

EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE MONAICITO-PIEDRA AZUL, ESTADO TRUJILLO, VENEZUELA

CARLOS ESPINOSA¹, KRETHEIS MÁRQUEZ², JORGE RODRÍGUEZ³

Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de Los Andes (CIDIAT-ULA). Apartado Postal 219, 5101-A. Mérida, Venezuela.

¹e-mail: caesji@ula.ve, ²e-mail: kretheis@ula.ve, ³e-mail: rjorge@ula.ve

Recibido: abril 2012

Recibido en forma final revisado: agosto 2012

RESUMEN

Se presenta la evaluación del riesgo de eutrofización del Embalse Monaicito-Piedra Azul ubicado en el estado Trujillo, Venezuela, mediante la implementación del modelo matemático simplificado para la evaluación de estados tróficos y el manejo de macronutrientes en lagos/embalses cálidos tropicales (LACAT), desarrollado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Como fuentes de fósforo fueron consideradas y cuantificadas las aguas residuales de los centros poblados establecidos en la cuenca, los desechos sólidos de origen municipal y los provenientes de la población dispersa, el estiércol de los animales (vacunos y equinos), la escorrentía superficial y la biomasa en el área de inundación. Los resultados obtenidos muestran que para la fase de llenado del embalse es conveniente deforestar, al menos, el 25% de la biomasa en el área de inundación. Durante la fase de operación se demuestra un cambio en la condición trófica del embalse a partir del año 20 del horizonte del proyecto, de mesotrófico a eutrófico, debido a la acumulación de fósforo en el embalse. Como resultado de lo anterior la magnitud del riesgo de eutrofización fue cuantificada como leve (-1) hasta el año 20, y luego como significativa (-2). Entre las conclusiones y recomendaciones destacan la necesidad de evitar la acumulación de fósforo en el embalse, mediante la implementación de sistemas de depuración de aguas residuales que contemplen remoción de fósforo y de sistemas integrados para el manejo de los desechos sólidos y los efluentes líquidos en las actividades agropecuarias de la cuenca.

Palabras clave: Embalse, Riesgo de eutrofización, Estado trófico, Aguas residuales, Magnitud del riesgo de eutrofización.

EUTROPHICATION RISK ASSESSMENT OF THE MONAICITO-PIEDRA AZUL WATER RESERVOIR, TRUJILLO STATE, VENEZUELA

ABSTRACT

The assessment of eutrophication risk of the Monaicito - Piedra Azul water reservoir located in Trujillo State, Venezuela, is presented through the implementation of the simplified mathematical model for evaluation of trophic status and management of macronutrients in tropical warm lakes / reservoirs (LACAT), developed by the Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS). As sources of phosphorus, it was considered and quantified wastewater from country towns established in the basin, solid wastes from municipal concentrated and scattered population, animal manure (cows and horses), surface runoff and biomass in the flood area. The results show that, for the filling stage of the reservoir, it is desirable to deforest, at least, 25 % of the biomass in the flood area. During the operation phase, it is demonstrated a change in the trophic status of the reservoir from mesotrophic to eutrophic, beginning the year 20 of the project horizon, due to the accumulation of phosphorus in the reservoir. As a result of the foregoing, the magnitude of the eutrophication risk was quantified as slight (- 1) until year 20 of operation, and then as significant (- 2). The conclusions and recommendations include the need to avoid accumulation of phosphorus in the reservoir, through the implementation of sewage systems covering removal of phosphorus and integrated systems for the management of solid waste and liquid effluents in the agricultural activities of the basin.

Keywords: Water reservoir, Eutrophication risk, Trophic status, Waste water, Magnitude of the eutrophication risk.

INTRODUCCIÓN

Las Líneas Generales del Plan de Desarrollo Económico y Social de la Nación 2007-2013 (formulado por la Presidencia de la República Bolivariana de Venezuela, 2007), en su apartado “VI. Venezuela: Potencia Energética Mundial” establece como una estrategia y política *propiciar el uso de fuentes de energía alternas, renovables y ambientalmente sostenibles*. En este sentido a nivel nacional se han planteado una serie de Complejos Agroindustriales de derivados de la caña de azúcar que producirán levadura forrajera, etanol anhidro de alta pureza, abono orgánico y electricidad en todos los casos. Estos Complejos requerirán de cantidades significativas de agua, tanto para la operación específica de los mismos como para el riego de la caña de azúcar, la cual es la materia prima en el proceso productivo; atendiendo a esta necesidad se ha proyectado el Complejo Agroindustrial Trujillo I, ubicado en las Llanadas de Monay, en el municipio Candelaria del estado Trujillo. Se estima que dicho Complejo tendrá la capacidad de procesar 10.600 toneladas por día de caña de azúcar, 105 toneladas por día de torula y producir 700.000 litros de etanol diario, con un requerimiento del recurso hídrico de 0,28 m³ por segundo, aproximadamente, que provendrían de la operación futura del proyecto y construcción del Embalse Monaicito - Piedra Azul (Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, CIDIAT, 2010).

El emplazamiento del Embalse, supone la ejecución de una serie de actividades con potencial de afectación a los distintos componentes ambientales. Específicamente, la actividad de llenado y operación supone un riesgo de eutrofización en el vaso, que representa un impacto negativo sobre la calidad de la futura masa de agua del Embalse. Este impacto es originado tanto por la descomposición del material vegetal que estará presente en el área inundable del vaso durante la fase de llenado y operación, así como por los aportes de nutrientes por aguas residuales municipales, desechos sólidos, actividad agropecuaria y la descomposición de materia orgánica que ingresa durante la fase de operación normal. Tal como lo describe Dal-Ré (2003), aguas arriba de la presa se produciría un remanso del agua, de forma que se agudizaría la deposición de materiales, circunstancia que contribuiría al proceso de eutrofización.

La ocurrencia de procesos eutróficos, estimularía el crecimiento excesivo de los productores primarios fotosintéticos, ocasionando la reducción del oxígeno disuelto en el agua cuando el material vegetal se descompone acarreado con esto la posible muerte de otros organismos, suponiendo incluso un peligro potencial para la salud de los usuarios. Schonoor & Zehnder (1996) identifican

los siguientes efectos negativos de la eutrofización en la calidad del agua embalsada: excesivo crecimiento de plantas (color verde en el agua, pérdida de la transparencia del lago, excesivo crecimiento de algas), condiciones anóxicas en el hipolimnion, pérdidas en la biodiversidad de especies (disminución de la pesca, por ejemplo) y problemas de sabor y olor. Lester & Birkett (1999) señalan como efectos negativos de la eutrofización en embalses: la estratificación del mismo, la disminución de las cadenas tróficas en el ecosistema acuático y el predominio de ciertos individuos (efecto biológico) y el incremento de los costos de tratamiento de las aguas (efecto socio-económico).

Gómez (1999) expresa que la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) no es más que un procedimiento administrativo-técnico que sirve para identificar, prevenir e interpretar los impactos ambientales que producirá un proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado. El mismo estará destinado a mejorar el sistema de toma de decisiones y se orientará a garantizar que las opciones de proyecto consideradas sean ambiental y socialmente sostenibles.

Por su parte, Pastakia & Jensen (1998) establecen que la EIA requiere de cinco (5) criterios básicos: importancia, magnitud, permanencia, reversibilidad y acumulatividad y/o sinergia, constituyendo la magnitud la ponderación de intensidad del impacto, la cual debe estimarse cuantitativamente a través del uso adecuado de indicadores ambientales que permitan obtener la relación de calidad ambiental “sin proyecto” y “con proyecto”. Esta diferencia permitirá, entonces, asignar un valor confiable al criterio y minimizar la incertidumbre en el proceso de evaluación.

Con la finalidad de hacer un aporte metodológico a nivel de planificación para la evaluación de los impactos ambientales potenciales derivados del llenado y la operación de un embalse sobre el recurso hídrico, esta investigación consideró para la predicción del riesgo de eutrofización del Embalse Monaicito-Piedra Azul la utilización del Modelo LACAT de CEPIS, además de criterios y procedimientos que permiten cuantificar los aportes de fósforo total de la vegetación del vaso, así como los aportes de fósforo total anual por asentamientos humanos, vertederos de basuras y actividades agropecuarias localizados en la cuenca del embalse.

MATERIALES Y MÉTODOS

La eutrofización consiste en un desarrollo excesivo de algas en una masa de agua superficial estancada que origina una alteración de sus características fisicoquímicas iniciales. Los responsables de este fenómeno son principalmente

los nutrientes para los organismos vegetales, que ven incrementada continuamente su concentración en las aguas continentales como consecuencia de los vertidos de aguas residuales provenientes de actividades antrópicas (Villaseñor, 2001). Este proceso resulta del aumento de nutrientes limitantes, principalmente nitratos y fosfatos que proporcionan un desarrollo exagerado de fitoplancton y plantas acuáticas (Roldán & Ramírez, 2008).

El concepto de nutriente limitante se fundamenta en el supuesto de que para una determinada estequiometría celular de las plantas acuáticas, el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa vegetal es aquel que primero se consume o que alcanza un mínimo antes que los demás nutrientes involucrados en la estequiometría. CEPIS (2001) y Salas & Martino (1991) consideran que relaciones de nitrógeno (N) a fósforo (P) en embalses y lagos tropicales superiores a 9:1 son potencialmente limitados por P.

El modelo matemático LACAT desarrollado por CEPIS (2001), se basa en el P como nutriente limitante, para la evaluación de estados tróficos y el manejo de macronutrientes en lagos/embalses tropicales. La Figura 1 presenta una clasificación de los lagos basada en la relación entre la concentración de P que ingresa y el tiempo de residencia del agua.

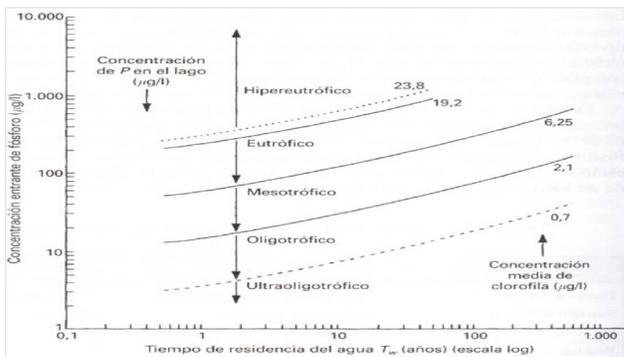


Figura 1. Clasificación de los lagos basada en la relación entre la concentración de fósforo entrante y el tiempo de residencia del agua (T_w), de acuerdo con Kiely (1999)

El modelo LACAT predice la respuesta trófica de lagos/embalses tropicales a cambios en la concentración de fósforo total, basado en dos tipos de relaciones:

a. La ecuación de balance de masa:

$$P\lambda = \frac{L(P)}{Z[(1/T_w) + K_s]} \quad (1)$$

donde:

$P\lambda$: concentración de fósforo total (mg L^{-1})

$L(P)$: carga superficial de fósforo por año ($\text{g m}^2 \text{a}^{-1}$)

Z : profundidad media del embalse (m)

T_w : tiempo de retención en años (a)

K_s : tasa de pérdida global de fósforo total por año (a^{-1})

b. Ecuaciones totalmente empíricas desarrolladas aplicando análisis de regresión lineal múltiple:

$$P\lambda = f[L(P), T_w, Z] \quad (2)$$

$$P\lambda = \text{CONS } L(P)^A T_w^B Z^C \quad (3)$$

donde: CONS, A, B y C son constantes.

La ecuación de regresión múltiple para fósforo total producto de una regresión “stepwise”, con todas las variables independientes disponibles fue:

$$P\lambda = 0,290 L(p)^{0,891} T_w^{0,676} Z^{-0,934} \quad (4)$$

Con $r^2=0,902$; $SE=0,044$; $N=39$

CEPIS (2001) reporta que los límites numéricos de clasificación trófica como los modelos matemáticos desarrollados para lagos cálidos tropicales difieren significativamente de aquellos desarrollados para lagos templados. La capacidad para predecir las concentraciones de fósforo total del modelo empírico LACAT, desarrollado con datos reportados en lagos/embalses tropicales ubicados en el continente americano, se probó con serie de datos de otros cuerpos de agua cálidos tropicales de África. El sistema del CEPIS de clasificación trófica basado en el fósforo total se aplicó a los lagos africanos y se comparó con las clasificaciones de estado trófico reportadas por los investigadores africanos. La concordancia general de las categorías reportadas con aquellas estimadas confirmaron la capacidad predictiva del modelo LACAT y del sistema de clasificación trófica de CEPIS, y por lo tanto su utilidad como una herramienta de predicción para determinar el estado trófico de cualquier lago/embalse cálido tropical.

Con la finalidad de calcular el factor carga de P que llegará al vaso del total que se producen a nivel de las cuencas aportantes al Embalse Monaquito - Piedra Azul se procedió a identificar las fuentes contaminantes y a cuantificar su factor de carga.

Las fuentes de P seleccionadas fueron:

- **Aguas residuales de los centros poblados que disponen de redes de cloacas, y heces humanas provenientes de la población dispersa.** Para el cálculo del factor de carga, se consideró que un 5% del total de estos aportes llegaría al Embalse Monaquito - Piedra Azul. Con base en Veenstra & Polprasert (1997) y de acuerdo a experiencias desarrolladas por el CIDIAT-ULA en estudios precedentes, la carga de P para estas fuentes varía en el siguiente rango de valores: (1-4) g habitante⁻¹ día⁻¹, con un valor promedio de 2,5 g habitante⁻¹ día⁻¹. Para estimar el número de habitantes se procedió a recopilar la información referente a la población presente en las cuencas aportantes según el último censo (del año 2001) y se establecieron las tasas de crecimiento anual, las cuales promediadas se utilizaron para calcular las proyecciones de población en los centros poblados considerados, con intervalos de cinco (5) años, a través del método lineal. Se consideró como la población dispersa aportante un 35% de las estimaciones anteriores.
- **Desechos sólidos de origen municipal, dispuestos en botaderos de basura y provenientes de la población dispersa.** Se estableció que un 5% de los desechos provenientes de los centros poblados y un 2% de los desechos dispuestos por la población dispersa, llegarán al Embalse. Igualmente se consideró que sólo en los centros poblados más importantes, puede existir un servicio de recolección de desechos sólidos. Se utilizaron los datos de población (tanto para los centros poblados, como para la población dispersa, y una tasa de producción de desechos sólidos de 0,52 kg habitante⁻¹ día⁻¹), para establecer estos aportes de nutrientes. La ecuación contemplada para la determinación de la carga total de nutrientes fue la siguiente:

$$CTN_i = P_i * TG * CS * FC * 365 \quad (5)$$

donde:

CTNi: carga total de nutrientes para el año i, en kg año⁻¹;

Pi: población para el año i

TG: tasa de generación = 0,52 kg habitante⁻¹ día⁻¹ (Fuente: CIDIAT, 2010)

CS: cobertura del servicio = 0,75 para una cobertura de 75% (Fuente: Estimación y Juicio de Expertos. CIDIAT-ULA)

FC: factor de carga = 0,006 kg P kg⁻¹ de desechos sólidos

- **Estiércol de animales (vacunos, porcinos, ovinos, equinos y aves).** De esta carga total, se determinó que un 5% llegará al embalse. El CIDIAT (2010) cuantificó alrededor de 360 cabezas de ganado vacuno y 90 cabezas de equinos dentro del área del embalse. Para la proyección de los ganados, tanto para vacunos como equinos, en el horizonte del proyecto considerado, se establecieron tasas de crecimiento del 2% (0,02) y 1% (0,01). Para determinar la carga total de fitonutrientes se hizo uso de la ecuación:

$$CTN_i = N_i * CE * FC * 365 \quad (6)$$

donde:

CTNi: carga total de nutrientes para el año i, en kg año⁻¹

Ni: número de cabezas de ganado para el año i

CE: carga de estiércol (kg estiércol día⁻¹ cabeza⁻¹)

FC: factor de carga (kg P Mg⁻¹ estiércol)

- **Escorrentía superficial.** El factor de carga del fósforo, de acuerdo a juicio de expertos y la experiencia del CIDIAT-ULA en estudios similares, quedó establecido de acuerdo al tipo de cobertura vegetal existente en el área (con base en el mapa de uso actual de la tierra (CIDIAT, 2010):
 - o *Bosques*: (0,03–0,9) kg P ha⁻¹ año⁻¹
 - o *Matorrales*: (0,03–0,9) kg P ha⁻¹ año⁻¹
 - o *Herbazal denso y/o Pastizales*: (0,02–0,08) kg P ha⁻¹ año⁻¹
 - o *Herbazal ralo y/o Cultivos*: (0,06–3,0) kg P ha⁻¹ año⁻¹

El aporte total del fitonutriente se obtuvo multiplicando la superficie (ha) por el factor de carga (kg ha⁻¹ año⁻¹) para el tipo de cobertura en consideración. Se estableció que el 100% de la carga de fósforo llegaría al Embalse.

- **Biomasa del área de inundación.** Las reservas de nutrientes en el área de inundación de un embalse asociadas con la vegetación, están representadas, tanto por la biomasa superficial, como por el mantillo, las raíces y los suelos. Al igual que para la escorrentía superficial, a partir del mapa de uso actual de la tierra generado por el CIDIAT (2010), se determinaron las superficies con sus respectivos porcentajes, del tipo de cobertura vegetal existente en el área de inundación. Con base a juicio de expertos y experiencias anteriores del CIDIAT, referente a estimación de biomasa y nutrientes (P), se estableció un valor del fósforo en biomasa superficial de 0,73 kg Mg⁻¹. El aporte total de P del área de inundación se determinó en función de la biomasa superficial multiplicando el área de cada tipo de cobertura por los factores de carga. Se considera que el 30% de este aporte total estará

disponible en el primer año de operación y durante el llenado del vaso; el restante 70% contribuirá durante los siguientes 14 años.

El tiempo de llenado del vaso se consideró como el cociente entre la capacidad útil del embalse y el aporte medio de los afluentes, el cual es del orden de 0,5 años.

Para analizar el riesgo de eutrofización durante el llenado se tomaron en cuenta cinco (5) escenarios: 100%, 75%, 50%, 25% y 0% de deforestación del área de inundación. Para calcular la carga de P aplicada (expresada en $g\ m^{-2}\ año^{-1}$) se consideró un espejo de agua del 50% del área máxima inundada por el vaso (50 ha). La profundidad media considerada es la profundidad correspondiente a 50 ha de espejo de agua en la curva de elevación-área-capacidad del vaso, es decir, unos 22 m.

Para el análisis del riesgo de eutrofización correspondiente a la fase de llenado se asumió que: A. El 50% del aporte total de P estimado para cada año está disponible en cada período simulado de un (1) año. El restante 50% se acumulará o saldrá del vaso, y generará una carga adicional de P disponible, en alícuotas iguales en los siguientes 25 años. De esta manera, se trata de considerar el efecto acumulativo del P en el embalse durante su etapa de operación. B. El área del vaso se considera como la correspondiente al nivel de aguas normales, unas 100 ha, y la profundidad media del vaso de unos 25 m en la fase de operación normal.

Para la determinación de la magnitud de impacto ambiental representado por el riesgo de eutrofización, tanto para el llenado como para la operación del embalse, se procedió a la consideración de la escala propuesta por Pastakia & Jensen (1998) para la cuantificación de este criterio de EIA:

- o 0 = Sin cambios
- o 1 = Cambio negativo del status quo
- o 2 = Desmejora o Cambio negativo significativo
- o 3 = Desmejora o Cambio Mayor

Donde los valores 0,1, 2 y 3, son asignados a través del uso del riesgo de eutrofización (calculado para el embalse) como un indicador de magnitud del impacto ambiental.

Gómez (1999) define indicador de impacto ambiental como la expresión medible de un impacto; es decir, aquella variable simple o la expresión más o menos compleja que mejor representa la alteración. Así pues un indicador debe ser capaz de representar numéricamente el estado del factor que pretende valorar. En otras palabras se denomina indicador a la expresión a través de la cual se mide de forma

cuantificada el impacto. Los indicadores de impacto vienen expresados en unidades heterogéneas inconmensurables, las cuales requieren ser transformados a unidades homogéneas, adimensionales, para hacerlos comparables, condición necesaria para comparar los impactos y para totalizar la alteración que introducirían al Proyecto.

Considerando lo expuesto, la magnitud del riesgo de eutrofización del embalse, supone la futura intensidad del detrimento en la calidad del agua del embalse, y está dada por la relación mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación riesgo de eutrofización versus magnitud del impacto ambiental

Grado Eutrófico del Embalse *	Magnitud del cambio o efecto**	
	Escala de valores	Significado
Ultraoligotrófico / Oligotrófico	0	Sin cambios o sin importancia
Mesotrófico	-1	Cambio negativo del status quo
Eutrófico	-2	Desmejora o cambio significativo
Hipereutrófico	-3	Desmejora o cambio mayor

* Conforme a la clasificación propuesta por Vollenweider (1983)

** Considerando la escala de valores de Pastakia & Jensen (1998)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez estimado el factor de carga de cada una de las fuentes aportantes de fósforo al embalse, se obtuvo que, para el horizonte de tiempo considerado (40 años, contados una vez que el embalse inicie su fase de llenado), el principal aporte provendría de las aguas de escorrentía, seguido de los centros poblados que tienen red de cloacas, tal como se presenta en la Tabla 2.

Considerando los cinco (5) escenarios de deforestación del área de inundación, se puede observar en la Tabla 3 que el riesgo de eutrofización (estado eutrófico) disminuye a medida que aumenta el porcentaje de deforestación, pasando de estado eutrófico para 0% de deforestación a estado mesotrófico para 100% de deforestación, es decir, de un nivel de alta productividad con bajas concentraciones de oxígeno y altas concentraciones de nutrientes a un nivel de media productividad. Tomando en cuenta la relación riesgo de eutrofización vs. magnitud del impacto ambiental, se tendría que de no deforestar el vaso, se esperaría una desmejora o cambio significativo sobre la situación de línea base (situación “sin proyecto”) mientras que en el escenario de que se remueva al menos un 25% de la masa forestal el cambio se consideraría ligero de la situación de línea base.

Tabla 2. Aportes totales de fósforo al Embalse Monaico - Piedra Azul en el horizonte del proyecto considerado

Año	Aportes de Fósforo al Embalse Monaico-Piedra Azul								Totales (kg año ⁻¹)	Carga Total de Fósforo (g m ⁻² año ⁻¹)
	Fuentes de fósforo									
	Centros poblados que tienen red de cloacas	Heces humanas provenientes de la población dispersa	Desechos sólidos dispuestos en botaderos de basura	Desechos sólidos provenientes de la población dispersa	Estiércol de ganado vacuno	Estiércol de ganado caballar	Escorrentía superficial	Biomasa del área de inundación		
0	1.896,24	19,62	177,49	177,49	316,02	75,56	5.043,08	993,66	8.699,16	8,70
1	1.923,69	19,72	180,06	180,06	322,34	76,31	5.043,08	165,61	7.910,86	7,91
2	1.951,53	19,82	182,66	182,66	328,78	77,07	5.043,08	165,61	7.951,22	7,95
3	1.979,77	19,92	185,31	185,31	335,36	77,84	5.043,08	165,61	7.992,20	7,99
4	2.008,42	20,02	187,99	187,99	342,07	78,62	5.043,08	165,61	8.033,80	8,03
5	2.037,49	20,13	190,71	190,71	348,91	79,41	5.043,08	165,61	8.076,04	8,08
6	2.066,97	20,23	193,47	193,47	355,89	80,20	5.043,08	165,61	8.118,92	8,12
7	2.096,89	20,33	196,27	196,27	363,00	81,01	5.043,08	165,61	8.162,45	8,16
8	2.127,23	20,43	199,11	199,11	370,26	81,82	5.043,08	165,61	8.206,65	8,21
9	2.158,02	20,54	201,99	201,99	377,67	82,63	5.043,08	165,61	8.251,53	8,25
10	2.189,25	20,64	204,91	204,91	385,22	83,46	5.043,08	165,61	8.297,09	8,30
11	2.220,93	20,75	207,88	207,88	392,93	84,29	5.043,08	165,61	8.343,35	8,34
12	2.253,07	20,85	210,89	210,89	400,79	85,14	5.043,08	165,61	8.390,31	8,39
13	2.285,68	20,96	213,94	213,94	408,80	85,99	5.043,08	165,61	8.438,00	8,44
14	2.318,76	21,06	217,04	217,04	416,98	86,85	5.043,08	165,61	8.486,41	8,49
15	2.352,32	21,17	220,18	220,18	425,32	87,72	5.043,08	165,61	8.535,56	8,54
16	2.386,36	21,28	223,36	223,36	433,82	88,59	5.043,08	--	8.419,86	8,42
17	2.420,89	21,38	226,60	226,60	442,50	89,48	5.043,08	--	8.470,53	8,47
18	2.455,93	21,49	229,87	229,87	451,35	90,37	5.043,08	--	8.521,98	8,52
19	2.491,47	21,60	233,20	233,20	460,38	91,28	5.043,08	--	8.574,21	8,57
20	2.527,53	21,71	236,58	236,58	469,58	92,19	5.043,08	--	8.627,25	8,63
21	2.564,11	21,82	240,00	240,00	478,98	93,11	5.043,08	--	8.681,10	8,68
22	2.601,21	21,93	243,47	243,47	488,56	94,04	5.043,08	--	8.735,77	8,74
23	2.638,86	22,04	247,00	247,00	498,33	94,98	5.043,08	--	8.791,29	8,79
24	2.677,05	22,15	250,57	250,57	508,29	95,93	5.043,08	--	8.847,66	8,85
25	2.715,79	22,27	254,20	254,20	518,46	96,89	5.043,08	--	8.904,89	8,90
26	2.755,09	22,38	257,88	257,88	528,83	97,86	5.043,08	--	8.963,00	8,96
27	2.794,97	22,49	261,61	261,61	539,41	98,84	5.043,08	--	9.022,00	9,02
28	2.835,42	22,61	265,39	265,39	550,19	99,83	5.043,08	--	9.081,91	9,08
29	2.876,45	22,72	269,24	269,24	561,20	100,83	5.043,08	--	9.142,75	9,14
30	2.918,08	22,84	273,13	273,13	572,42	101,84	5.043,08	--	9.204,52	9,20
31	2.960,31	22,95	277,08	277,08	583,87	102,86	5.043,08	--	9.267,23	9,27
32	3.003,15	23,07	281,09	281,09	595,55	103,88	5.043,08	--	9.330,92	9,33
33	3.046,61	23,18	285,16	285,16	607,46	104,92	5.043,08	--	9.395,58	9,40
34	3.090,70	23,30	289,29	289,29	619,61	105,97	5.043,08	--	9.461,24	9,46
35	3.135,43	23,42	293,48	293,48	632,00	107,03	5.043,08	--	9.527,91	9,53
36	3.180,81	23,54	297,72	297,72	644,64	108,10	5.043,08	--	9.595,61	9,60
37	3.226,84	23,66	302,03	302,03	657,53	109,18	5.043,08	--	9.664,36	9,66
38	3.273,54	23,78	306,40	306,40	670,68	110,27	5.043,08	--	9.734,16	9,73
39	3.320,91	23,90	310,84	310,84	684,10	111,38	5.043,08	--	9.805,04	9,81
40	3.368,97	24,02	315,34	315,34	697,78	112,49	5.043,08	--	9.877,01	9,88

Tabla 3. Resultados de los escenarios de deforestación en el vaso durante el llenado del embalse

Escenario (% deforestación)	Aportes de la cuenca (*) (kg año ⁻¹)	Aportes del área de inundación (kg año ⁻¹)	Carga Total de Fósforo (g m ⁻² año ⁻¹)	Riesgo de eutrofización (%)			
				O	M	E	HE
0	3.852,75	993,66	9,69		45,12	52,87	1,22
25	3.852,75	745,24	9,20	1,05	49,75	48,28	
50	3.852,75	496,83	8,70	1,41	54,63	43,28	
75	3.852,75	248,41	8,20	1,91	59,56	38,05	
100	3.852,75	0,00	7,71	2,58	64,26	32,83	

(*) Aportes de la cuenca durante los primeros 6 meses (tiempo de llenado del Embalse)

O = Oligotrófico

M = Mesotrófico

E = Eutrófico

HE = Hipereutrófico

Tabla 4. Predicción del riesgo de eutrofización en el Embalse Monaicito –Piedra Azul

AÑO	CARGA P (g P m ⁻² día ⁻¹)	Riesgo del estado trófico del embalse (%)			CONCENTRACIÓN EN EL EMBALSE (g P m ⁻³)
		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	
0	4,35	5,76	74,40	19,73	0,073
1	4,06	7,61	76,52	15,79	0,050
2	4,18	6,77	75,75	17,38	0,051
3	4,30	6,04	74,83	19,03	0,053
4	4,42	5,39	73,76	20,73	0,054
5	4,55	4,76	72,47	22,63	0,055
6	4,67	4,25	71,16	24,42	0,057
7	4,79	3,80	69,75	26,25	0,058
8	4,92	3,37	68,14	28,26	0,059
9	5,04	3,02	66,57	30,14	0,061
10	5,17	2,68	64,82	32,19	0,062
11	5,29	2,40	63,15	34,09	0,063
12	5,42	2,13	61,30	36,14	0,065
13	5,55	1,90	59,43	38,18	0,066
14	5,68	1,69	57,54	40,22	0,067
15	5,81	1,50	55,64	42,22	0,069
16	5,86	1,44	54,91	42,99	0,069
17	5,99	1,28	53,02	44,95	0,071
18	6,12	1,14	51,14	46,87	0,072
19	6,25	1,02	49,29	48,75	0,073
20	6,39	1,07	47,31	50,72	0,075
21	6,52	1,19	45,51	52,49	0,076
22	6,66	1,33	43,61	54,34	0,078
23	6,79	1,48	41,89	55,99	0,079
24	6,93	1,64	40,08	57,71	0,081
25	7,07	1,81	38,33	59,35	0,082

Los primeros 20 años, ya en la etapa de operación, el Embalse se comportaría como mesotrófico y a partir de allí, por efectos de la acumulación del fósforo en el vaso, la condición del embalse pasaría a eutrófica, como se observa en la Tabla 4. Esta condición debería evitarse

ya que incidiría negativamente en la salud del ecosistema del embalse y por tanto en la calidad del agua. Al evaluar la magnitud del riesgo de eutrofización en esta etapa, se cuantifica como leve (-1) hasta el año 20, y luego como significativa (-2).

La determinación de un posible cambio significativo o mayor (-2) sobre la calidad del agua del embalse durante su operación, representaría el riesgo de ocurrencia de otros impactos ambientales derivados de los procesos eutróficos.

El CEPIS (2001), señala que la primera consecuencia de la eutrofización es el desequilibrio ecológico del sistema, la cual supondría la ocurrencia o magnificación de otros impactos ambientales tanto dentro del vaso del embalse como sobre los usuarios del recurso hídrico, aguas debajo de la presa. Tal como se expresa a continuación:

- Impactos en la calidad del Embalse

- o Incremento en la cantidad de materia orgánica particulada como fitoplancton, zooplancton, bacterias y detrito.
- o Sustitución de especies de algas diatomeas y crisofíceas (inocuas) por especies de los grupos clorofíceas y cianofíceas (algas verdes y azul verdosas indeseables que excretan sustancias tóxicas al medio).
- o Incremento de compuestos orgánicos disueltos, los cuales:
 - Producen olores y sabores desagradables.
 - Cambian el color del agua.
 - Son precursores potenciales de compuestos halogenados.
 - Constituyen el sustrato para el crecimiento bacteriano en las plantas de tratamiento y redes de distribución.
- o La falta de oxígeno en el área de contacto agua-sedimento conduce a una mineralización incompleta de las sustancias orgánicas.
- o Pérdida de los valores estéticos.

- Impactos en los usuarios del recurso

- o Riesgo a la salud por exposición a algas y bacterias tóxicas. De acuerdo con Kay *et al.* 1980 (citado por CEPIS, 2001), investigaciones epidemiológicas han establecido una elevada correlación entre epidemias gastrointestinales y la presencia de grandes concentraciones de algas verdes-azules en los Embalses de abastecimiento público.
- o Riesgo a la salud por exposición a compuestos orgánicos potencialmente tóxicos o cancerígenos. Hoehn *et al.* 1980 (citado por CEPIS, 2001) demuestran experimentalmente que el fitoplancton es una fuente importante de precursores de trihalometanos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el análisis y decisión de los resultados y a fin de evitar y mitigar los impactos de la condición eutrófica del embalse, se recomienda implementar las siguientes medidas:

- a. Diseñar, construir y operar sistemas de depuración de aguas residuales municipales para los centros poblados ubicados aguas arriba del área del Embalse, los cuales deben incluir tratamiento terciario (remoción de nitrógeno y fósforo).
- b. Legislar a fin de controlar y restringir el incremento de las actividades agropecuarias en el área de influencia del Embalse. Exigir a los desarrollos agropecuarios asentados y a permisar en la cuenca, la implementación de un plan manejo y la disposición adecuada de desechos sólidos y efluentes líquidos de sus instalaciones que incluya remoción de nutrientes (N y P) en los efluentes líquidos, o el reuso de los mismo mediante la implementación de sistemas integrados.
- c. Implementar sistemas de tratamiento convencionales- mezcla rápida, mezcla lenta, sedimentación, filtración, desinfección/ postcloración y ajuste del Índice de Langelier para adecuar la calidad de las aguas naturales que aportará el Embalse para los usos doméstico e industrial previstos en el Complejo Agroindustrial y los centros poblados aguas abajo del embalse.
- d. Conforme a los resultados de la simulación de diferentes escenarios de deforestación para la fase de llenado del Embalse (Tabla 3), se recomienda deforestar al menos el 50% de la vegetación presente en el área de inundación del vaso, evitando así el paso al estado eutrófico predicho para el llenado del embalse.

REFERENCIAS

- CEPIS. (2001). Metodología simplificada para la evaluación de la eutrofización en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS. Lima, Perú.
- CIDIAT. (2010). Estudio de Impacto Ambiental y Sociocultural del Proyecto “Construcción del Embalse Monaicito - Piedra Azul”. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- DAL-RÉ, R. (2003). Pequeños embalses de uso agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. p. 365.

- GÓMEZ, O. (1999). Evaluación de Impacto Ambiental. Un Instrumento Preventivo para la Gestión Ambiental. Grupo Mundi-Prensa. España.
- KIELY, G. (1999). Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. McGraw-Hill. p. 322.
- LESTER, J. & BIRKETT, J. (1999). Microbiology and Chemistry for Environmental Scientists and Engineers. Second Edition. E & FN Spon. II New Fetter Lane, London EC4P 4EE, UK.
- PASTAKIA, C. & JENSEN, A. (1998). The rapid impact assessment matrix (RIAM) for environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review. Denmark.
- PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA. (2007). Proyecto Nacional Simón Bolívar 2007-2013. Caracas, Venezuela.
- ROLDÁN, G. & RAMÍREZ J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Católica de Oriente. Editorial Universidad de Antioquia.
- SALAS, H. & MARTINO P. (1991). A simplified phosphorous trophic state model for warm-water tropical lakes. Water Resources Journal. Vol 25, N° 3, pp 341 – 350. UK.
- SCHNOOR, G. & ZEHNDER, A. (1996). Environmental Modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil. John Wiley and Sons, Inc. USA.
- VENSTRA, S. & POLPRASERT, C. (1997). “Wastewater treatment”. Lecture notes. IHE-DELFT. Delft, The Netherlands.
- VILLASEÑOR, J. (2001). Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas. Colección Tesis Doctorales N° 122. p.20. Universidad de Castilla – La Mancha. España.
- VOLLENWEIDER, R.A. (1983). Eutrophication. Notes distributed during the II Meeting of the Regional Project on the Eutrophication of Tropical Lakes. Lima, Perú.