratorio para los parámetros de amonio, nitrato, nitrógeno total, fosfato, fósforo total, oxígeno disuelto y salinidad, en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria, Dra. Alba Tabarini.

Cada punto de muestreo representa un segmento; el área de cada segmento se determinó por medio de polígonos de thiesen utilizando el software libre QGIS (Ver figura 1). Los flujos entre los segmentos se estimaron a partir de aproximaciones a la estructura de las corrientes y en base a observaciones. Las condiciones de frontera y la carga contaminante se obtuvieron a partir del estudio de "Estimación de la carga contaminante y el volumen de sedimento en el Lago de Ayarza" (Ortega I, 2010) que utilizó el método de Evaluación Rápida de Fuentes Contaminantes, para cuantificar los nutrientes que llegan al lago. Los aportes de aguas residuales se estiman en promedio de 70.45 m<sup>3</sup>/día, para la zona de Media Cuesta, Los Pinos, Subinal y El Pedrerito (Ver figura 1). Este estudio también determinó los valores de DBO, DQO, SST, Nitrógeno y fósforo. El flujo en la superficie se asumió como tipo gross flow, lo que hace que el modelo use cada flujo de manera separada. No se contó con la batimetría del lago, por lo que se asumió una geometría rectangular para el lago, utilizando la profundidad máxima del lago (240 mts). Se realizaron mediciones de área y distancia entre puntos por medio de software QGIS. Se tomaron los datos climatológicos de la base de datos de INSIVUMEH para el período de calibración para la radiación solar, precipitación, velocidad del viento y temperatura; a partir de tres estaciones meteorológicas:

La Ceibita, Los Esclavos y Quesada. El Post-procesamiento de los datos se realizó con el software libre: GNUPlot y QtiPlot. Se calculó el coeficiente de dispersión del lago a partir de los perfiles de temperatura. El modelo matemático presentando a continuación tiene complejidad de 4 (Ambrose et.al, 1993b), que describe una eutrofización simple.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la figura tres a la ocho, se presentan los resultados de la simulación obtenida por medio del programa WASP7.41. Se muestran los resultados en los sectores más representativos del lago, la zona media (punto 4), el área de San Rafael Las Flores (Punto 1) y el área de Casillas (Punto 7), con las siguientes coordenadas: Punto 1 (14°24'52.03" N, 90°8'13.20"O), Punto 4 (14°25'06.40" N, 90°7'26.21"O), Punto 7 (14°24'40.55" N, 90°6'6.68"). Los resultados de la simulación de la calidad de agua se encuentran en función de los parámetros de nitrógeno total y fósforo total para un período de cinco meses iniciando en Octubre del 2010. (ver figura 3, 4, 5, 6, 7 y 8) Este modelo proporcionó información sobre otros parámetros como: nitratos, nitritos, fosfatos, temperatura y sólidos totales.

Figura 3: Nitrógeno Total, punto de Muestreo punto 7.

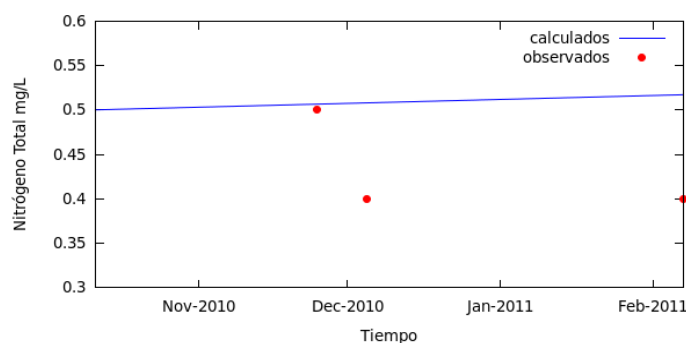


Figura 4: Nitrógeno Total, punto de Muestreo punto 4.

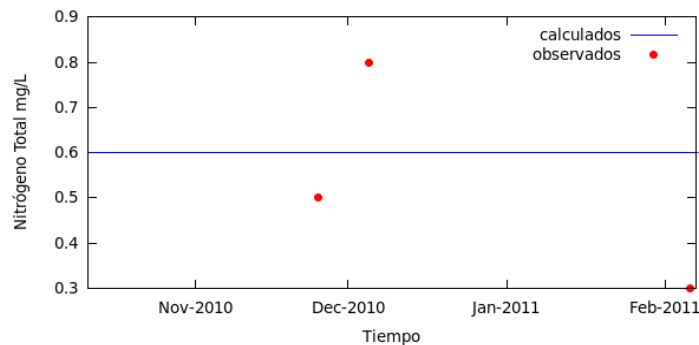


Figura 5: Nitrógeno Total, punto de Muestreo punto 1.

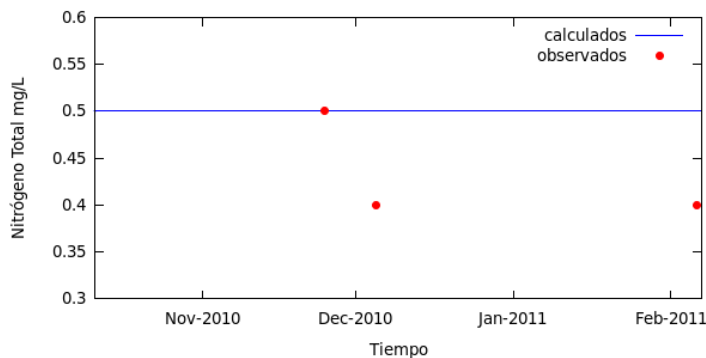


Figura 7: Fósforo Total, punto de Muestreo punto 4.

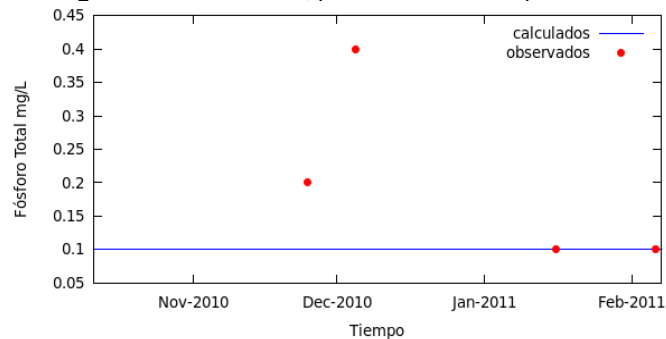


Figura 6: Fósforo Total, punto de Muestreo punto 7.

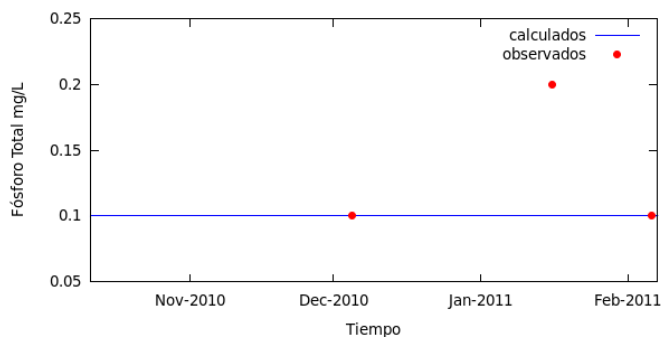


Figura 8: Fósforo Total, punto de Muestreo punto 1.

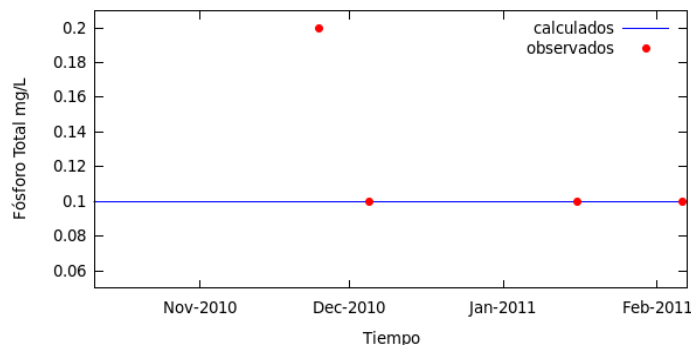
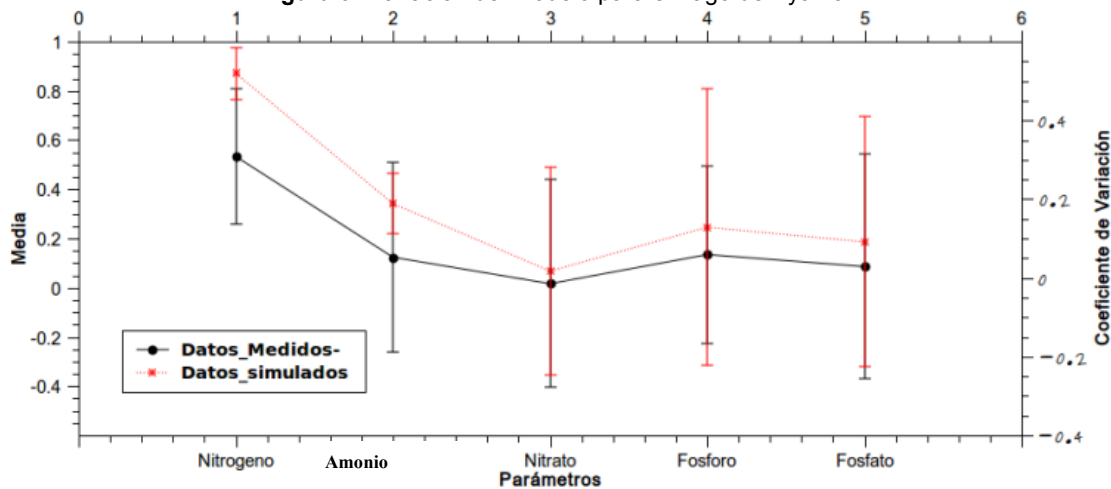


Figura 9: Variación del modelo para el Lago de Ayarza.



Los datos simulados se obtuvieron por día y se compararon con los datos observados de sólo 4 muestreos, exceptuando el primero, ya que en el mes de octubre se produjo una inversión térmica en el lago debido al inicio de la época seca, donde se incrementan los vientos fríos. La presencia de vientos fríos y fuertes, se puede encontrar además en los perfiles de temperatura,

donde se observa que aumenta la extensión del epilimnio, contrario a los dos últimos muestreos (enero y febrero) donde el perfil térmico muestra que el viento no le ha transferido energía al lago.

En general los resultados del modelo siguen las tendencias observadas, en particular para el nitrato, amonio y las especies de fósforo como se observa en la figura 9, donde

para el amonio y el nitrato el coeficiente de variación se encuentra entre los valores medidos y para el caso de de las especies de fósforo, el coeficiente de variación tiene mayor rango para los datos simulados. El único parámetro que se encuentra fuera del rango de los datos medidos es el nitrógeno total.

El Lago de Ayarza, para el período de estudio ya se encuentra con niveles de fósforo muy cercanos a la eutrofización en todo el lago, con un promedio de 128.5 µg/l, pero debido a sus relativamente bajos contenidos de nitrógeno con un promedio de 0.52 mg/l indica que puede soportar carga contaminante relativamente alta, sin que llegue a estado eutrófico, lo que da la pauta de definir al nitrógeno como “nutriente limitante”. Esto puede indicar, que dentro del lago se están produciendo algas fijadoras de nitrógeno.

## CONCLUSIONES

El proceso de eutrofización del Lago de Ayarza, puede predecirse por medio de una evaluación de propiedades físico-químicas y biológicas aplicando el software WASP7.41 en un nivel de complejidad 4. Al variar en grandes porcentajes (200%, 500%) las concentraciones de nutrientes provenientes de las fuentes de contaminación, hay un incremento considerable de fósforo que sobrepasa los niveles eutróficos, en cuanto a nitrógeno soporta cambios mucho mayores de hasta 500%, sin sobrepasar los niveles de mesotrofia. Lo que indica, que es necesario controlar los niveles de fósforo que llegan al lago.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ambrose R.B., T.A. Wool and J.L. Martin, 1993a. The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5. Part A: Model Documentation. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA, U.S.A.
- Ambrose R.B., T.A. Wool and J.L. Martin, 1993b. The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5. Part B: Model Documentation. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA, U.S.A.
- Argueta Mayorga, D., 2011 Caracterización físicoquímica de la Laguna de Ayarza, ubicada entre los municipios de Casillas y San Rafael Las Flores del Departamento de Santa Rosa, de la República de Guatemala. Tesis Maestría Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos (ERIS).
- Asociación para el Desarrollo Sostenible (ADES), 2006. Estudio Técnico del área de protección especial Laguna de Ayarza. Fondo Nacional para la Conservación - FONACON- Proyecto No. 08, 2004.
- Castañeda, César, 1995. Sistemas lacustres de Guatemala. Guatemala. Editorial Universitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Chonay C et al., 2002. Estudio limnológico de la Laguna de Ayarza, San Rafael Las Flores, Santa Rosa. Problema Especial I y II. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Estudios del Mar y Acuicultura.
- DiToro, D., Fitzpatrick J.J., Thomann R.V. Documentation for Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP)., 1981. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA, U.S.A.
- Flores Reyes, Claudia Marina, 2005. “Campamento ecoturístico” en la laguna de Ayarza Casillas, Santa Rosa. Tesis de Arquitectura. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Arquitectura.
- Galvez-Cloutier, Rosa, 2007. Michelle Sanchez. Trophic status evaluation for 154 lakes in Quebec, Canada: monitoring and recommendations. Civil Engineering Department, Laval University, Canadá.
- Mueller, T., 1987. Principles of surface water quality modeling and control. Harper and Row, Publishers. Inc.
- Murgel Branco, Samuel. Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales. Estados Unidos: Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos, 1984.
- Ortega Flores, I., 2010. Estimación de la carga contaminante y el volumen de sedimento en la Laguna de Ayarza. Tesis Maestría Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS).
- Poppe, L.; Paull, C; Newhall, C; Bradbury, J; Ziagos, J., 1985. A geophysical and geological study of Laguna de Ayarza, a Guatemalan caldera lake. Journal of Volcanology and Geothermal Research (in English) 25 (1-2): 125–144.
- Saravia Celis, Pedro, 2007. Contaminación del agua. Guatemala: Primera edición.
- Siwan Tukr, Centro Integral, 2008. Fortalecer la administración municipal, comunal e institucional para el manejo sostenible de los recursos naturales del área de protección especial, Laguna de Ayarza, ubicada en los municipios de Casillas y San Rafael Las Flores, del Departamento de Santa Rosa. Fondo Nacional para la Conservación de la Naturaleza -FONACON- Proyecto No. 16-2007
- Tabarini de Abreu, A. 1981. Eutrofización del lago de Amatitlán, XIII Congreso Centroamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Marzo 16-20.
- Weiss, C.M. 1971a Amatitlán Lake, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Emvir. Scienc. and Eng., S.P.N. Univ. North Carolina, Chapel Hill ESE, Pub.No. 281
- Weiss, C.M. 1971b. Water Quality Investigations Guatemala Lake Atitlan 1968-1970. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Emvir. Scienc. and Eng., S.P.N. Univ. North Carolina, Chapel Hill ESE, Pub.No. 274