



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**EVALUACIÓN DEL BALANCE DE AGUA Y FÓSFORO EN
LA PRESA DE VALLE DE BRAVO.**

PERIODO 2008-2010

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A:

ARANTXA SACRISTÁN RAMÍREZ



DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARTÍN MERINO IBARRA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PROPIETARIO: DR. MIROSLAV MACEK

PROPIETARIA: DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ

PROPIETARIO (TUTOR): DR. MARTÍN MERINO IBARRA

1er. SUPLENTE: DR. JORGE ALBERTO RAMÍREZ ZIEROLD

2do. SUPLENTE: HIDIROBIÓL. FERMÍN SERGIO CASTILLO SANDOVAL

Dedicado a:

Mis padres Federico y Celia.

Mis hermanas Carolina, Montserrat y Omar.

Mis camaradas Canelita y mi Zo.

Agradecimientos institucionales

A la Facultad de Ciencias por brindarme una formación académica, personal y de responsabilidad social.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por la oportunidad de encontrar y reafirmar mi vocación por las ciencias acuáticas.

Al laboratorio de Biogeoquímica Acuática por las experiencias que han ido consolidando mi profesión.

Este trabajo se basó en información obtenida gracias al financiamiento otorgado al Dr. Martín Merino-Ibarra a través de los proyectos UNAM-PAPIIT-IN207702 y CONACYT-SEMARNAT C01-1125, así como al Dr. Javier Carmona-Jiménez a través del proyecto UNAM-PAPIIT IN2089107-3, y también con el apoyo al monitoreo del embalse de Valle de Bravo otorgado por Provalle, A.C.

A Fermin Sergio Castillo Sandoval, por la realización de los trabajos de campo, así como de los análisis químicos de nutrientes y de fósforo total.

A todos los miembros del jurado por sus valiosas observaciones para la mejora de este trabajo.

Agradecimientos personales

Quiero empezar esta sección agradeciendo a mis tutores Martín y Jorge por su cariño, dedicación y paciencia con las que me han formado en los campos de la ciencia y la docencia. Sus personalidades son una inspiración en diversas facetas de mi vida, sus valiosos consejos me han guiado y las experiencias que hemos compartido me han transformado. A Sergio, por su cariño e invaluable apoyo a mi formación por medio de la enseñanza de las técnicas del laboratorio y la logística para el campo.

A mis compañeros del laboratorio Andrea, Mariel, Luz, Julio, Gerardo, Mayrene, Adán y Paty. Además de su excelente compañía, cada uno ha dejado huella en mí con sus enseñanzas profesionales y personales.

En estas líneas, agradezco por su cariño y contribución a mi salud mental durante la elaboración de esta tesis a mis amigas y amigos: a los de toda la vida, a los que han estado durante una buena parte de ella y ¡a los que todavía seguimos pateando!

Por último, con profunda sinceridad, quisiera agradecer a mi familia, pues entre amor y risas me han inculcado diversas habilidades y valores que me han impulsado a alcanzar mis metas profesionales. Les agradezco por motivarme en lo que hago y a dar lo mejor de mí, así como por desarrollar mi sensibilidad para convertirme en buen ser humano. Ustedes son el núcleo de todo lo que soy.

Resumen

La biogeoquímica estudia y establece las relaciones entre los reservorios y los organismos por medio de los flujos de los elementos químicos principales para la vida, es decir, de los ciclos biogeoquímicos. Por medio del conjunto de las diferentes disciplinas que integran a la biogeoquímica se puede tener una idea más clara y precisa de los eventos que ocurren en un sistema y conocer patrones de comportamiento de los elementos biogeoquímicos, entre ellos el fósforo, a través del tiempo. Al final, este conocimiento facilita la intervención en algunos procesos de los ecosistemas, según el interés de las actividades humanas y permitiendo a la vez considerar los aspectos necesarios ligados a la sostenibilidad ecosistémica.

El sistema que se estudia en este trabajo es la presa de Valle de Bravo, para la cual se cuenta con registros de datos e interpretaciones por parte del Laboratorio de Biogeoquímica Acuática (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM) desde 2002 hasta la fecha. Se llevó a cabo un análisis de los datos del lapso 2002-2010 con el fin de integrar la información hidrológica y de fósforo, identificando las escalas de variabilidad en el tiempo para el sistema con énfasis en los datos obtenidos entre 2008 y 2010, pues se presentó la sucesión de dos años de bajo nivel de agua, siendo el 2009 el mínimo histórico en 9 años. Después de este año, el nivel de la presa se mantuvo en uno de sus niveles máximos debido a ingresos inusuales de lluvia e inyección de agua.

El análisis en las escalas propuestas facilitó la evaluación del impacto humano en las interacciones que se llevan a cabo en el embalse, dada su importancia para el abastecimiento de la Ciudad de México y su Zona Metropolitana.

La ruta crítica para cumplir el objetivo se basó en los muestreos, los análisis químicos de las muestras obtenidas en campo y su procesamiento para obtener los balances de agua y fósforo; se estimaron también los Procesos Internos Netos (PIN) de este elemento.

Observando los años 2008-2010 en el contexto de los anteriores, se distinguió una disminución de fósforo en la fuente principal de aporte externo al embalse, los afluentes. Sin embargo, la carga interna del sistema aumentó en el tiempo, viéndose favorecido este proceso especialmente en la transición del nivel mínimo al máximo de 2009-2010. En conjunto, estos procesos tienen un impacto en la toma de decisiones para el manejo de la presa, así como en la capacidad de retornar al estado de equilibrio tras haber sido perturbada, lo que se conoce como resiliencia.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	6
1.2 Zona de estudio	6
1.2.1 Sistema Cutzamala.....	7
1.2.2 Presa Valle de Bravo.....	8
1.2.3 Calidad del agua.....	10
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
2. Adquisición y procesamiento de datos.	12
2.1 Logística de muestreo.....	12
2.1.1 Muestreo de los afluentes.....	12
2.1.2 Muestreo en la presa.....	12
2.2 Determinaciones analíticas de fósforo.....	13
2.2.1 Mediciones de fósforo total.....	14
2.3 Procesamiento de datos.....	15
2.3.1 Balance de agua	15
2.2.2 Balance de masa de fósforo	16
3. Resultados y discusión.....	18
Variaciones del nivel de agua en la presa.....	18
Variaciones del volumen.....	20
Lluvia y evaporación.....	22
Ríos y drenajes.....	26
Extracción de agua	35
Inyección de agua.....	36
Balance de agua.....	39
Del agua al fósforo: preámbulo al balance de masa.....	41
Salida de fósforo por extracción de agua.....	46
Entrada de fósforo por inyección de agua	48
Variaciones temporales y espaciales del fósforo en el embalse	50
Balance de masa de fósforo.....	54
4. Conclusiones.....	61
5. Recomendaciones.....	63
6. Referencias	64

Lista de Figuras

Figura 1 Ciclo del fósforo	2
Figura 2 Ciclo del fósforo en lagos y embalses.....	3
Figura 3 Mecanismos de transferencia de fósforo antrópico hacia embalses y lagos.....	3
Figura 4 Esquema del Sistema Cutzamala.....	8
Figura 5 Batimetría del embalse Valle de Bravo.....	9
Figura 6 Autoanalizador de flujo segmentado Skalar modelo San plus system.....	14
Figura 7 Cambio de nivel mensual durante el período 2002-2010 en el embalse de Valle de Bravo.....	19
Figura 8 Cambio de nivel mensual durante el período 2008-2010 en el embalse de Valle de Bravo.....	19
Figura 9 Fluctuaciones del volumen mensual durante el periodo 2002-2010 en el embalse de Valle de Bravo.....	21
Figura 10 Fluctuaciones del volumen mensual durante el periodo 2008-2010 en el embalse de Valle de Bravo	22
Figura 11 Lluvia y Evaporación anual en Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010	24
Figura 12 Lluvia y evaporación diaria durante el periodo 2008-2010 reportada en una estación meteorológica cercana al embalse de Valle de Bravo.....	26
Figura 13 Volumen anual de afluentes y lluvia que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	27
Figura 14 Volumen anual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	28
Figura 15 Entradas de agua al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	29
Figura 16 Flujo mensual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	30
Figura 17 Flujo mensual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	30
Figura 18 Extracción anual del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	35
Figura 19 Extracción diaria del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	36
Figura 20 Inyección anual al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	37
Figura 21 Inyección y extracción del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	38
Figura 22 Inyección mensual al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	39
Figura 23. Entradas y salidas de agua mensuales del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	40
Figura 24 Entradas de fósforo al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	42
Figura 25 Carga mensual de los afluentes que ingresan al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010...44	
Figura 26 Carga mensual de los afluentes que ingresan al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010...45	
Figura 27 Extracción mensual de fósforo del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	46

Figura 28 Inyección mensual de fósforo al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	48
Figura 29 Carga interna anual del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	51
Figura 30 Carga interna mensual del embalse y nivel mensual de la presa de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	53
Figura 31 Flujo neto mensual de P en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	55
Figura 32 Flujo neto mensual de P en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	56
Figura 33 Procesos Internos Netos por mes en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	57
Figura 34 Procesos Internos Netos por mes en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010.....	58

Lista de Tablas

Tabla 1. Aporte anual de lluvia durante el período 2002-2010 al embalse de Valle de Bravo.....	23
Tabla 2. Evaporación anual del embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	25
Tabla 3. Aporte de agua anual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	28
Tabla 4 Términos del balance de agua durante el año 2008.....	32
Tabla 5 Términos del balance de agua durante el año 2009.....	33
Tabla 6 Términos del balance de agua durante el año 2010.....	34
Tabla 7. Aporte promedio de fósforo por afluentes al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	43
Tabla 8. Magnitud de la extracción de fósforo respecto a la entrada total al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	47
Tabla 9. Aporte promedio de fósforo por inyección de agua al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	49
Tabla 10. Carga interna anual de fósforo en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010.....	52
Tabla 11. Relación del fósforo en el reservorio de Valle de Bravo y la entrada total durante el periodo 2002-2010.....	54
Tabla 12 Términos del balance de fósforo 2002-2010.....	60

1. Introducción

Este capítulo aborda el tema principal de esta disertación comenzando por la descripción de la biogeoquímica como el área más amplia de investigación en el tema de los procesos biogeoquímicos del fósforo (P) en los embalses. Después se explica el papel del P como elemento biolimitante en éstos y otros sistemas acuáticos y las diferentes perspectivas para su manejo en la remediación de la eutrofización. El capítulo finaliza con la presentación del área de estudio y los antecedentes sobre los procesos biogeoquímicos del P en la presa de Valle de Bravo. A partir de esta información, se plantearán los objetivos de este trabajo.

La biogeoquímica es el enfoque del estudio de la transformación, flujo y reciclamiento de compuestos químicos en sistemas acuáticos y terrestres (Likens, 2010) (Figura 1). La ciencia de biogeoquímica combina aspectos de la biología, ecología, geología, química, hidrología y meteorología. El reciclamiento de los elementos ocurre dentro de los límites de un ecosistema, mientras que el flujo se refiere a la transferencia de materiales a través de sus límites (Bashkin & Howarth, 2003; Likens, 1992). Los principales objetivos de la biogeoquímica son establecer los vínculos, las interacciones y las magnitudes de los flujos entre los diferentes componentes de un ecosistema para cuantificar las transformaciones de un elemento químico en cada uno de ellos, a través del tiempo.

A diferentes escalas, la Tierra cuenta con reservorios donde se encuentran los principales elementos para la vida (C, N, O, H, S, P) en distintos estados de agregación. Estos elementos químicos son transportados de manera cíclica en los distintos reservorios por medio de cambios físico-químicos inducidos por la naturaleza (Figura 2) y la influencia del hombre (Bashkin & Howarth, 2003), a lo que se le llama ciclos biogeoquímicos (Likens, 2010).

Entre los reservorios de interés para las actividades humanas se encuentran los embalses y los lagos. En los últimos años se han deteriorado principalmente por su sobreexplotación, producto del incremento acelerado de la población y por medidas insuficientes para su uso y manejo sostenibles.

El principal mecanismo de enriquecimiento del agua por P antrópico es el transporte de P a través de las cuencas agrícolas, impactando en los ecosistemas de aguas abajo (Figura 3).

Por lo anterior, es indispensable conocer y entender el funcionamiento de estos ecosistemas realizando un monitoreo continuo de las variables hidrológicas en estos sistemas, así como las interacciones biogeoquímicas de los nutrientes dentro de ellos. Para este trabajo, se considera el caso del P por ser el elemento cuyo control resulta clave para remediar la eutrofización en embalses y lagos.

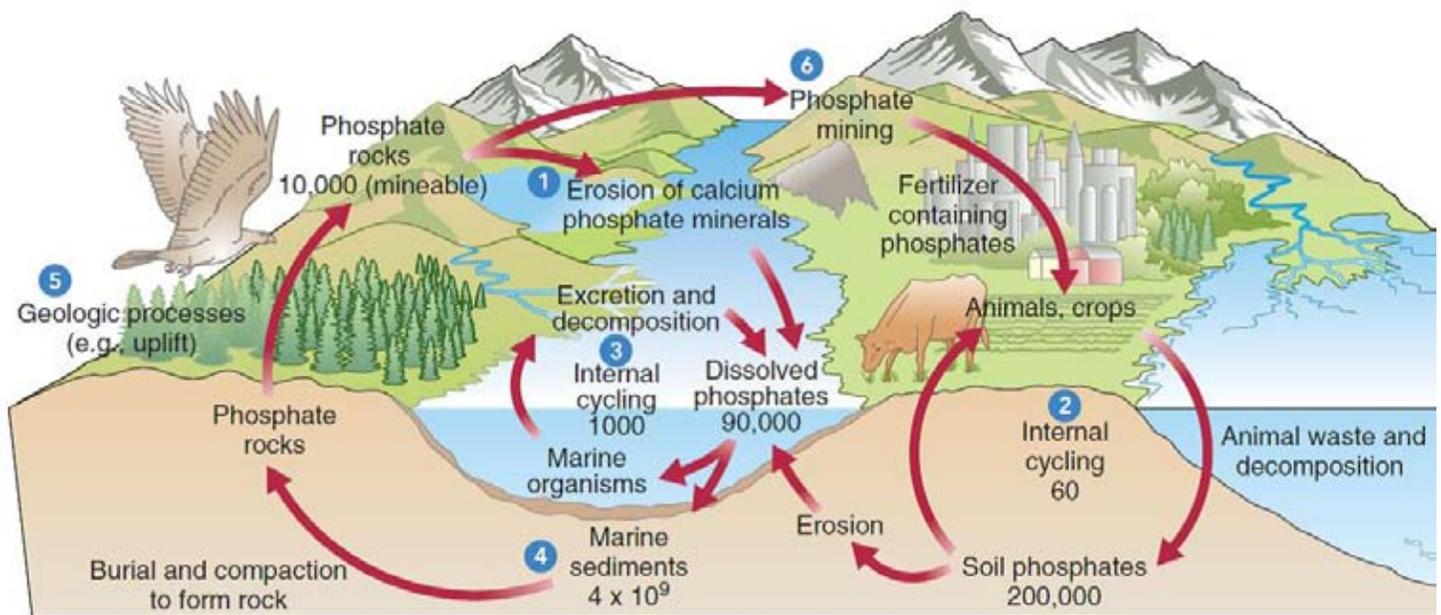


Figura 1 Ciclo del fósforo. Las flechas rojas muestran los flujos del elemento en sus principales reservorios. Los números (10^{12} g P/año) señalan los procesos físicos y químicos por los que se moviliza el fósforo. Tomado de Solomon et al., 2008

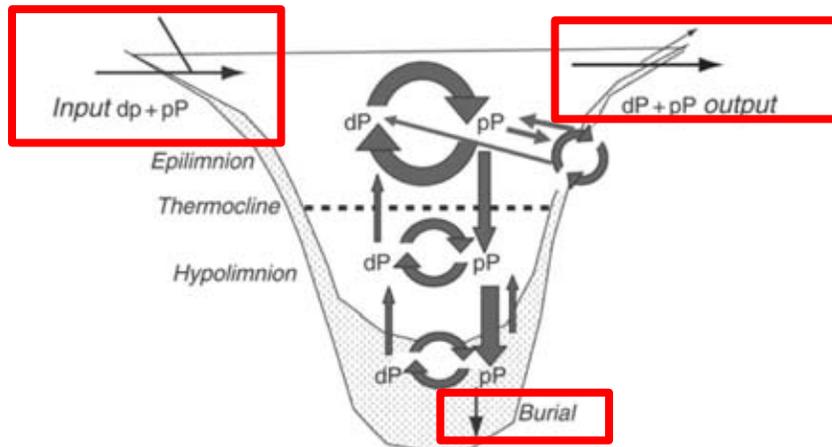


Figure 1 Phosphorus exchange and cycling within inland waters. The 'black box' budget of P includes only exchange (black arrows), including watershed and atmospheric inputs and outputs as well as permanent burial in sediments. Within inland waters, P is cycled between dissolved forms (dP) and particulate forms (pP) and moves within the water column and the underlying sediments. These exchanges are influenced by biotic, chemical, and physical processes.

Figura 2 Ciclo del fósforo en lagos y embalses. Las flechas negras (recuadros rojos), muestran las principales entradas y salidas del régimen hidrológico (flujos de la cuenca, atmosféricos y su ingreso permanente a los sedimentos). El reciclamiento del P se lleva a cabo por medio de sus especies disueltas (dP) y particuladas (pP). En estos intercambios intervienen procesos biológicos, químicos y físicos. Modificado de Likens, 2010

Figure 2.5 The P transfer continuum (Haygarth et al. 2005) depicts the steps by which phosphorus is introduced, mobilized, and transported through agricultural watersheds to have impacts on downstream ecosystems. See text for detailed discussion.

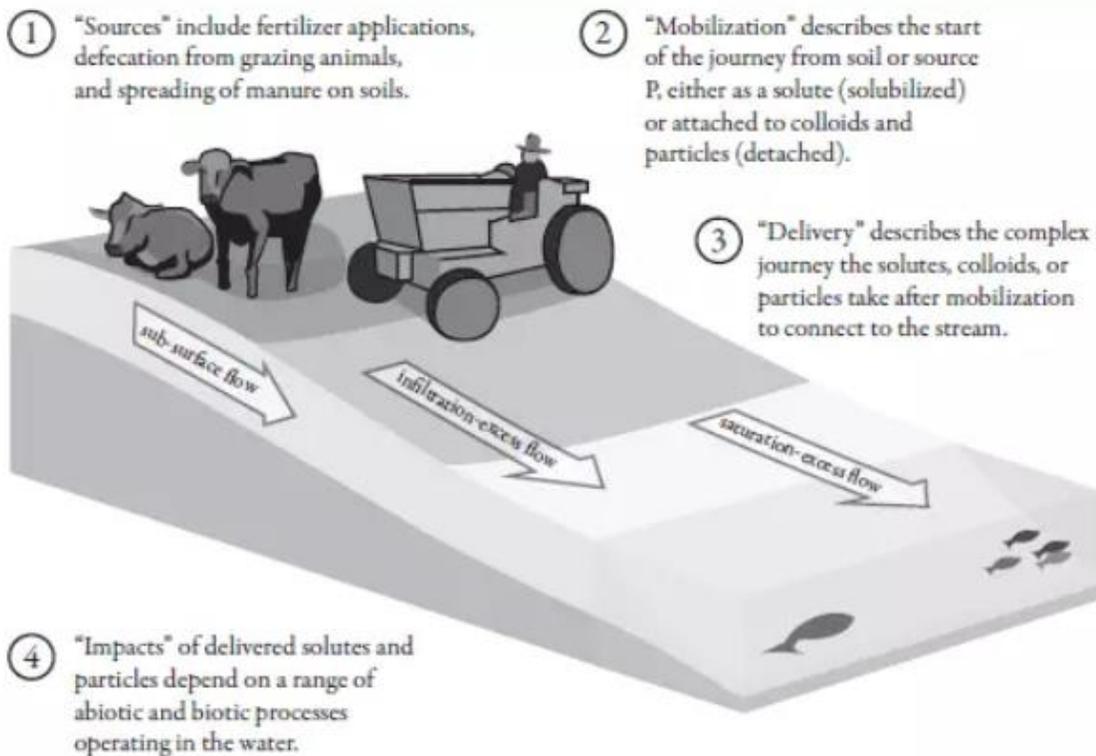


Figura 3 Mecanismos de transferencia de fósforo antrópico hacia embalses y lagos. Las flechas indican el transporte de fósforo hacia el agua. Tomado de Wyant, et al., 2013

La importancia del P en los sistemas acuáticos reside en el papel que desempeña en las funciones bioquímicas de los organismos. En primer lugar, se reconoce su papel en la producción de biomasa (Lewis & Wurtsbaugh, 2008; McMahon & Read, 2013; Wetzel, 2001). Se encuentra también en la producción de ácidos orgánicos por raíces de plantas y microorganismos, pellets fecales y descomposición de organismos muertos, siendo la componente microbiana de suma importancia en este proceso, debido a que estos organismos buscan alimento entre los desperdicios incluso aunque las cantidades de P se encuentren en concentraciones nanomolares (10^{-9} M) y lo convierten en biomasa. Al consumirse la materia orgánica, cambian las condiciones óxido-reducción que afectan a la solubilidad de P (McMahon & Read, 2013). El P también es utilizado por los organismos para la formación de ácidos nucleicos y forma parte de las biomoléculas energéticas básicas para el metabolismo celular (Madigan, *et al.*, 2010). Frecuentemente, el P está presente en bajas concentraciones en la superficie de los cuerpos acuáticos debido a sus propiedades biolimitantes y este rol es uno de los paradigmas más fuertes en estos ecosistemas (Lewis & Wurtsbaugh, 2008).

El fitoplancton en sistemas epicontinentales puede ser abundante aunque los nutrientes se encuentren en bajas concentraciones y tengan lugar tasas altas de hundimiento, forrajeo y mortalidad. En los sistemas eutróficos esta paradoja se vuelve más compleja debido a que la estratificación y la limitación por nutrientes en la superficie parecen favorecer más a la pérdida de fitoplancton que a su reproducción y crecimiento. Sin embargo, los florecimientos fitoplanctónicos pueden ocurrir durante períodos donde el P está en niveles bajos de concentración (Kamarainen *et al.*, 2009). Los florecimientos son eventos que se pueden predecir, pues en general, siguen patrones característicos asociados a los cambios hidrobiológicos (Yu *et al.*, 2015).

El intercambio de P entre los organismos y su entorno lo transporta por la columna de agua hasta su depósito en los sedimentos de los cuerpos acuáticos, promoviendo altos niveles de productividad primaria por décadas, incluso cuando se han removido las cargas externas completamente (McMahon & Read, 2013). Como parte del reciclamiento natural de este elemento, se encuentran los depósitos sedimentarios ricos en P, que pueden ser transportados a la superficie, donde los agentes ambientales los erosionan y son reintroducidos a los cuerpos acuáticos en formas disueltas (Figura 2).

Las especies de P que se encuentran en el agua pueden ser particuladas o disueltas. El ortofosfato (PO_4^{3-}) disuelto es la especie directamente biodisponible, pero la fuerte afinidad del P por el material particulado resulta en formas no disueltas más abundantes. El P alóctono y una porción del P disuelto son incorporados por el fitoplancton y cuando es desechado o los organismos mueren, es depositado en los sedimentos como P orgánico (Boström *et al.*, 1988).

Las formas particuladas son dominantes en la columna de agua. Cuando se depositan en el fondo, como consecuencia de la sedimentación, se forma una fuente potencial de P que se denomina la carga interna del sistema (Nürnberg, 2009). Una parte de este P secuestrado se quedará inmóvil en los sedimentos, mientras que otra parte se liberará nuevamente a la columna de agua por desorción y remineralización. Ambos procesos se favorecen bajo condiciones reductoras en el límite agua-sedimento (Wetzel, 2001).

A diferencia de otros ciclos biogeoquímicos como el del nitrógeno (N) y el carbono (C), el ciclo del P no tiene un componente atmosférico, por lo que es un ciclo que se realiza predominantemente entre fases rocosas (p. ej. fosfatos de calcio) que interactúan con el agua en los sistemas acuáticos; otra parte del ciclo es mediada por la biota y desde el último siglo, debida a la influencia humana por medio de sus desechos domésticos y productivos (Figura 3). Comparando estas fuentes, se ha establecido que las principales formas de ingreso de P a los sistemas acuáticos son la agricultura y la acuicultura, con el uso de fertilizantes, obtenidos de la minería (Elser & Bennett, 2011) y las descargas de agua residuales (Wyant *et al.*, 2013) las cuales se han incrementado en las últimas décadas debido al crecimiento demográfico y la urbanización.

Generalmente, las regulaciones de calidad del agua y tratamiento de aguas residuales están enfocadas a este elemento, aunque la vida en ecosistemas ricos en P es una paradoja porque el P es al mismo tiempo abundante pero no se encuentra en formas biodisponibles (McMahon & Read, 2013; Waters & Webster-Brown, 2016).

Dentro del paradigma del P, se ha establecido que la carga - la cantidad de P que hay en cierto volumen de agua en la unidad de tiempo- determina el estado trófico de los sistemas epicontinentales donde los sistemas eutróficos son aquellos que reportan altas cargas externas e internas. Entre los efectos más consistentes de la eutrofización se encuentran un cambio en la composición de especies de algas y un aumento en la frecuencia e intensidad de los afloramientos

fitoplanctónicos, los cuales en lagos eutrofizados pueden favorecer la reproducción de cianobacterias tóxicas (Downing *et al.*, 2001; Merino-Ibarra *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2015).

Otros efectos son el decrecimiento de biodiversidad, vulnerabilidad a la invasión de especies y altas tasas de mortandad de peces, macroinvertebrados y macrófitas.

En el estudio de la eutrofización, los otros factores como la limitación de la luz, cambios hidrológicos y de uso de suelo, así como las interacciones ecológicas con los ecosistemas terrestres, influyen en la proporción de cargas de P hacia los cuerpos acuáticos. La eutrofización se considera como la principal amenaza a los sistemas acuáticos epicontinentales en las últimas décadas (Istvánovics, 2010), ya que muchos estos sistemas son importantes para el abastecimiento de agua, la pesquería y la recreación.

En países de clima cálido con temporadas de secas prolongadas, como México, la eutrofización está aumentando con rapidez (Alcocer, 2007). Esto implica que se alteren los ciclos biogeoquímicos en el espacio y el tiempo. Una propuesta para observar estos cambios es por medio del seguimiento de los flujos elementales usando como herramientas a los balances de masa y agua (Smith, *et al.*, 2006).

1.1 Antecedentes

El presente trabajo forma parte de un proyecto del Laboratorio de Biogeoquímica Acuática del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, enfocado al estudio a largo plazo de la biogeoquímica de Valle de Bravo, que ha generado diversas publicaciones y tesis. Para este trabajo, se realizó una integración de los periodos de estudio anteriores (Quintanilla-Terminel, 2012; Ramírez-Zierold, 2010) para las variables hidrológicas y los procesos del P. Lewis, (1996) resaltó la gran cantidad de estudios descriptivos en zonas tropicales y señaló la carencia de análisis. A partir de este punto de vista, se decidió implementar la integración de los análisis e interpretaciones de los resultados con los datos obtenidos en estos tres periodos de estudio, que comprenden los años 2002-2010.

1.2 Zona de estudio

Por su importancia en el abastecimiento a la Zona Metropolitana, el estudio biogeoquímico de P en Valle de Bravo es un buen caso de estudio para evaluar las fluctuaciones de las variables climáticas y físico-químicas en el tiempo y sus efectos en la calidad del agua que se consume en la ciudad (Ramírez-Zierold, 2010).

1.2.1 Sistema Cutzamala.

El desarrollo de la infraestructura para el abastecimiento de agua en una megalópolis como la Ciudad de México y su área Metropolitana es importante tanto para los proveedores del servicio como para mantener la viabilidad de a una población creciente de 20 millones de personas (Castelán, 2001).

El Sistema Cutzamala se compone de obras hidráulicas instaladas en 14 municipios de los estados de Michoacán y México. Se construyó para disminuir la extracción de agua subterránea en el Valle de Lerma y la Ciudad de México, siguiendo las tendencias de crecimiento poblacional de finales de los 70s (Castelán, 2001). Este sistema inicia en la presa Tuxpan, localizada en el estado de Michoacán. El agua recorre varios vasos reguladores hasta llegar a la presa Colorines, donde una porción de líquido se potabiliza y otra ingresa a la presa Valle de Bravo (Patronato Pro Valle de Bravo AC, 2014). Debido a los cambios de altitud, se requieren seis plantas de bombeo para realizar el recorrido de 127 km, consumiéndose diariamente $2,280 \times 10^6$ kW/h, aproximadamente el equivalente al consumo energético por día en la ciudad de Puebla (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), 2014). De la cantidad de agua que se suministra a la Ciudad de México, 20% proviene del Sistema Cutzamala (Figura 4).



Figura 4. Esquema del Sistema Cutzamala (SC). Se muestran las rutas de transporte de agua a la Ciudad de México. Tomado de <http://www.agua.org.mx/cono/multimedia/mapas/1131-mapas/11433-croquis-del-sistema-cutzamala>

1.2.2 Presa Valle de Bravo.

Valle de Bravo (VB) es un reservorio tropical ($19^{\circ}21'30''$ N, $100^{\circ} 11' 00''$ W), ubicado a 1830 m de altitud en el Estado de México. Es el embalse principal del Sistema Cutzamala, y provee por encima de una tercera parte del suministro de agua del Sistema Cutzamala a la Ciudad de México. El área superficial de Valle de Bravo es de 18.55 km^2 (Monroy-Ríos, 2004), tiene profundidad media de 21.1 m. Su capacidad de almacenamiento está calculada en $391 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Merino-Ibarra *et al.*, 2008). El clima es subhúmedo, cálido a templado con sequías pronunciadas entre noviembre y mayo, las lluvias se presentan durante el periodo junio-octubre. La precipitación media es de 836 mm/año y la evaporación media de 1620 mm/año.

VB recibe los escurrimientos de una cuenca de 546.9 km² (Olvera-Viascán *et al.*, 1998) a través del río Amanalco, tres pequeños tributarios (Molino, González, Carrizal) y las descargas del drenaje del pueblo de VB, incluyendo al Tizates que originalmente era un río (Figura 5).

A veces se inyecta al interior de VB agua proveniente de las presas al oeste del Sistema Cutzamala (Figura 4), ingreso al que denominaremos inyección. Estos ingresos y la extracción de agua de VB ocurren a una profundidad de 20-28m, a través de la torre de extracción cercana a la cortina de la presa.

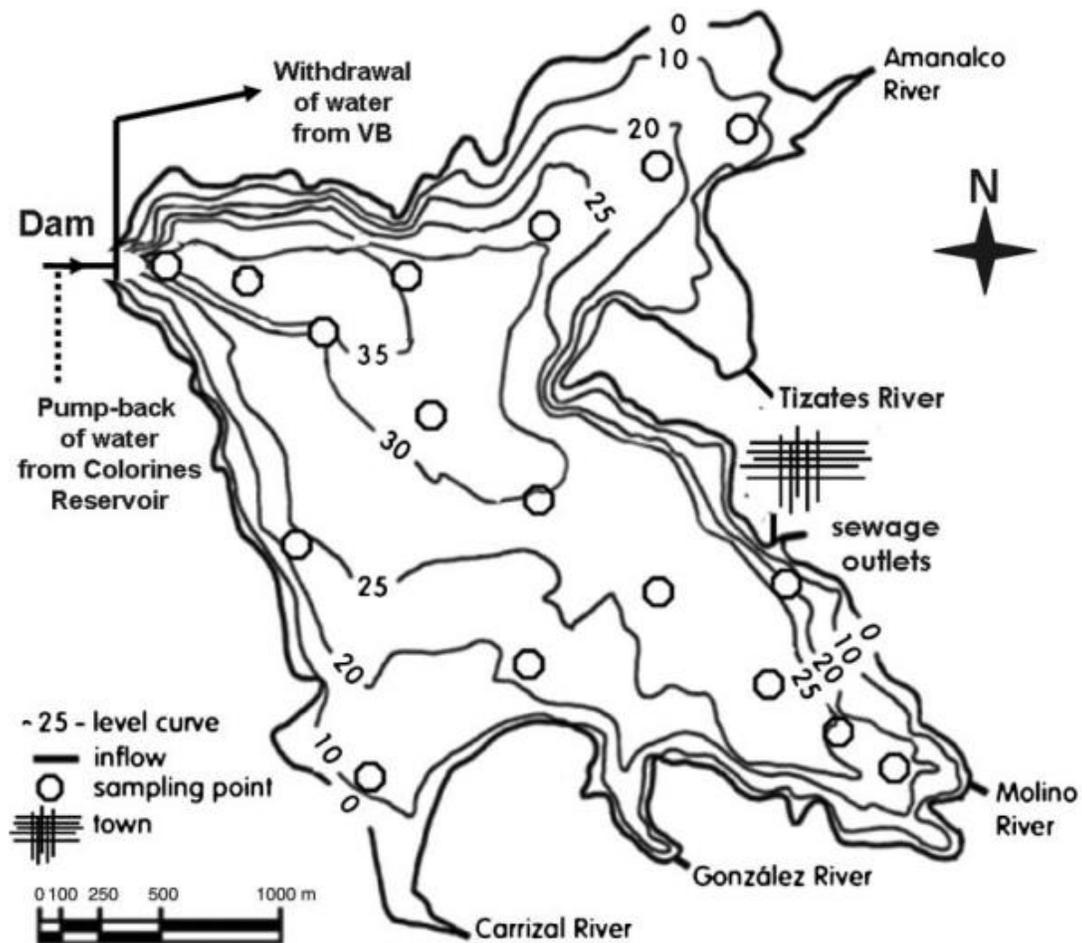


Figura 5. Batimetría del embalse Valle de Bravo. Las flechas negras indican la distribución del viento sobre los ejes principales. Se señalan los puntos de muestreo de 2002-2005, así como el punto de extracción e inyección. Líneas de contorno (en metros) por debajo del máximo nivel del embalse. Tomado de Ramírez-Zierold *et al.* (2010)

VB es un cuerpo monomítico cálido (Merino-Ibarra *et al.*, 2008; Monroy-Ríos, 2004; Ramírez-Zierold *et al.*, 2010). El embalse presenta una estratificación estable de abril a octubre, y circulación vertical de noviembre a febrero. Sin embargo, en 2001 se encontró un incremento progresivo de la temperatura hipolimnética durante la etapa de estratificación (Ramírez-Zierold *et al.*, 2015), que

puede ser atribuido a eventos de mezcla debidos a fuertes brisas (velocidad media 7.4 m/s) que soplan diariamente (12:00- 19:00 h) a través de los dos brazos principales del embalse (Figura 5), produciéndose un aumento en la productividad por los desplazamientos verticales de la termoclina (Merino-Ibarra, et al., 2008).

El almacenamiento de la presa se mantuvo en su máxima capacidad entre 2002 y 2005, debido a las condiciones climatológicas regulares y las políticas de gestión. A partir de la alta extracción de agua y la baja precipitación de 2005, el nivel del sistema fue disminuyendo, haciéndose ineficiente la recuperación por medio de la inyección de agua y la precipitación. Esta condición continuó hasta 2009, alcanzándose el pico más bajo de todos los periodos de estudio y de años anteriores. Después de un cambio en la gestión de la presa, regresó el nivel a su máximo en 2010.

1.2.3 Calidad del agua.

La calidad del agua en VB es afectada principalmente por la eutrofización. Olvera-Viascán *et al.* (1998) en una primera evaluación de la evolución trófica de VB, concluyó que entre 1980 y 1987 el embalse era mesotrófico, y hacia 1993 ya presentaba condiciones de eutrofia.

En 2001, durante el periodo de mezcla, el embalse presentaba un hipolimnion completamente anóxico y grupos de cianobacterias de los géneros *Microcystis*, *Anabaena* y *Aphanizomenon*, sobre todo cuando el cuerpo estaba estratificado (Nandini, et al., 2008). Durante el periodo de mezcla, el embalse presentaba una columna sub-saturada en oxígeno (<60%) (Merino-Ibarra, et al., 2008).

El proceso de eutrofización en VB es resultado tanto de las descargas directas de los drenajes como de los desechos de la actividad agrícola en la cuenca del río Amanalco. Olvera-Viascán *et al.*, 1998 estimaron que a finales de los 80s las descargas de drenaje contribuyeron con 34% (16 T P/año) y el río Amanalco con cerca del 57% de la carga externa total de P al embalse. En ese estudio, se menciona que la cuenca del río Amanalco (el mayor aporte externo al embalse) aportó 24.1 T P/ año durante los años 1992-1993. En el estudio realizado de 2002 a 2005 (Ramírez-Zierold, 2010) el aporte de este río aumentó a 66.5 T/año y en el periodo siguiente (mediados de 2005-2007) (Quintanilla-Terminel, 2012) disminuyó a 41.8 T/año.

Debido a la frecuencia y abundancia de descargas de nutrientes el sistema cambió de oligotrófico a eutrófico en una corta escala de tiempo, la cual se ha evaluado para entender los mecanismos de la eutrofización en este tipo de reservorios.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el balance de agua y fósforo durante 2008-2010 y compararlo con el registro continuo realizado desde 2002 en la presa de Valle de Bravo.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Establecer el balance de agua y de P en la presa para comprender y analizar las variaciones de este nutriente en el sistema a escala anual y mensual durante el periodo 2008-2010.
- Evaluar la magnitud relativa de los principales procesos biogeoquímicos que controlan la disponibilidad de P en el embalse durante el periodo 2008-2010.
- Integrar los resultados obtenidos para el periodo 2008-2010 en el lapso 2002-2010.
- Utilizar la información obtenida para valorar el impacto humano sobre el proceso de eutrofización y la carga interna de P en el embalse en los lapsos 2008-2010 y en 2002-2010.

2. Adquisición y procesamiento de datos.

En este capítulo se describen los métodos utilizados para el registro continuo de largo plazo en este y los estudios anteriores para la presa de VB. El capítulo cubre tres rubros principales: la logística y frecuencia de los muestreos, los métodos analíticos empleados para el análisis de P y finalmente, se explica lo referente a la revisión, análisis y presentación de los datos de manera gráfica.

2.1 Logística de muestreo.

El laboratorio de Biogeoquímica Acuática recolectó datos mensuales de Valle de Bravo desde 2001 (Quintanilla-Terminel, 2012; Ramírez–Zierold *et al.*, 2015). Se realizó el registro *in situ* de variables fisicoquímicas y se obtuvieron muestras de agua del embalse, de la presa Colorines y de los afluentes: ríos (Amanalco, Molino, González y Carrizal) y descargas residuales (Tizates y Embarcaderos), cubriendo las principales fuentes de agua y nutrientes hacia el embalse (Figura 5).

2.1.1 Muestreo de los afluentes.

En los afluentes que descargan al embalse, se calculó el caudal haciendo transectos a lo ancho y a cierta profundidad para obtener un área conocida (sección transversal). Se midió la velocidad de un cuerpo de deriva que recorrió cierta distancia. Este procedimiento se repitió varias veces y se obtuvo un promedio de la velocidad de la corriente, obteniéndose un flujo promedio al multiplicarse por la sección transversal [m^3s^{-1}].

2.1.2 Muestreo en la presa.

Desde 2006, los muestreos de la presa se llevaron a cabo en una estación ubicada en su zona central. La estación se considera representativa de las condiciones generales del embalse debido a la homogeneidad horizontal que se ha documentado previamente con una amplia red de estaciones (Merino-Ibarra *et al.*, 2008).

Se obtuvieron registros dos veces a lo largo del día (antes y después del inicio de la brisa local). Las variables a medir fueron: temperatura, oxígeno disuelto, conductividad específica, pH y Eh. Para esto, se utilizó una sonda multiparamétrica de la marca YSI (Yellow Spring Instruments). La resolución de muestreo se realizó a cada metro, abarcando desde la superficie hasta el fondo de la

columna de agua. También se utilizó el disco de Secchi para medir la profundidad que alcanza la luz en la columna de agua, para caracterizar la transparencia.

Con una botella tipo Niskin (marca Uwitec) se toma una muestra del agua superficial y de distintas profundidades, a lo largo de toda la columna de agua: superficie, 1, 2, 4, 8, 12, 16 m y así hasta subsecuentemente llegar al fondo, dependiendo de la profundidad que tenga la presa en ese mes. De cada muestra se recolecta agua sin filtrar para la determinación simultánea de fósforo total y nitrógeno total. Para el análisis de estas muestras, se oxida la materia orgánica que poseen a alta presión y temperatura en presencia de peroxodisulfato de potasio como lo indica Valderrama (1981). La concentración de fósforo total se determina por espectrofotometría como fósforo reactivo soluble de acuerdo con las técnicas establecidas para cada caso, con ligeras modificaciones, para su realización en un auto-analizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus (Kirkwood, 1994).

Todas las muestras son almacenadas en botellas de polietileno de 30mL y se refrigeran para su posterior análisis en el laboratorio.

2.2 Determinaciones analíticas de fósforo.

Para la cuantificación de nutrientes se usa el autoanalizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus System de cinco canales (Figura 6). Este instrumento mide simultáneamente NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SiO_4^- solubles siguiendo el protocolo de (Kirkwood, 1994). El analizador se compone de cinco partes: un automuestreador, una bomba peristáltica, un módulo analítico, un espectrofotómetro y un programa para el manejo de datos.

Las muestras se diluyen con agua desionizada y se colocan en tubos de ensayo. Se pasan a la estación de dilución, donde una pipeta tomará cierto volumen de muestra para repartirlo en los cinco canales por tuberías de vidrio. Después el aparato añade distintos reactivos para obtener un volumen colorido que se va a analizar. Posteriormente, la mezcla de reacción circula a través de espirales de vidrio donde se completa la reacción, resultando en la firma espectral que mide el espectrofotómetro.

El espectrofotómetro emite una luz monocromática con longitud de onda constante que pasa por el canal de vidrio donde fluye la mezcla de reacción. Los datos de absorbancia se almacenan en una

base de datos. Entre una muestra y otra, pasa el líquido de lavado que permite al análisis continuo de las muestras. En este proceso, hay una segmentación por burbujas de aire que asegura que no se mezclen las muestras.

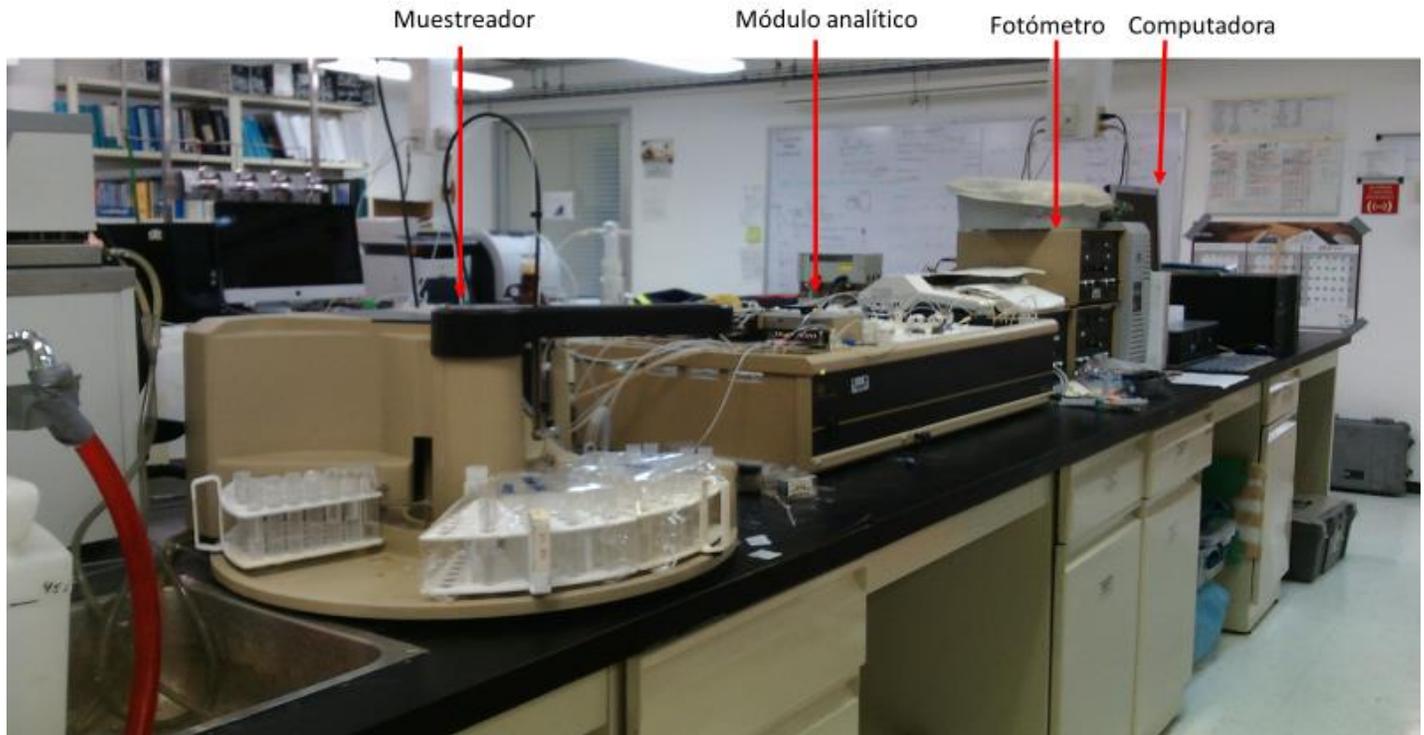


Figura 6 Autoanalizador de flujo segmentado Skalar modelo San Plus system. Fotografía de la autora. Mayo 2017

2.2.1 Mediciones de fósforo total.

El procedimiento para medir el fósforo total es el propuesto por Valderrama (1981). Consiste en la oxidación de compuestos nitrogenados y fosfatados en el agua en la misma muestra. Los compuestos fosfatados necesitan oxidarse en medio ácido al contrario de los compuestos nitrogenados que necesitan un medio básico.

Se utiliza un reactivo oxidante compuesto de 50g de peroxodisulfato de potasio y 30g de ácido bórico disueltos en 350ml de hidróxido de sodio a 1M, aforado a 1L con agua desionizada. El reactivo oxidante es almacenado en botellas ámbar a temperatura ambiente y protegidas de la luz directa.

Se añaden 3ml de reactivo oxidante con un dosificador en las botellas de muestra. Las botellas son amarradas en una liga en grupos de 7 muestras y se oxidan en una autoclave a 120°C por 30 minutos; y se dejan enfriar a temperatura ambiente.

Cuando las concentraciones de fosfatos son altas, el volumen se ajusta a 10 ml con agua desionizada para asegurar una medida confiable (Quintanilla-Terminel, 2012). Para muestras del embalse la dilución es 1 a 10, los afluentes 1 a 20 y los drenajes 1 a 50.

Es conveniente mencionar que la sustentante de esta tesis, en el año 2015, cursó la asignatura de Taller de Investigación en Biogeoquímica Acuática y realizó el servicio social en el mismo laboratorio, adquiriendo conocimientos y desarrollando las habilidades y destrezas necesarias para llevar a cabo la recolección y el análisis de las muestras.

2.3 Procesamiento de datos

Para la interpretación de los datos hidrológicos generados en los muestreos se revisaron los datos de 2008-2010 en el contexto de los estudios anteriores (Quintanilla-Terminel, 2012; Ramírez-Zierold, 2010). A partir de esta observación, se hizo una corrección en los cálculos y estimaciones propuestas. Después, se hicieron gráficas para corroborar la mejora de los datos y con esto la calidad interpretativa de las gráficas.

2.3.1 Balance de agua

Este cálculo se llevó a cabo por cada muestreo, tomando en cuenta el periodo que hay entre uno y otro. Se utilizan registros diarios del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (OCAVAM) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El cálculo permitió obtener una visión anual de los flujos de entrada y salida del embalse, e integrar sus resultados a escalas mayores (interanual o entre periodos de estudio).

La ecuación usada para calcular el balance de agua, como se propuso en Ramírez-Zierold (2010) es:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = R_i + P_i - W - (E - P) * A$$

El cambio del volumen en el tiempo [$\text{m}^3/\text{día}$] es el resultado del balance determinado entre las entradas (signo positivo) y las salidas (signo negativo) del sistema. Se compone por la suma de las contribuciones de ríos y aguas residuales medidas en campo (R_i), la entrada por bombeo (P_i), la tasa de extracción (W), el acumulado de evaporación y precipitación ($(E-P)$) normalizado por el área

media (A) del embalse entre dos muestreos. El área está expresada en $[m^2]$, el resto de las variables se miden en $[m^3/día]$. En esta proporción de entradas y salidas, se obtiene si el sistema es un sumidero, cuando la cantidad obtenida es positiva, o el agua sale del sistema, en caso de que la cantidad obtenida sea negativa.

Para este cálculo se propuso que el sistema fuera cerrado, asegurando que se conocen las principales fuentes que aportan agua al sistema, así como las fuentes de salida. Para que se cumpliera esta condición, se aplicaron una serie de iteraciones a la proporción de caudal de cada afluente, distribuyendo el flujo residual remanente de la primera estimación de los ríos y drenajes. Esto compensa la frecuencia mensual del cálculo de caudal, obteniéndose una aproximación diaria (Barjau-Aguilar, 2017).

La realización del balance de agua es el cimiento principal para llevar a cabo el balance de masa, ya que la ganancia o pérdida de masa en el tiempo está relacionada directamente con el volumen de agua de cada fuente.

2.2.2 Balance de masa de fósforo

Tomando en consideración las principales entradas y salidas de agua en el sistema, el balance de masa se apoya en estas estimaciones para calcular los flujos de P en la presa. Para obtener este resultado, se multiplica el caudal de los afluentes $[m^3/s]$ por las concentraciones de P $[\mu M]$ en cada afluente, para cada fecha de muestreo y luego se integra para cada periodo entre muestreos. De igual manera, se calcula así el aporte debido a la inyección de agua por la cortina.

La salida de P del embalse, se calcula multiplicando el volumen promedio de extracción de agua de cada periodo entre muestreos por las concentraciones de P entre 20 y 28 m de profundidad (dependiendo del nivel) ya que las operaciones de extracción e inyección de agua se realizan a esa profundidad.

Por otro lado, en el embalse se calcula la diferencia de masa de P entre muestreos multiplicando las concentraciones medidas en cada profundidad por el volumen que hay entre dos profundidades, y se integran para obtener la masa de fósforo en toda la columna de agua entre cada fecha de muestreo (Monroy-Ríos, 2004).

Este resultado se comparó con las proporciones de entradas y salidas de P en el embalse, para obtener la ganancia o pérdida neta de este nutriente en el sistema, por medio de:

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \sum E - S \pm PIN(P)$$

Donde $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ es el cambio de masa total de P en el embalse, $\sum E$ es la entrada de este nutriente por medio de los ríos y drenajes, así como de la presa Colorines, y S es la salida de P durante la extracción de agua. Por último, el término PIN(P) representa a los flujos de P debidos a los Procesos Internos Netos que suceden en el embalse para igualar la variación de masa observada en la columna de agua del embalse entre fechas de muestreo.

3. Resultados y discusión

En esta sección se describen y discuten los resultados de los balances de agua y P desde 2002 a 2010 en la presa de Valle de Bravo, lo que seguirá contribuyendo a plantear un manejo más eficiente del sistema.

En estos resultados, se observó que muestran variabilidad en el tiempo, identificándose tres escalas a analizar:

1. Todos los periodos de estudio (2002-2010)
2. Anual (diferencia entre años)
3. Estacional

El objetivo de este análisis, es establecer el efecto de los cambios antropogénicos en el sistema a lo largo del tiempo e identificar la frecuencia de los eventos extraordinarios en el periodo 2008-2010, así como analizar su contexto con los años anteriores. Debido a que las variaciones hidrológicas y el manejo del agua en el embalse influyen en la variación de entradas y salidas del P, primero se detallarán los resultados del balance de agua, empezando por presentar los aspectos a considerar en este balance.

Variaciones del nivel de agua en la presa.

Las variaciones de nivel son resultado de los cambios de volumen a lo largo del año. Se observa en la figura 7 que el nivel se mantuvo alto en el periodo 2002-2005, con una oscilación pequeña entre 1825-1829 m, alcanzándose el máximo (1830 m) algunas veces, coincidiendo con la temporada de lluvias. El patrón común fue que las disminuciones se presentaron durante el invierno de cada año.

En el periodo 2005-2007, a partir de la disminución correspondiente al año 2005 y la temporada de secas de 2006, comenzaron a presentarse disminuciones importantes del nivel indicando una anomalía en alguno de los flujos del embalse. Esta tendencia continuó hasta mediados de 2009, que es el mínimo histórico más importante registrado en estos 9 años.

En el último periodo de estudio, 2008-2010, se presentaron dos años en los que el nivel disminuyó rápidamente. Sin embargo, empezando la segunda mitad de 2009, volvió a subir el nivel hasta recuperarse a finales del 2010, alcanzando condiciones similares al periodo 2002-2005 (Figura 8).

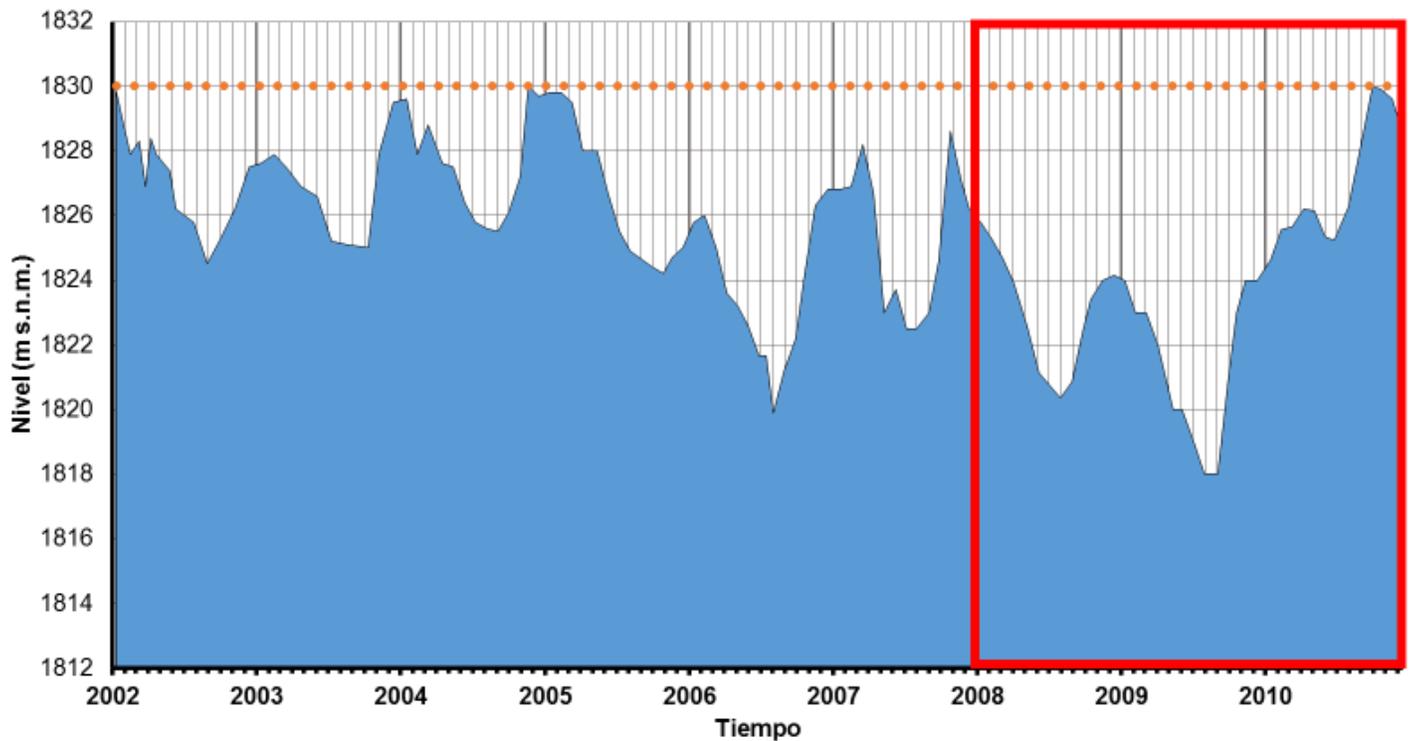


Figura 7 Cambio de nivel mensual durante el período 2002-2010 en el embalse de Valle de Bravo (en m s.n.m.). La línea punteada (naranja) indica el nivel máximo de la presa. El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

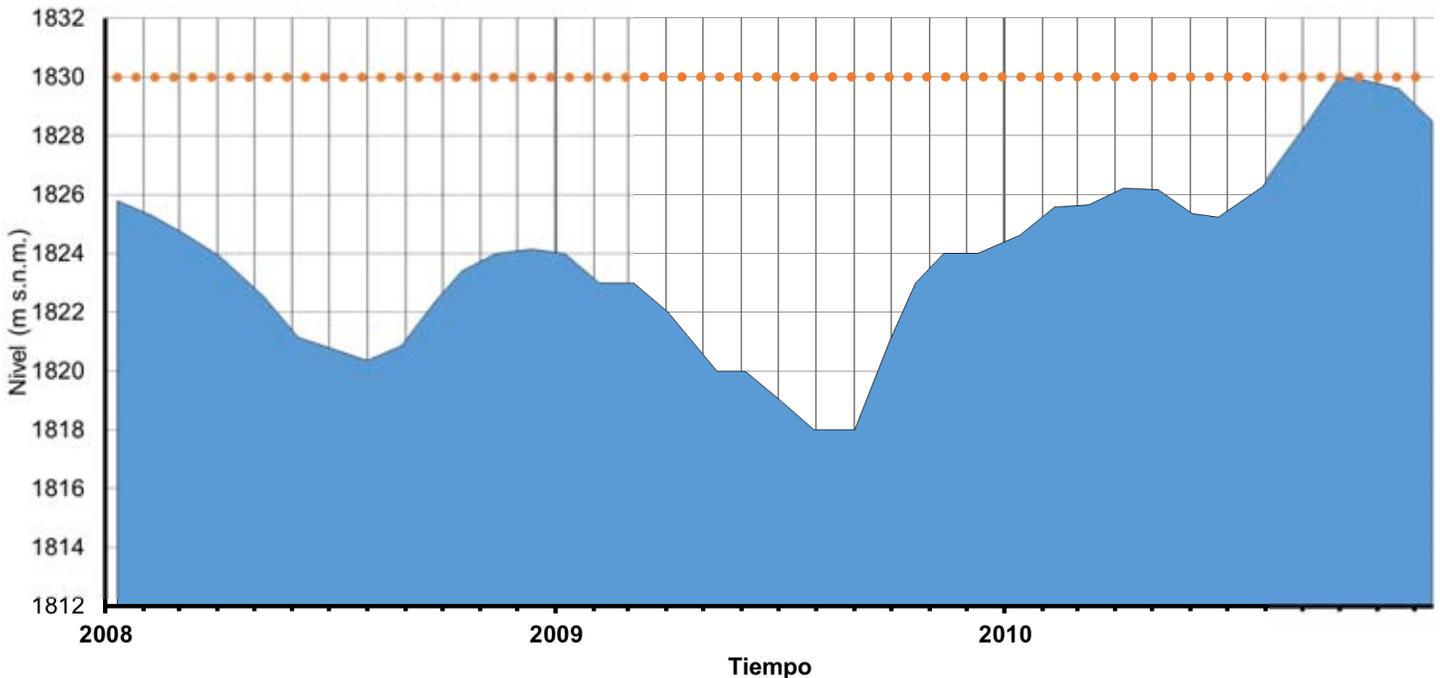


Figura 8 Cambio de nivel mensual durante el período 2008-2010 en el embalse de Valle de Bravo (en m s.n.m.). La línea punteada naranja indica el nivel máximo de la presa.

Para entender el comportamiento del cambio de nivel en las diferentes escalas temporales propuestas, se deben analizar las componentes que lo modifican. En primera instancia, se observa que responden a los patrones observados de lluvias (julio-octubre) y secas (noviembre-junio). Basándose en esta primera aproximación, se distinguieron los cambios de volumen en el sistema, que se describirán a continuación.

Variaciones del volumen.

Las observaciones del cambio del nivel implican que el volumen de la presa se modificó, respondiendo también a las condiciones estacionales. En los primeros meses de cada año (enero-marzo), se alcanzó el mayor volumen en respuesta a la época de lluvias del año anterior, los afluentes y las operaciones de inyección de agua. Debido a las operaciones de extracción, el volumen disminuyó hasta la siguiente temporada de lluvias (Figura 9). El volumen máximo en todos los periodos de estudio se observó en $395.4 \times 10^6 \text{ m}^3$, equivalente a $\sim 1830 \text{ m}$, y sucedió en enero de 2002, noviembre de 2003 y 2004. En el año 2005, el volumen comenzó a disminuir, sin recuperarse la cantidad de agua perdida en la temporada de lluvias, como lo hicieron los años anteriores. Al igual que el nivel, el volumen disminuyó hasta alcanzarse el mínimo histórico de 2009, y días después, se observa que el patrón estacional de lluvias se intensificó, acumulándose una mayor cantidad de volumen en septiembre del 2010 ($394.7 \times 10^6 \text{ m}^3$), bastante cercano al máximo histórico.

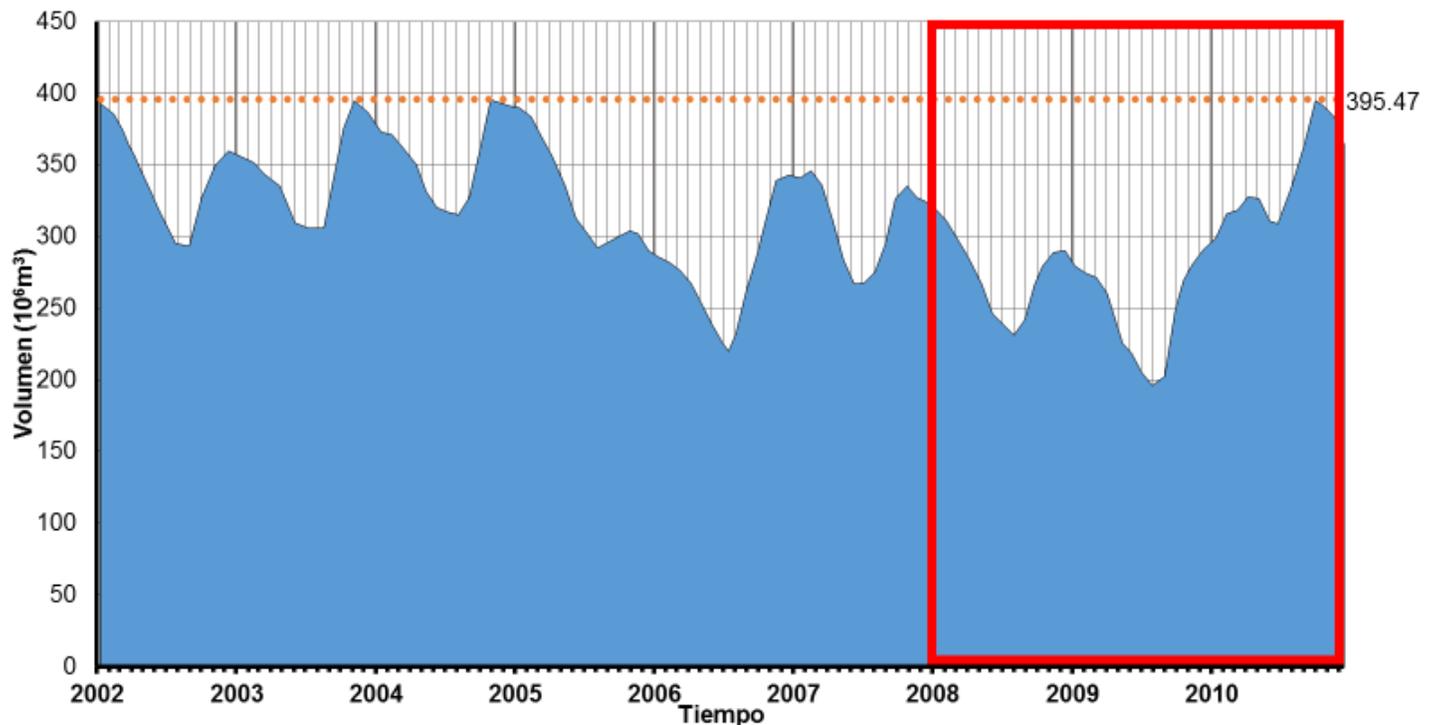


Figura 9 Fluctuaciones del volumen mensual durante el periodo 2002-2010 en el embalse de Valle de Bravo (en m^3). La línea naranja (punteada) marca el volumen máximo de la presa. El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

El volumen promedio de agua en el embalse de VB durante 2008-2010 fue $288.8 \times 10^6 m^3$, equivalente al 73% del almacenamiento total de la presa. A diferencia de otros años, en el 2008 el volumen disminuyó progresivamente durante la temporada de secas hasta alcanzar un valor mínimo de $231 \times 10^6 m^3$ (58% del almacenamiento total), del cual no hubo una recuperación aceptable (alrededor del 80% del almacenamiento total), como se había gestionado anteriormente. En el siguiente año, el conjunto de factores como el aumento en la evaporación, y las condiciones poco favorables para una recuperación del volumen, pudieron ser las causas de un volumen más bajo que en el año 2008: $202.3 \times 10^6 m^3$ (51% del almacenamiento total) en la transición de la temporada seca a la de lluvias. Sin embargo, el aumento de volumen que se observa a partir de este valor, indica un cambio en las componentes que influyen en el volumen. Como consecuencia, el año 2010 presentó una tendencia creciente hasta alcanzar su máximo volumen en septiembre con $394.9 \times 10^6 m^3$, acercándose nuevamente a la capacidad de almacenamiento después de 5 años en los que no se había logrado (figura 10). Esta recuperación del volumen se debió al crecimiento de las entradas: lluvia y los afluentes, junto con el alto volumen de inyección que ingresó en diferentes ocasiones. Es evidente que se reflejan estos comportamientos en las fluctuaciones mensuales del volumen y del

nivel sobre todo en este año, aumentando el volumen 16% de la capacidad máxima de almacenamiento con respecto al volumen registrado durante el año 2008 ($277 \times 10^6 \text{ m}^3$).

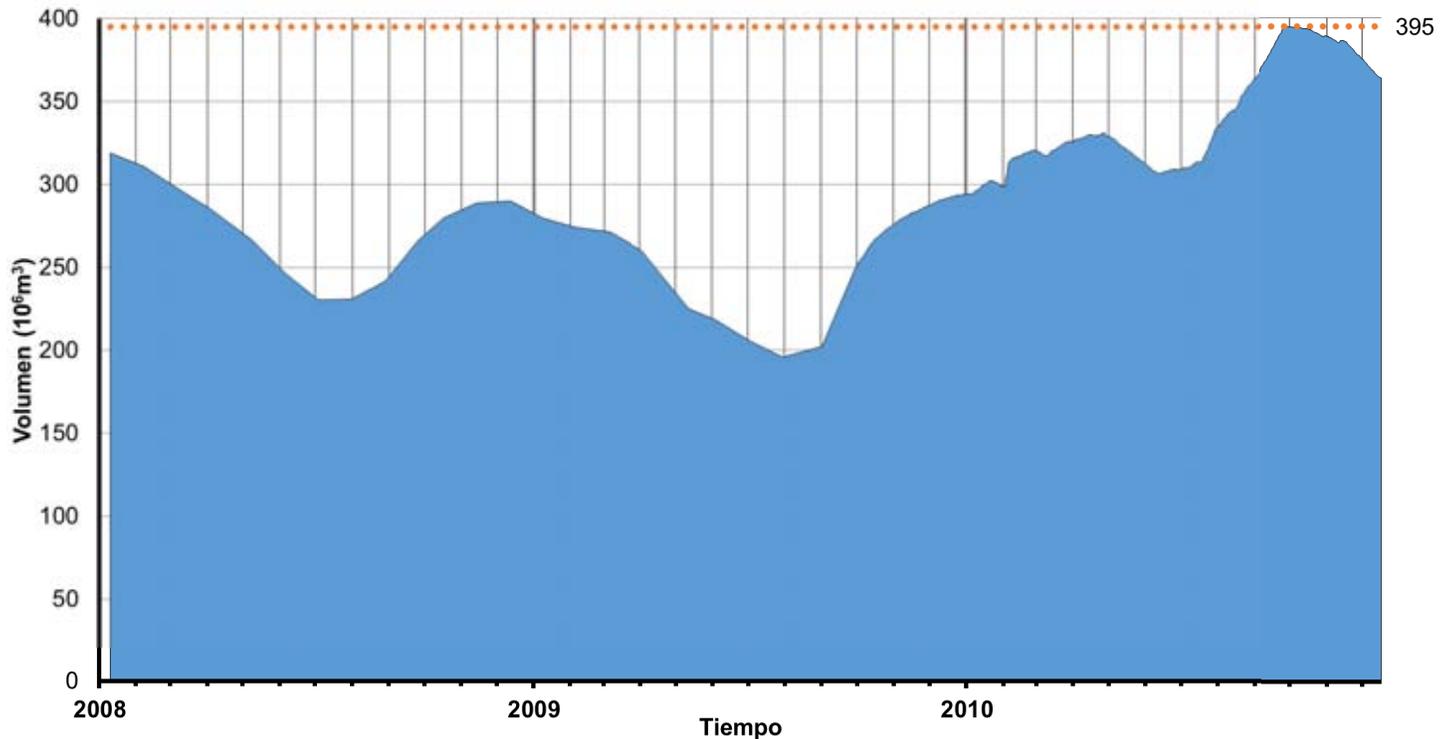


Figura 10 Fluctuaciones del volumen mensual durante el periodo 2008-2010 en el embalse de Valle de Bravo (en m^3). La línea punteada naranja marca el volumen máximo de la presa en este intervalo de tiempo.

Los aspectos hidrológicos que influyen en los comportamientos observados en las gráficas anteriores, son las entradas y salidas del sistema, las cuales influyen en las diferentes escalas propuestas para este estudio y se discutirán en las siguientes secciones.

Lluvia y evaporación.

El factor que, podría suponerse, sugiere una influencia mayor en el comportamiento del sistema es el intercambio de agua entre el sistema y la atmósfera por precipitación y evaporación. Sin embargo, como se observa en la tabla 1, representa sólo entre 4-5% de la capacidad máxima de almacenamiento de la presa.

Tabla 1. Aporte anual de lluvia durante el período 2002-2010 al embalse de Valle de Bravo (en m³). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican el promedio de precipitación obtenido en el embalse. La proporción con respecto al volumen máximo (%) se representa en cursivas.

	<i>Volumen (10⁶m³)</i>	<i>Promedio (10⁶m³/año)</i>	<i>%Volumen máximo (395.4x10⁶ m³)</i>
2002	14.7		
2003	14.6	14.1	4%
2004	15.4		
2005	11.8		
2006	16.4	16.3	4%
2007	16.3		
2008	16.5		
2009	16.0	18.6	5%
2010	23.3		

En la siguiente figura (11), se ilustra la proporción de lluvia y evaporación por año. Como se puede ver, el volumen de aporte por esta fuente se mantiene entre 14.7-16.5 x10⁶m³/año. El año con el volumen menor de lluvia fue el año 2005 con 11.8x10⁶m³, representando 3% de la capacidad máxima de almacenamiento, mientras que el año con mayor precipitación fue el 2010, con 23.3x10⁶m³, equivalente al 6% de la capacidad máxima, que se debió a dos eventos extraordinarios, en febrero y septiembre. Es importante mencionar que la intensidad de estos eventos de precipitación extemporánea de invierno no se había presentado en otros estudios.

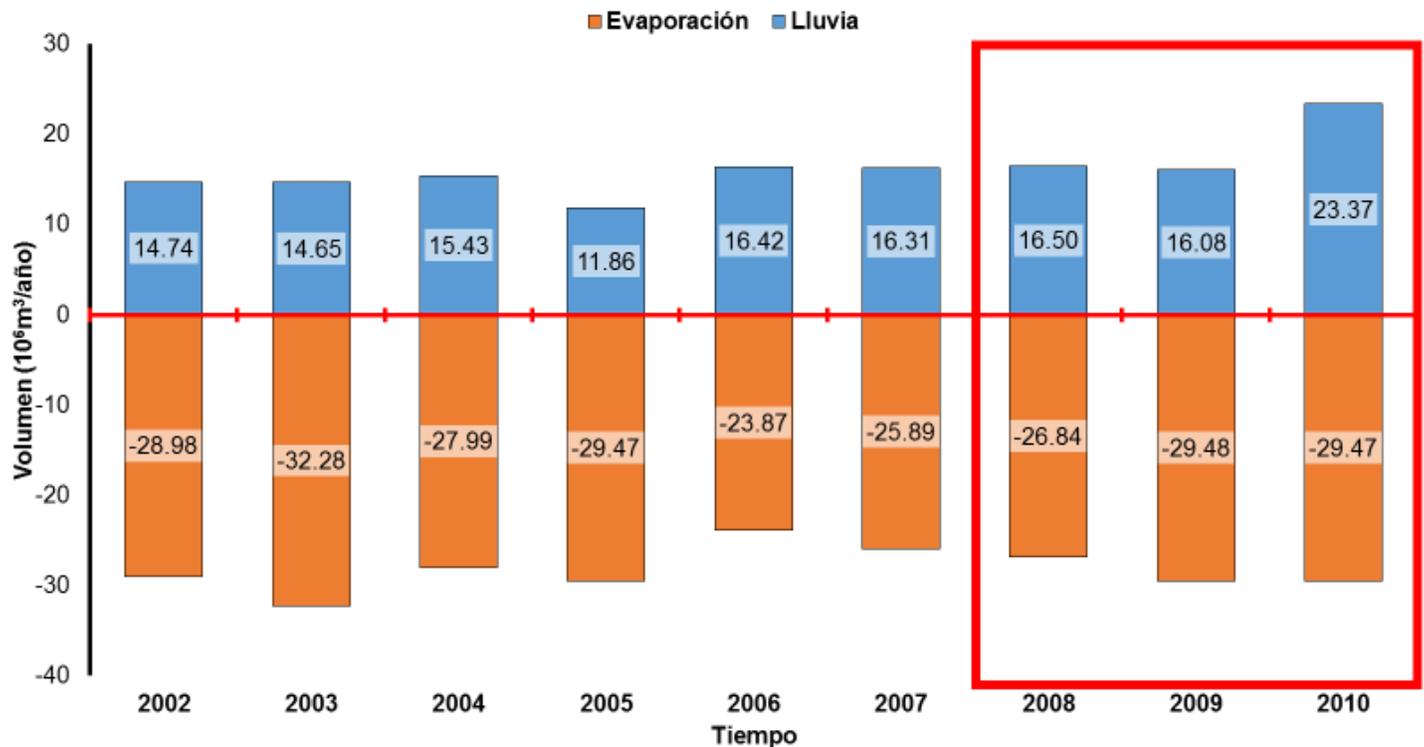


Figura 11 Lluvia (azul) y Evaporación (naranja) anual en Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m³/año). Los números indican el volumen promedio alcanzado por año. El recuadro separa el periodo de estudio 2008-2010.

La evaporación fue mayor que la precipitación en VB. El año que presentó mayor evaporación fue 2003 (-32.2 x10⁶m³). Los siguientes años en intensidad fueron 2005, 2009 y 2010, los cuales tuvieron la misma evaporación (-29.4 x10⁶m³) (Tabla 2).

A nivel de periodos, este término del balance de agua, se mantuvo entre 6 y 7% de la máxima capacidad de almacenamiento de la presa. Los cambios de precipitación y evaporación hacia condiciones más húmedas (mayor precipitación que evaporación) o secas (mayor evaporación que precipitación), producen cambios en otros aspectos hidrológicos como los afluentes, que se discutirán en la siguiente sección.

Tabla 2. Evaporación anual del embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m^3). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2004 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican el promedio de evaporación obtenido en el embalse. La proporción con respecto al volumen máximo (%) se representa en cursivas.

	<i>Volumen</i> ($10^6 m^3$)	<i>Promedio</i> ($10^6 m^3/año$)	<i>%Volumen máximo</i> ($395.4 \times 10^6 m^3$)
2002	-28.9		
2003	-32.2	-29.6	<i>-7%</i>
2004	-27.9		
2005	-29.4		
2006	-23.8	-24.8	<i>-6%</i>
2007	-25.8		
2008	-26.8		
2009	-29.4	-28.6	<i>-7%</i>
2010	-29.4		

Con el fin de exponer las bases para explicar los resultados inusuales del periodo 2008-2010, en la siguiente figura (12) se muestran los valores diarios de precipitación y evaporación. Para la precipitación, se observa que, la distribución fue diferente para cada año, pero la mayor cantidad de volumen se concentró en los meses de julio a octubre (temporada de lluvias). Durante los dos primeros años de este periodo, se mantuvo casi constante ($\sim 16 \times 10^6 m^3$), aumentando en 2010 a un valor de $23.3 \times 10^6 m^3$, equivalente al 6% de la capacidad máxima de almacenamiento, igualando, por ejemplo, el volumen de evaporación de 2005-2007. En cambio, la evaporación en este periodo aumentó en los meses de noviembre a junio (temporada de secas), alcanzando su máximo volumen entre febrero y junio. Al contrario de la precipitación, los años 2009 y 2010 ($29.4 \times 10^6 m^3$) tuvieron una evaporación más intensa que 2008. Dentro de estos tres años, el último se caracterizó por tener las condiciones más extremas, además de los eventos extraordinarios que ya se habían mencionado.

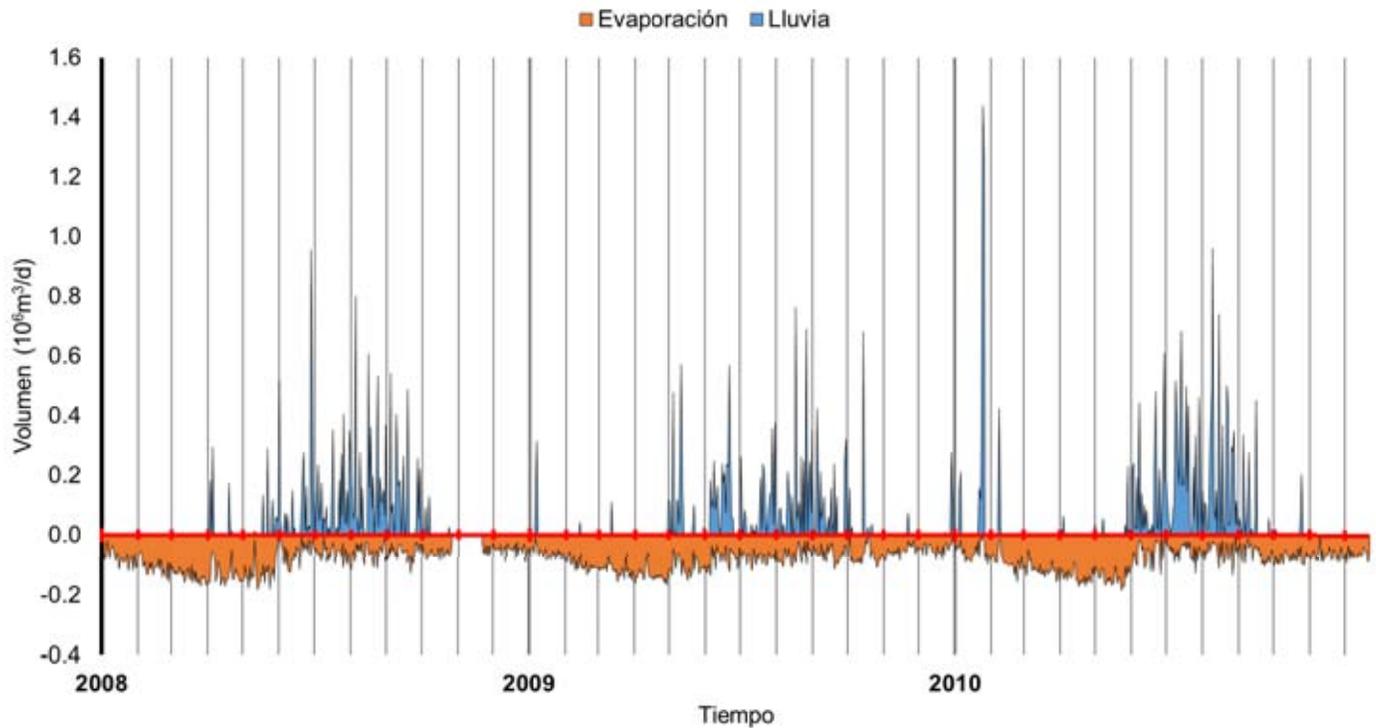


Figura 12 Lluvia (azul) y evaporación (naranja) diaria durante el periodo 2008-2010 reportada en una estación meteorológica cercana al embalse de Valle de Bravo (en m^3/d). La línea roja separa el flujo negativo (evaporación) del positivo (lluvia).

Ríos y drenajes.

Como consecuencia de la precipitación, la mayor entrada de agua al embalse proviene de los afluentes (ríos y drenajes) (Figura 13). Entre años se observa que el volumen de aporte es diferente y que, mientras la precipitación mantiene valores cercanos entre sí, los afluentes varían entre $150-224 \times 10^6 m^3/año$ (hasta $74 \times 10^6 m^3/año$), a excepción del 2005 ($136 \times 10^6 m^3/año$) que mostró una disminución considerable de aporte con respecto a los demás años, proporcional al volumen de lluvia observado para ese año.

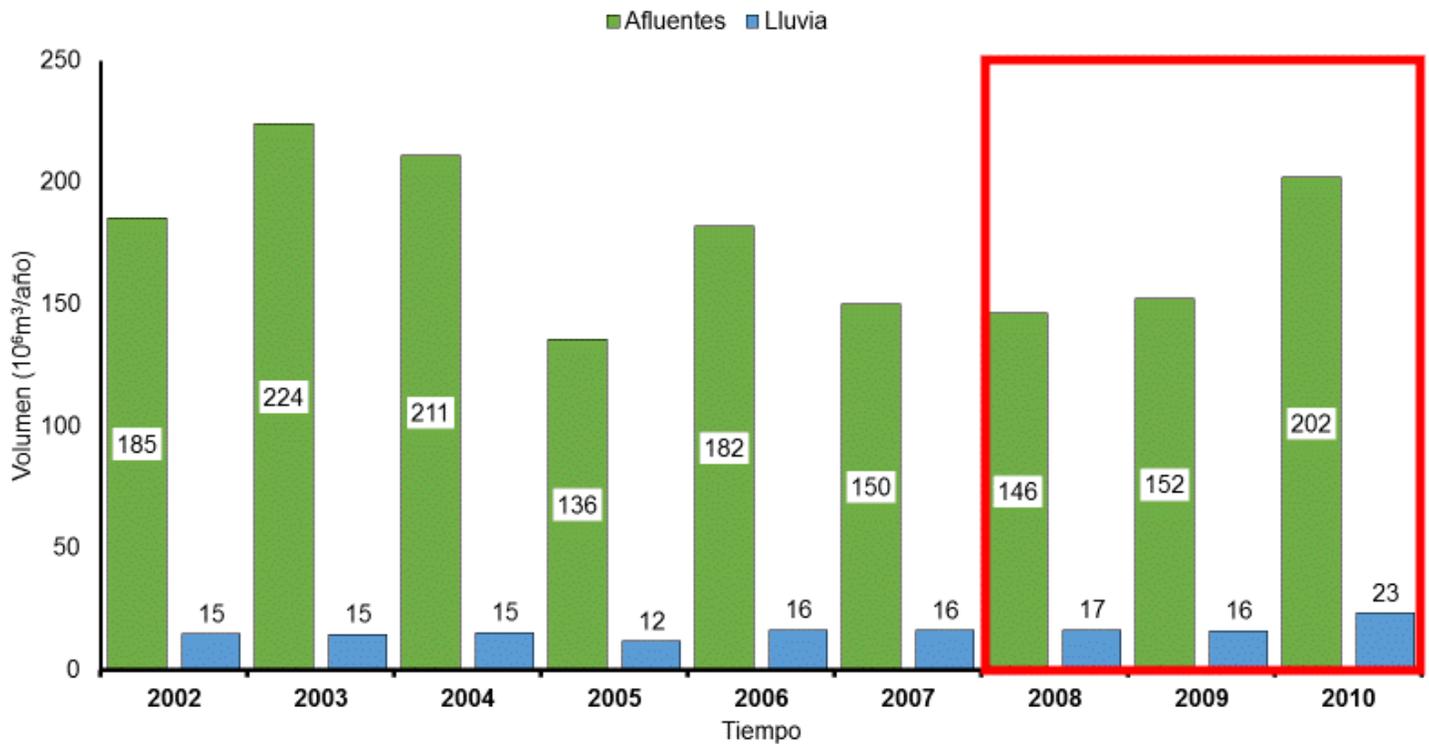


Figura 13 Volumen anual de afluentes (verde) y lluvia (azul) que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m³/año). Los números representan el volumen total reportado por año. El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

El primer periodo de estudio 2002-2005 tiene una contribución promedio de 189×10^6 m³/año (48% de la capacidad de almacenamiento), mientras que en el segundo periodo 2005-2007 observamos que hubo una disminución considerable de esta fuente debido a una menor escorrentía (166×10^6 m³/año, 42%), relacionado a una menor frecuencia y cantidad de lluvia durante ese periodo (Tabla 3). En el último periodo, aunque las condiciones de precipitación fueron ligeramente mayores que en los otros, esta condición no se vio reflejada en el aporte de los afluentes de 2008 y 2009, pero en 2010 este aporte aumentó con la precipitación (Figura 14).

Se puede decir que la afectación en el aporte de los afluentes junto con la alta demanda de agua (extracción) a comienzos de 2008, desencadenaron la disminución progresiva del volumen y del nivel observados en este año y en 2009.

Tabla 3. Aporte de agua anual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m³). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican el promedio de aporte de afluentes por periodo de estudio. La proporción con respecto al volumen máximo (%) se representa en cursivas.

	<i>Volumen (10⁶m³)</i>	<i>Promedio (10⁶m³/año)</i>	<i>%Volumen máximo (395.4x10⁶ m³)</i>
2002	185.2		
2003	224.0	189.0	48%
2004	211.1		
2005	135.5		
2006	182.1	166.0	42%
2007	150.0		
2008	146.3		
2009	152.1	166.9	42%
2010	202.2		

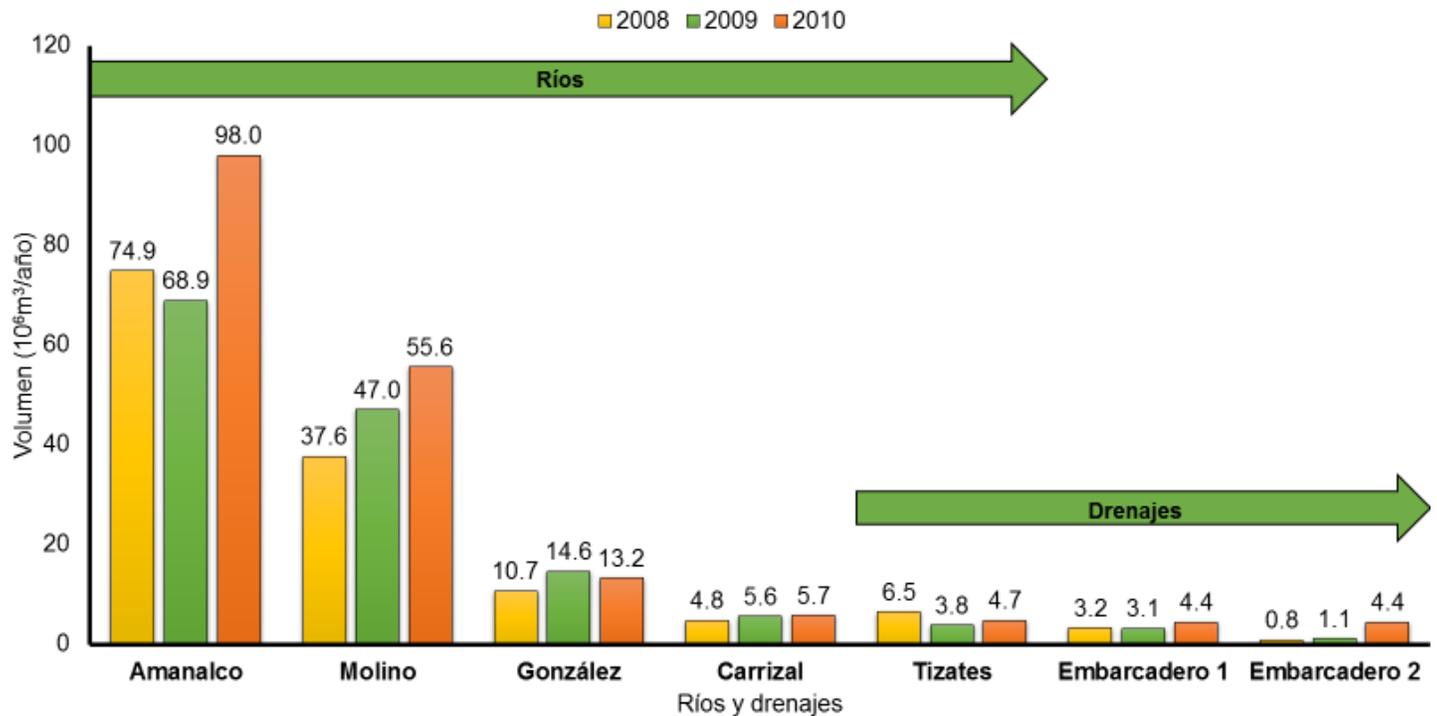


Figura 14 Volumen anual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en m³/año). Ingresos al embalse mediante ríos y drenajes (eje de ordenadas). Los números indican el aporte anual por afluente (2008 amarillo, 2009 verde y 2010 naranja).

En este periodo de estudio, el aporte por afluentes continuó dominando sobre las otras entradas; la inyección, que tuvo un incremento debido a las políticas de gestión, y la lluvia.

El aporte por drenajes también incrementó hacia 2010, año en que alcanzó $13.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, después de una disminución en 2009 de $8.1 \times 10^6 \text{ m}^3$. La fracción de aporte de éstos al total de afluentes, se encontró entre 4-7% (Figura 15).

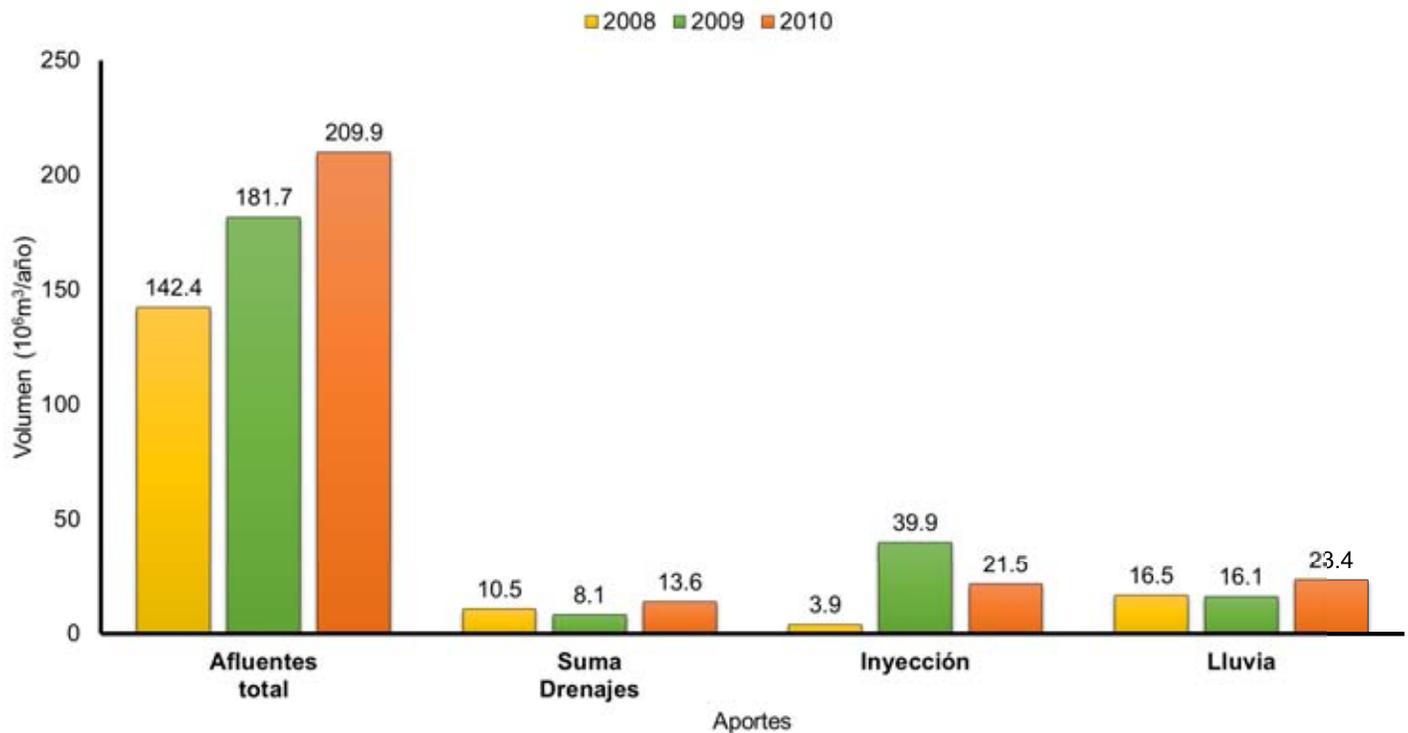


Figura 15 Entradas de agua al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en $\text{m}^3/\text{año}$). Ingresos al embalse (eje de ordenadas). Los números indican el aporte anual de cada aporte (2008 amarillo, 2009 verde y 2010 naranja).

Descomponiendo a los afluentes en los cinco aportes (Figura 16), se confirma que los ríos contribuyen en mayor volumen que los drenajes, constituyendo el río Amanalco la influencia más importante. A escala mensual, los flujos mayores se concentran en la temporada de lluvias. En 2005 disminuyó el caudal en comparación al periodo anterior (2002-2005) y desde aquí empieza una caída en el aporte por afluentes, pudiera suponerse por la disminución en el aporte de lluvias durante 2005, que no se compensó con el volumen de agua regularizado durante 2006 y 2007. Como ya se había discutido, para los últimos tres años (2008-2010) se esperaba que, con el aumento inusual en la frecuencia e intensidad de lluvia, los afluentes recuperaran los volúmenes reportados en el primer periodo (Figura 17). Sin embargo, sólo sucedió durante 2010, pues los años 2008 y 2009 siguieron una tendencia parecida al periodo anterior, 2005-2007.

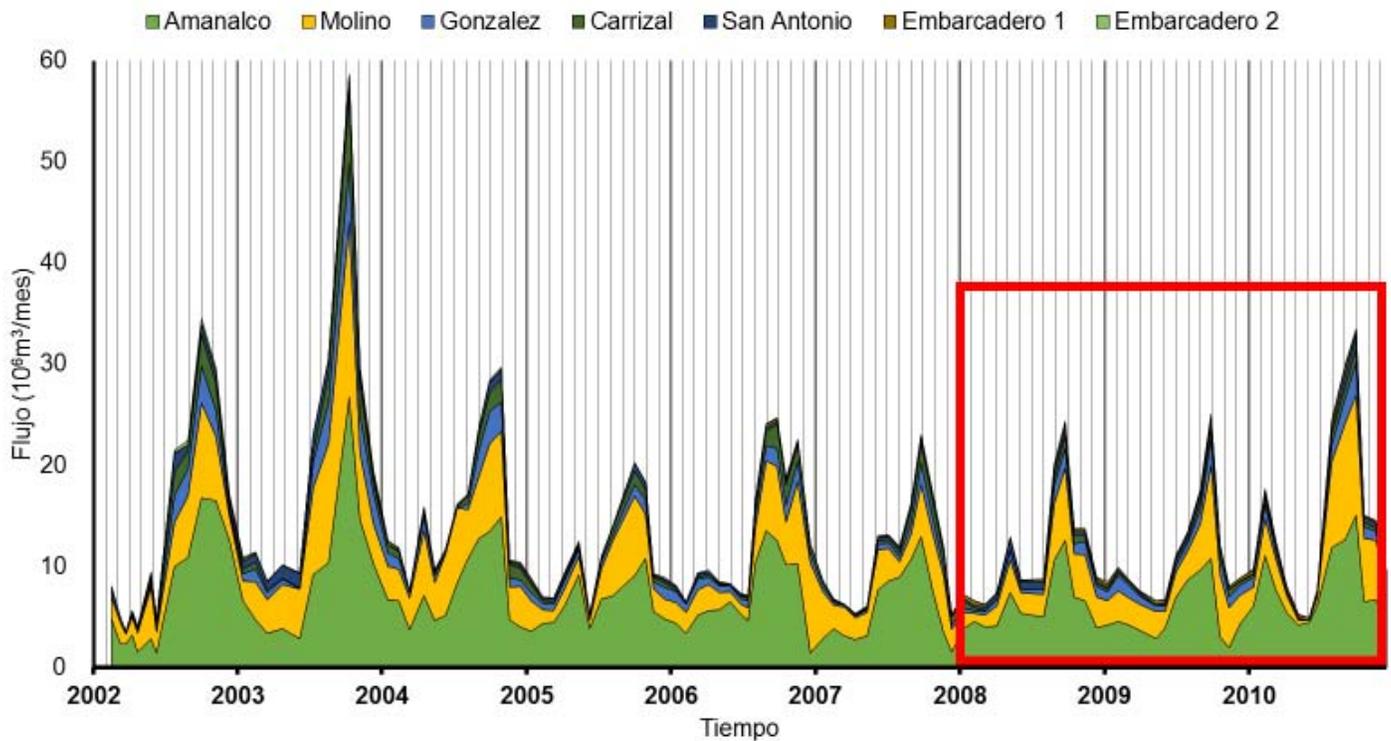


Figura 16 Flujo mensual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m^3/mes). Variaciones temporales de agua de los principales aportes ordenados de mayor (Amanalco) a menor (Embarcaderos). El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

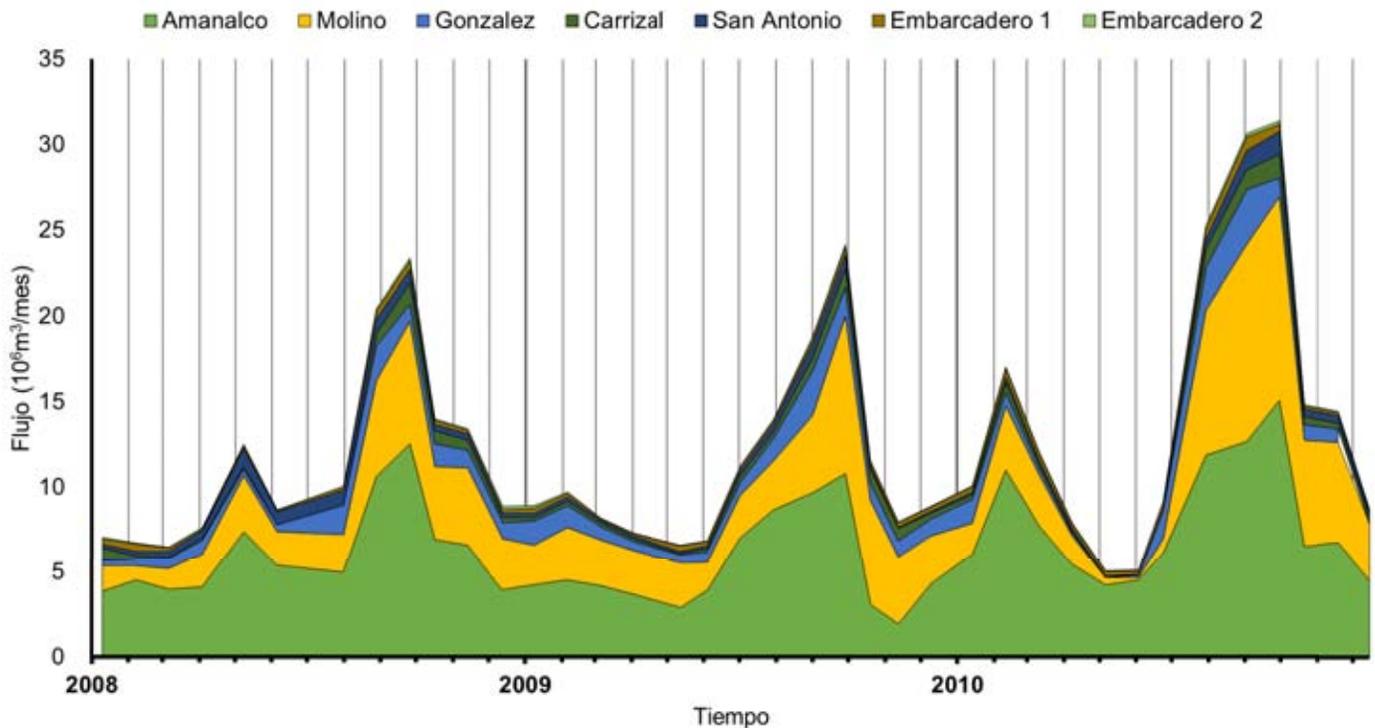


Figura 17 Flujo mensual de afluentes que ingresan al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en m^3/mes). Variaciones temporales de agua de los principales aportes ordenados de mayor (Amanalco) a menor (Embarcaderos).

Las tablas 4-6 muestran los términos del balance de agua para el periodo 2008-2010. Se observa que el aporte total de los afluentes fue aumentando en cada año. En 2008, contribuyeron con 43% del volumen máximo registrado en ese año y en los años siguientes alcanzaron 50%, cercano al porcentaje reportado por Ramírez-Zierold, et al. (2010) y Quintanilla-Terminel (2012). Los ríos se mantuvieron en las proporciones observadas previamente; en cambio, los drenajes aumentaron su contribución del 4% un porcentaje entre 7-8%, equivalente al porcentaje calculado para el río González.

El volumen promedio de la presa disminuyó de $277 \times 10^6 \text{m}^3$ en 2008 a $247.9 \times 10^6 \text{m}^3$ en 2009, aumentando a $341.4 \times 10^6 \text{m}^3$ en 2010, entre 85-87% del volumen máximo alcanzado en cada año. La diferencia de volumen entre muestreos, es decir, el cambio anual del volumen, varió entre 7-15% de la capacidad de almacenamiento máxima: fue negativo en 2008 ($-39.5 \times 10^6 \text{m}^3$) y en los siguientes años positivo, alcanzando en 2010 un valor de $60 \times 10^6 \text{m}^3$, el valor más alto de los nueve años.

En la siguiente sección se discutirán los términos que no dependen de los factores ambientales, sino de las políticas de gestión de la cuenca (inyección y extracción). La inyección fue el término con mayor incremento en estos tres años, pues en el año 2008 tuvo con una contribución de 1% al volumen, mientras que el año siguiente contribuyó con 10% del volumen, terminando con una contribución del 5% en el último año. En este sentido, este comportamiento es lo que hace característico a este periodo con respecto a los otros.

La extracción fue la mayor influencia en el volumen del embalse; en el año 2008 la cantidad extraída ($-191.3 \times 10^6 \text{m}^3$) equivalió al 48% del volumen máximo. Por otro lado, el volumen más alto extraído en este periodo se observó en 2009 ($-159.5 \times 10^6 \text{m}^3$), equivalente al 55%. La proporción se debió a que el nivel promedio de ese año fue menor debido a las condiciones descritas en secciones anteriores. Continuando con 2010, un año con uno de los volúmenes más altos, este término alcanzó el 40% ($-156.3 \times 10^6 \text{m}^3$).

Los resultados hasta ahora, nos muestran que, la influencia de los flujos hasta ahora discutidos determinó el comportamiento del embalse durante este periodo de estudio 2008-2010.

Tabla 4. Términos del balance de agua durante el año 2008. Se muestran las entradas y salidas del embalse Valle de Bravo (en m³). Los números en negritas cursivas señalan el volumen total de afluentes. Los números en cursiva representan el porcentaje con respecto al nivel máximo alcanzado ese año (319.1 x10⁶m³).

2008

Términos del balance	Embalse (10 ⁶ m ³)	Entradas (10 ⁶ m ³)	Salidas (10 ⁶ m ³)	%V máximo (319.1x10 ⁶ m ³)
Volumen promedio de la presa	277.0			87%
Cambio anual del volumen	-39.5			-12%
Precipitación		16.5		5%
Evaporación			-26.8	-8%
Inyección		3.9		1%
Extracción			-191.3	-48%
	Afluentes		%	
Amanalco		74.9	54%	
Molino		37.6	27%	
González		10.7	8%	
Carrizal		4.8	3%	
Tizates		6.5	5%	
Embarcaderos		4.0	3%	
Suma drenajes		0.5	8%	
Afluentes total		138.4	100%	43%

Tabla 5. Términos del balance de agua durante el año 2009 (en m³). Se muestran las entradas y salidas del embalse de Valle de Bravo. Los números en negritas cursivas señalan el volumen total de afluentes. Los números en cursiva representan el porcentaje con respecto al nivel máximo alcanzado ese año (290.4 x10⁶m³)

2009				
Términos del balance	Embalse (10 ⁶ m ³)	Entradas (10 ⁶ m ³)	Salidas (10 ⁶ m ³)	%V máximo (290.4x10 ⁶ m ³)
Volumen promedio de la presa	247.9			85%
Cambio anual del volumen	19.4			7%
Precipitación		16.1		6%
Evaporación			-29.5	-10%
Inyección		39.9		13%
Extracción			-159.5	-55%
	Afluentes		%	
	Amanalco	68.9	54%	
	Molino	47.0	27%	
	González	14.6	8%	
	Carrizal	5.6	3%	
	Tizates	3.8	5%	
	Embarcaderos	4.2	3%	
	Suma drenajes	8.1	8%	
	Afluentes total	144.1	100%	50%

Tabla 6. Términos del balance de agua durante el año 2010 (en m³). Se muestran las entradas y salidas del embalse de Valle de Bravo. Los números en negritas cursivas señalan el volumen total de afluentes. Los números en cursiva representan el porcentaje con respecto al nivel máximo alcanzado ese año (394.7 x10⁶m³).

2010				
Términos del balance	Embalse (10 ⁶ m ³)	Entradas (10 ⁶ m ³)	Salidas (10 ⁶ m ³)	%V máximo (394.7x10 ⁶ m ³)
Volumen promedio de la presa	341.4			86%
Cambio anual del volumen	60.0			15%
Precipitación		23.4		6%
Evaporación			-29.5	-7%
Inyección		21.5		5%
Extracción			-156.3	-40%
	Afluentes		%	
	Amanalco	98.0	53%	
	Molino	55.6	30%	
	González	13.2	7%	
	Carrizal	5.7	3%	
	Tizates	4.7	3%	
	Embarcaderos	8.9	5%	
	Suma drenajes	13.6	7%	
	Afluentes total	186.2	100%	50%

Extracción de agua

Respecto a la extracción (la principal salida de agua del sistema), la frecuencia de este evento es mayor que la de inyección. El periodo con mayor salida por extracción fue en 2002-2005 ($189.72 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, 49% de la capacidad máxima de almacenamiento) y la más baja 2005-2007 ($142.98 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, casi 37%). Se puede observar que después de un año con alta extracción, este volumen disminuye en los siguientes años como medida de recuperación de volumen del sistema. Con el tiempo, la extracción mostró una tendencia a disminuir, especialmente después de la extracción máxima en el año 2005, uno de los años más secos (Figura 18).

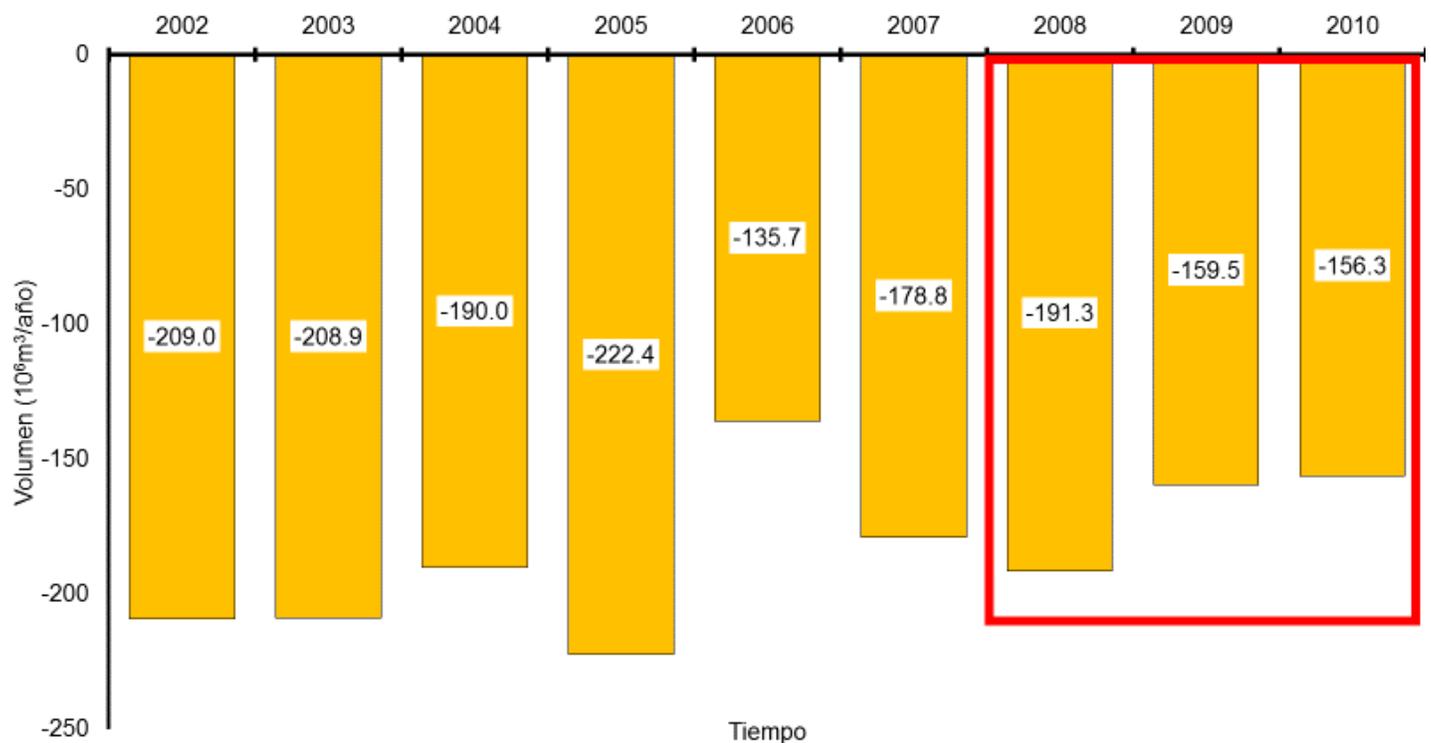


Figura 18 Extracción anual del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en $\text{m}^3/\text{año}$). Los números representan el volumen total de agua extraído de la presa por año. El recuadro separa el periodo de estudio 2008-2010.

Al observar los datos del cuadro rojo (2008-2010) a escala diaria, se aprecia que la extracción fue alta en la época de secas y baja en la de lluvias (Figura 19). La alta extracción de agua durante 2008 y la correspondiente en la temporada de secas en el año 2009 impidieron la recuperación adecuada del sistema en la temporada de lluvias, hasta un alto evento de inyección que se verá a detalle en la siguiente sección.

Es importante mencionar que la disminución en la frecuencia y volumen de volumen de la extracción en 2010 fue uno de los factores que contribuyeron a la recuperación tanto del volumen como del nivel en la presa.

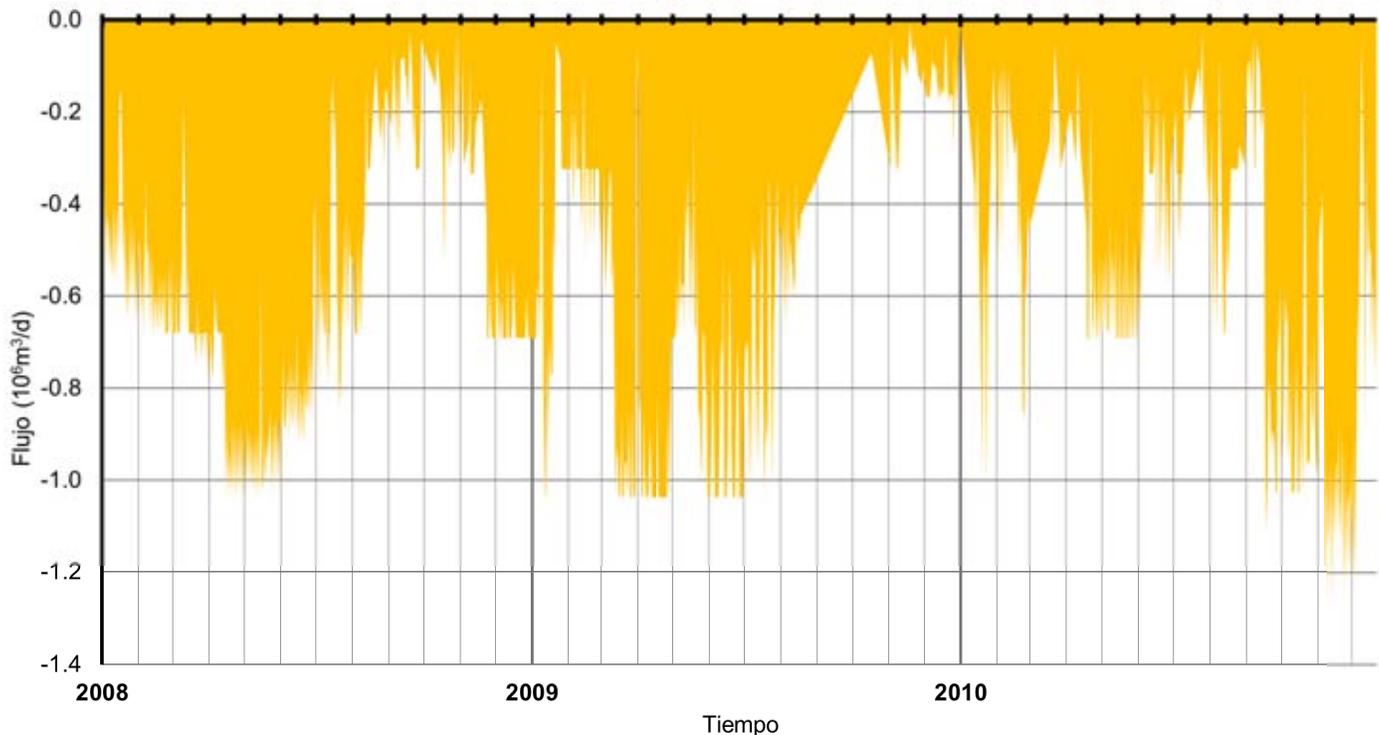


Figura 19 Extracción diaria del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en m^3/d). Volumen tomado de la presa para el abastecimiento del Sistema Cutzamala.

Inyección de agua

La inyección y la extracción producen cambios más rápidos en el sistema debido a la cantidad de agua que se maneja en escala de días. La inyección es la acción principal para la recuperación del volumen en la presa y generalmente se gestiona para coincidir con la temporada de lluvias. Al contrario de la extracción, esta entrada mostró una tendencia creciente con un incremento drástico en 2009 (Figura 20), tomándose esa decisión debido a la presión de la sociedad. Se puede observar que los mayores volúmenes de inyección se presentan después de años con mucha extracción, y que esta gestión se mantuvo en magnitud menor que la extracción (Figura 21).

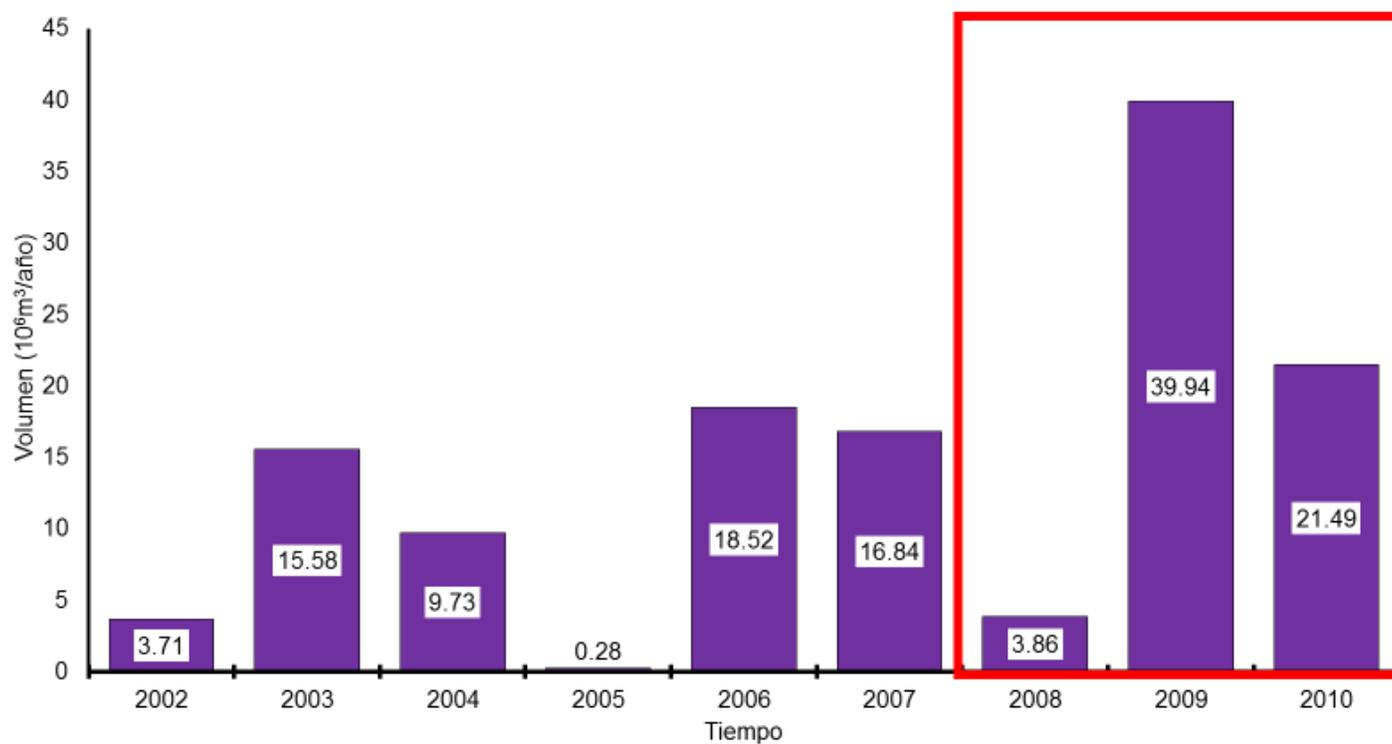


Figura 20 Inyección anual al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m³/año). Volumen ingresado por inyección. Los números representan el volumen total anual. El recuadro rojo separa el periodo de estudio ASR (2008-2010)

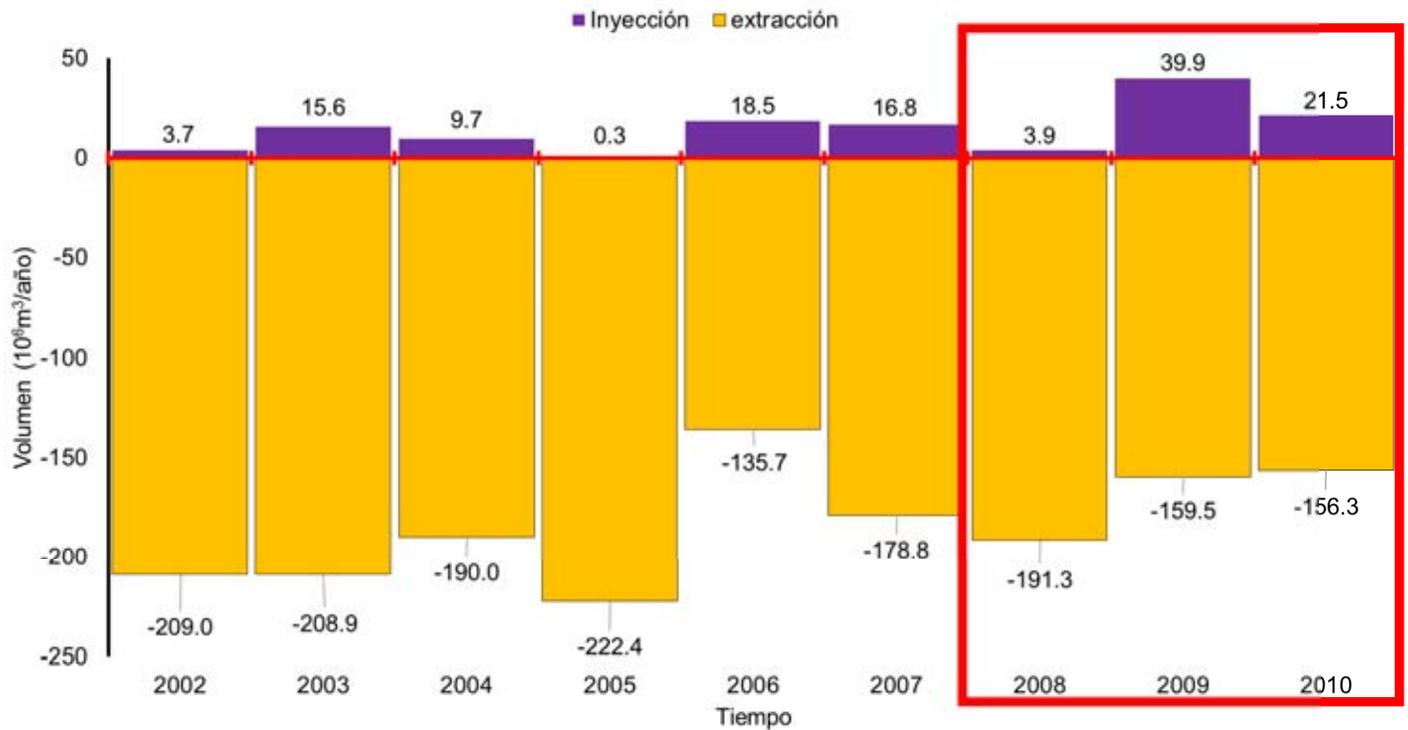


Figura 21 Inyección (morado) y extracción (amarillo) del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en $m^3/año$). La línea roja separa el flujo negativo (extracción) del positivo (inyección). El recuadro rojo separa el periodo de estudio ASR (2008-2010)

En la figura 22, durante el periodo de estudio 2008-2010, en promedio ingresaron por medio de la inyección $21.7 \times 10^6 m^3/año$, $14.5 \times 10^6 m^3$ más que en 2002-2005 y $10.4 \times 10^6 m^3$ más que 2005-2007. El componente principal de estas diferencias fue el aumento de inyección durante la segunda mitad del 2009. En particular se observó que el volumen inyectado en septiembre de 2009 ha sido el más alto en 9 años, y que las políticas de inyección continuaron mayores que otros años a partir de este evento. Esta serie de eventos en esta corta escala de tiempo promovieron que el nivel en la presa regresara a las condiciones regulares registradas en Ramírez-Zierold, et al. (2010) observadas en el año siguiente.

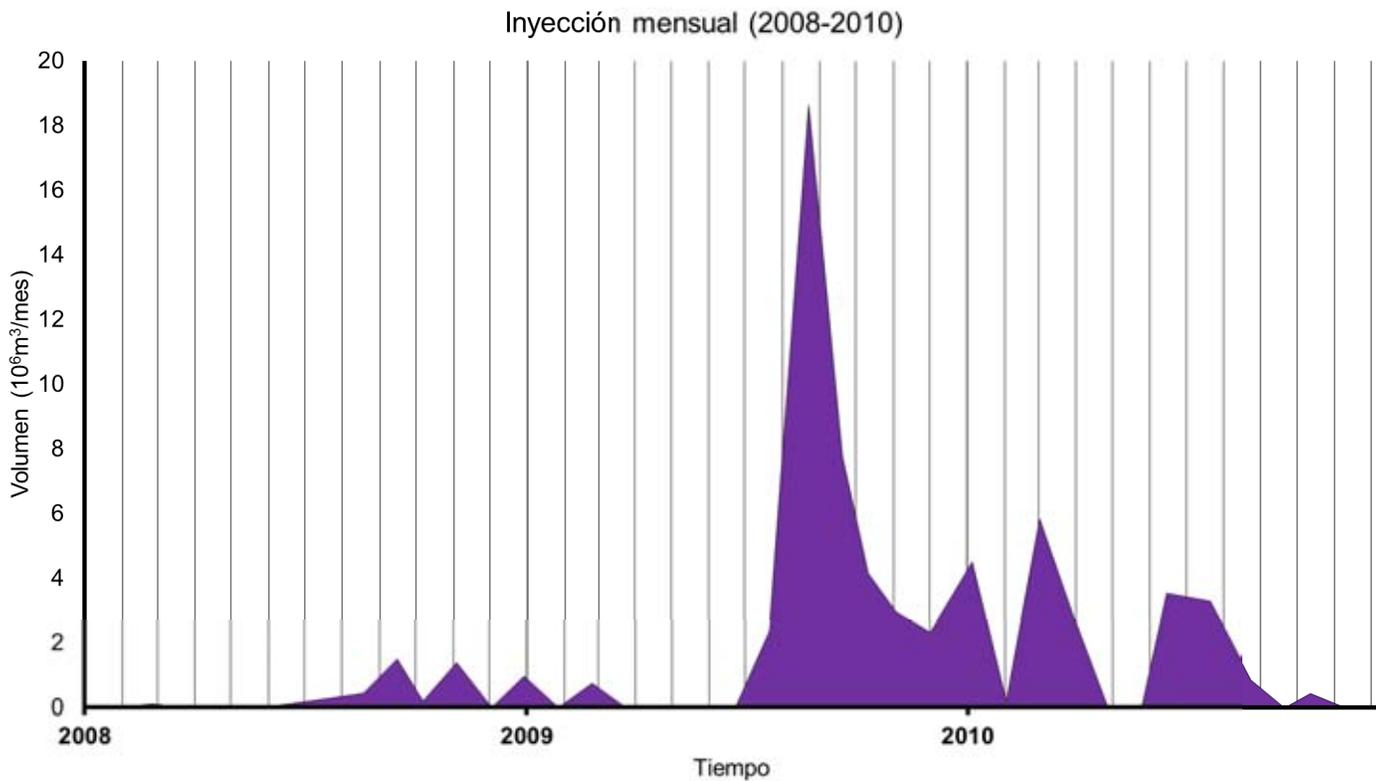


Figura 22 Inyección (morado) mensual al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en m^3/mes).

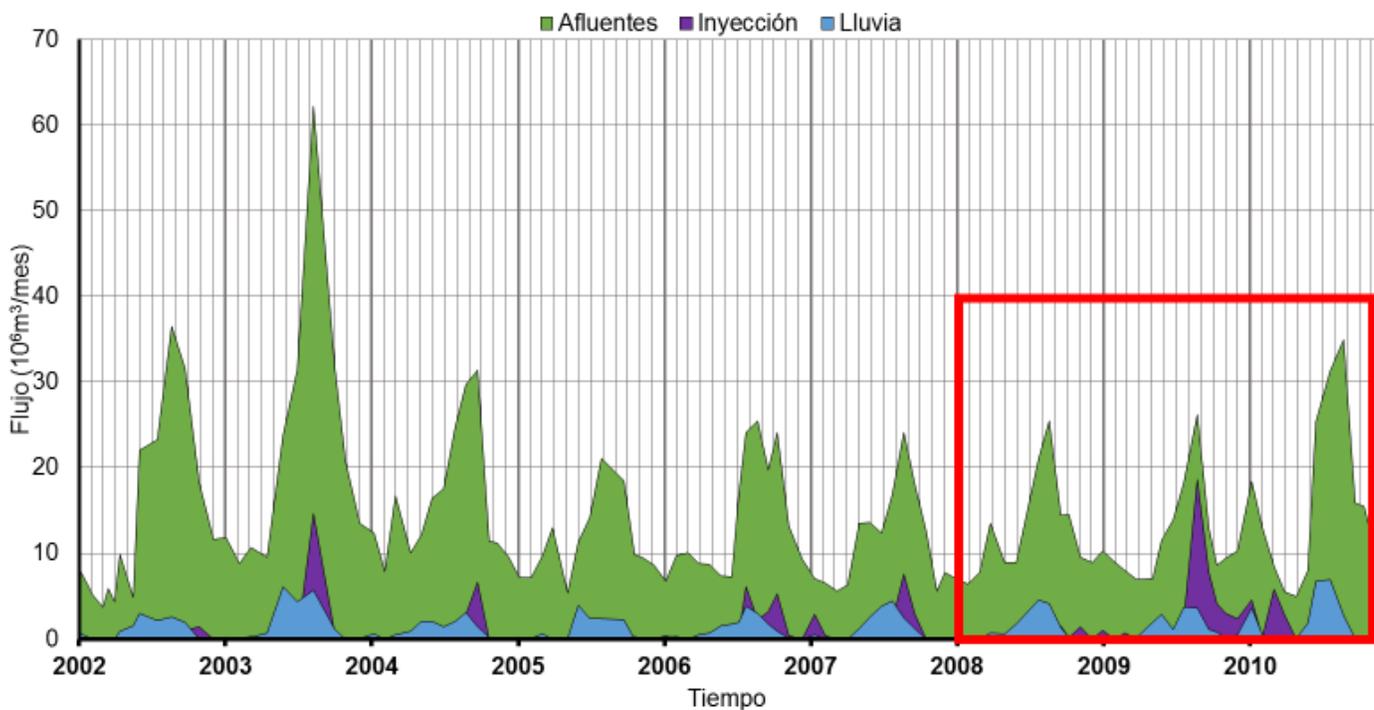
Balance de agua

Al integrar los resultados previos para elaborar el balance de agua, se comparó cualitativamente la magnitud de las entradas y salidas por medio de un gráfico. Esto nos permite esclarecer la influencia de cada variable en el balance hídrico (Figura 23), encontrando patrones y resaltando las condiciones particulares entre periodos de estudio o en otras escalas. La importancia del periodo 2008-2010, es que presenta en una menor escala de tiempo las variaciones reportadas previamente (la sucesión de dos años de bajo nivel y uno con nivel muy alto), debido a las condiciones anómalas que presentaron sus componentes, tanto ambientales como antrópicas, en comparación con los periodos previos.

Como se puede ver, las variables que dominan las entradas y salidas del sistema son los afluentes (principal entrada) y la extracción (principal salida) respectivamente. Entonces, la entrada y salida de P será principalmente por estas fuentes.

Como se ha demostrado en estudios previos (Ramírez-Zierold, 2010; Quintanilla-Terminel, 2012), en Valle de Bravo se conocen las fuentes de agua más importantes. Para este trabajo, se cotejaron las mismas fuentes con los cambios de volumen observados, obteniendo una $R^2= 0.96$.

La correlación de esas fuentes determinó la magnitud de los procesos del P en las escalas temporales propuestas, mientras que los procesos hidrodinámicos (mezcla y circulación) fueron la clave para el comportamiento observado en la escala interanual.



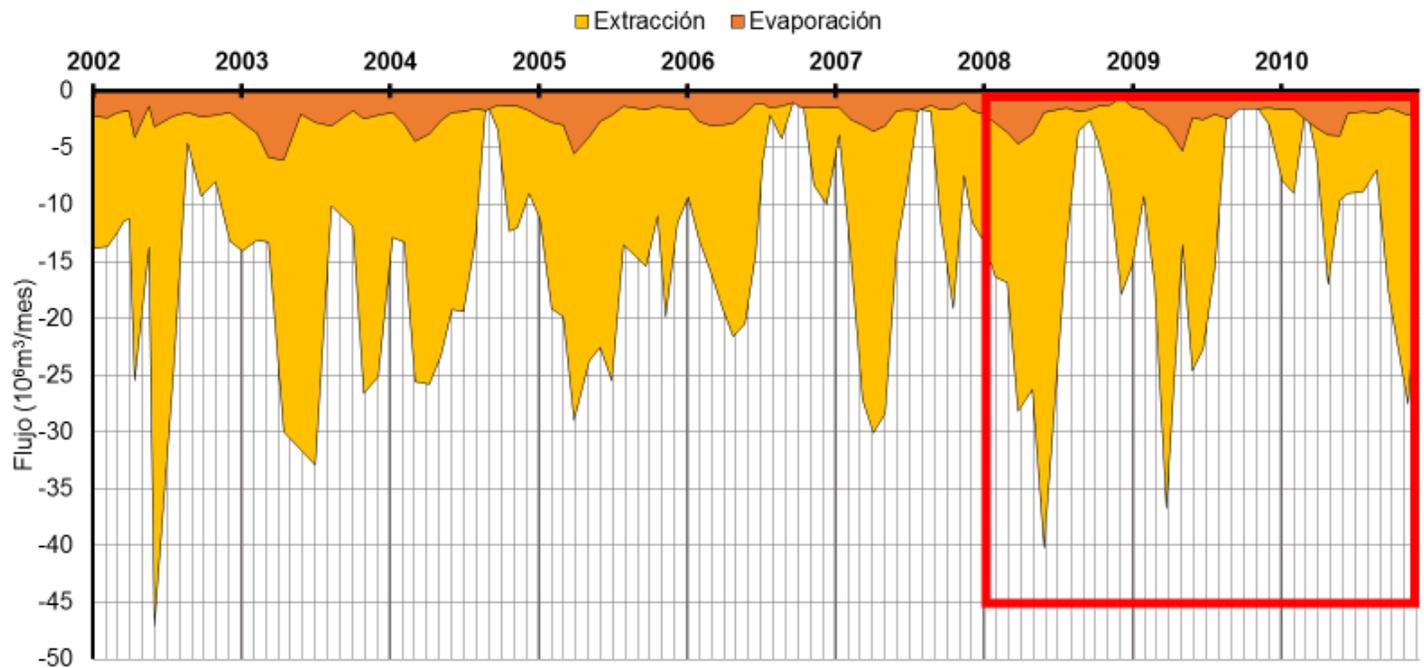


Figura 23. Entradas y salidas de agua mensuales del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en m^3/mes) a) Entradas acomodadas de menor a mayor: lluvia (azul), inyección (morado) y afluentes (verdes) b) Salidas mostradas de menor a mayor: evaporación (naranja) y extracción (amarillo). El recuadro separa el estudio 2008-2010

Del agua al fósforo: preámbulo al balance de masa.

Al igual que en la sección anterior, primero se describirán las variables a considerar para el balance de P. En este caso, se toman en cuenta como entradas: el ingreso de P al embalse por las descargas de los afluentes, por la inyección proveniente de la presa Colorines. Mientras que la única salida es la extracción desde el embalse Valle de Bravo. Recordando que los afluentes son el aporte más importante de agua y, por lo tanto, de P al embalse.

Al comparar las distintas fuentes (Figura 24) se hace evidente la dominancia de los afluentes sobre el aporte por inyección proveniente de la presa Colorines, análogamente al comportamiento del agua, con la diferencia de que los flujos de P en 2008 y 2009 se mantuvieron casi constantes (29.0 T/año), al contrario de los flujos de agua de esos años, que fueron aumentando. El año 2010 presentó un aumento notable (114.3 T/año, 25%), siguiendo el comportamiento esperado con el aumento de flujo de agua en los afluentes.

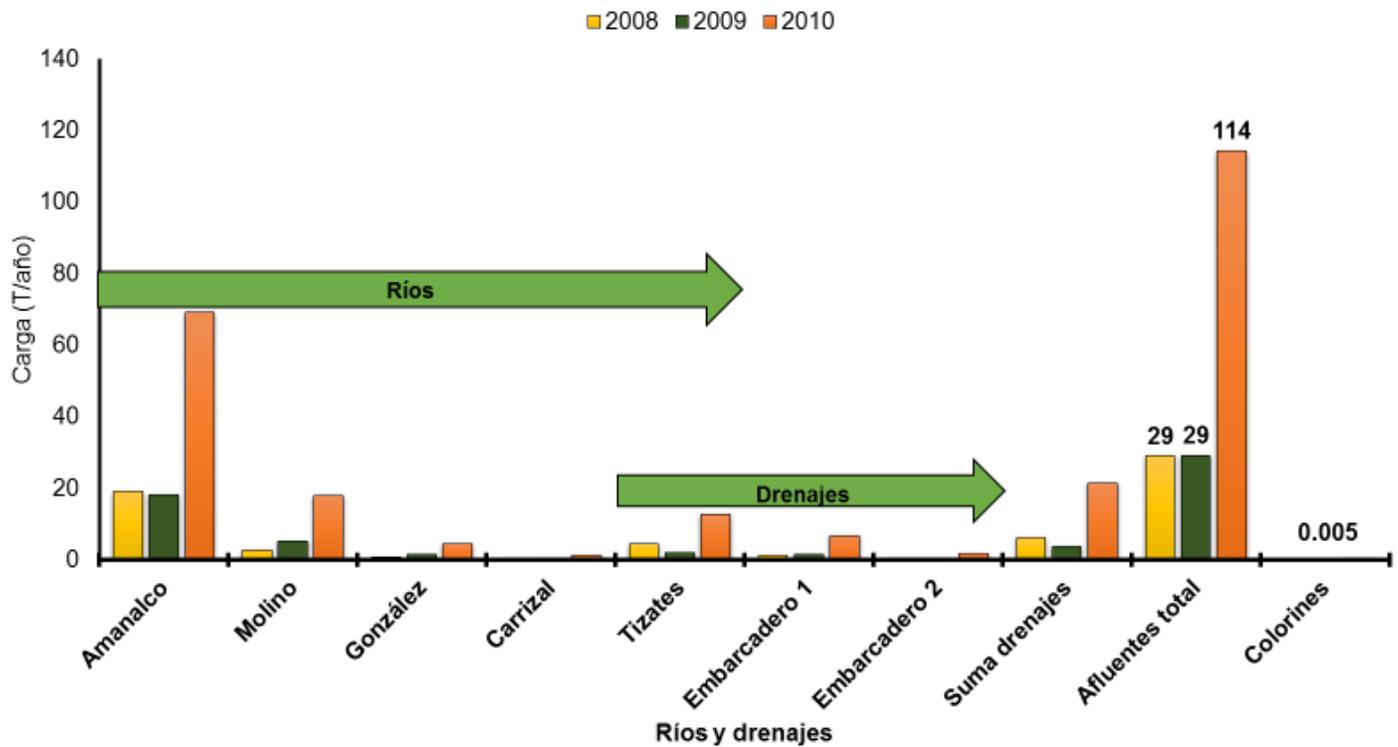


Figura 24 Entradas de fósforo al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en T/año). Se muestra la cantidad de fósforo correspondiente a cada afluente por año: 2008 en amarillo; 2009 en verde oscuro; 2010 en naranja. Las flechas verdes claro indican los ríos y los drenajes. En el caso de Colorines, su aporte fue igual en todos los años.

En la siguiente tabla (7) se observa que la entrada total al embalse disminuyó desde el periodo comprendido entre 2005 y 2007; aumentando ligeramente durante el último periodo de estudio 2008-2010.

Enfocándonos en los afluentes, los ríos y los drenajes tuvieron aportes variables, pero se mantuvieron en alrededor de su proporción regular reportada previamente (Quintanilla-Terminel, 2012; Ramírez-Zierold, 2010). Referente a los drenajes, se esperaba un incremento a la par del aumento en flujo de estos aportes. Sin embargo, de ocupar el 22% de las entradas totales en el periodo 2002-2005, en este periodo de estudio en el que se presentaron condiciones parecidas durante el año 2010, disminuyó al 16%, haciéndose importante la influencia de los años 2008 y 2009 a este periodo.

Tabla 7. Aporte promedio de fósforo por afluentes al embalse Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/año). Principales flujos del balance de fósforo (T/año). Se dividen los tres periodos de estudio: en naranja 2002-2005, en azul 2005-2007 y en rojo 2008-2010. Los números en cursivas representan los porcentajes con respecto a la entrada total por periodo.

	2002-2005		2005-2007		2008-2010	
	T/año		T/año		T/año	
Entrada total	109.7	100%	60.4	100%	63.7	100%
Afluentes						
Amanalco	66.5	61%	41.8	69%	35.5	56%
Molino	10.6	10%	6.1	10%	8.6	14%
González	3.9	4%	1.4	2%	2.2	4%
Carrizal	2.9	3%	0.9	1%	0.7	1%
Drenaje	24.4	22%	8.7	14%	10.5	16%

En los aportes, a escala estacional y mensual (Figura 25), se presentaron dos picos a lo largo de cada año: uno en temporada de secas (noviembre-junio) y otro en temporada de lluvias (julio-octubre), destacando que la carga externa de los afluentes incrementó notablemente con respecto al resto del año en la temporada de lluvias, relacionado con el aumento del flujo de agua. Para el caso de los drenajes, se observó que la concentración varía entre años, y que suelen seguir la tendencia de comportamiento hidrológico de los ríos, a menos que se presenten eventos de altas descargas como los de 2003, que, en conjunto, contribuyeron con 24.4 T/año del total de 109.7 T/año estimadas para el periodo 2002-2005. En ese año, Tizates aumentó su carga sobre los demás ríos, alcanzando las 14 T en abril, convirtiéndose en el aporte más grande de P en ese mes. La causa pudo ser la ruptura de tubos de drenaje en ese río y el aumento de la descarga de detergentes en las aguas residuales, como se menciona también en Ramírez-Zierold, et al., 2010. Aunque este río, que actualmente es un drenaje, ha seguido un patrón similar al que muestran los demás aportes, su carga se ha mantenido como la más alta de los tres drenajes y su aporte varió independientemente de su flujo de agua, posiblemente porque no se repararon correctamente las estructuras de drenaje.

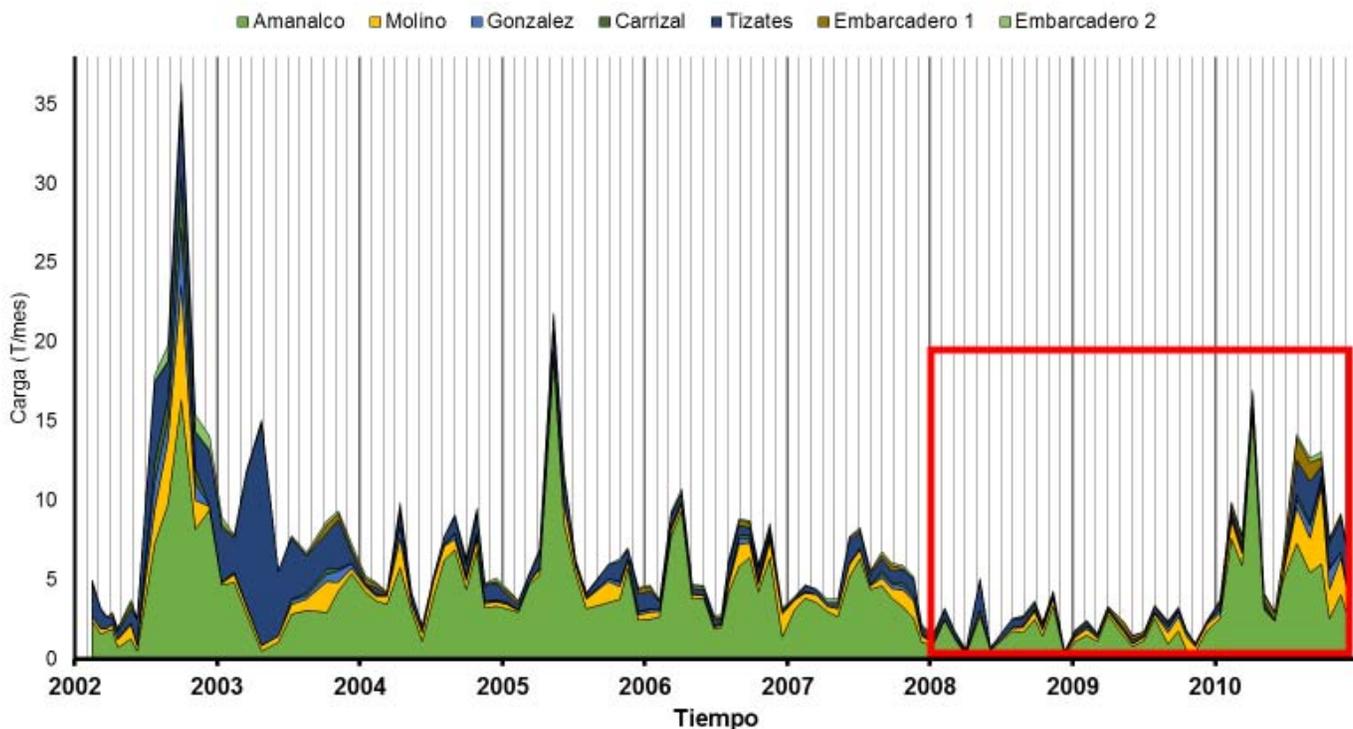


Figura 25 Carga mensual de los afluentes que ingresan al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/mes). Se muestran los aportes de mayor (Amanalco) a menor (Embarcaderos) influencia en el embalse. El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

Posterior al pico máximo de 2005, se observó una disminución de aporte que continuó hasta los años 2008 y 2009, haciéndose más notorio en estos últimos años. En consecuencia, se presentó un decremento en la carga externa: de 108.3 T/año en 2002-2005 a 57.5 T/año, en el periodo 2008-2010 equivalente al 53%. En esos años se hizo evidente la acentuación de la disminución general de las cargas que se dio a partir de 2003, a excepción del río Tizates que tuvo un incremento a partir de ese año y desde entonces su carga fue variable.

En el año 2010 (Figura 26), durante el mes de abril se concentró una mayor cantidad de P en los afluentes, produciendo una carga externa total de ~17 T. Este valor se consideró alto para la temporada de secas, observándose que en los demás años se repitió esta tendencia, pero en cantidad variable: en abril de 2003 se alcanzaron 15 T, en mayo de 2005, 21 T y, en marzo de 2006, 8 T (Figura 25).

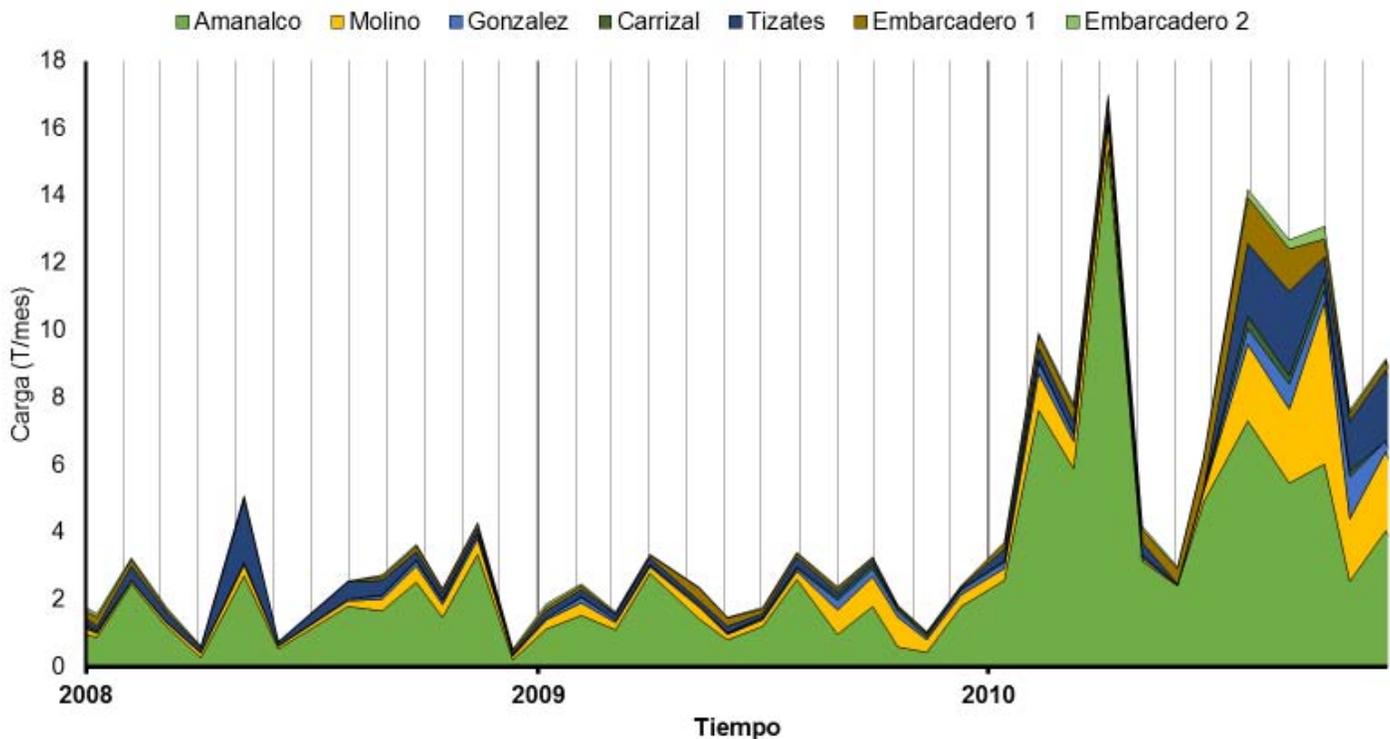


Figura 26 Carga mensual de los afluentes que ingresan al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en T/mes). Se muestran los aportes de mayor (Amanalco) a menor (Embarcaderos) influencia en el embalse.

En su tesis, Quintanilla-Terminel (2012) relaciona la disminución de toneladas de P en los afluentes al decremento en sus respectivos flujos de agua. Desde este análisis, se puede proponer que para 2010 aumentaron las cargas externas por la recuperación del flujo de agua en los afluentes, después de dos años particularmente bajos, que influyeron notablemente en el promedio final del periodo. De cualquier manera, no fue suficiente para alcanzar los datos reportados en Ramírez-Zierold, et al., 2010.

En la siguiente sección, se discutirá uno de los términos antrópicos de ambos balances, que es la salida más importante de agua, y que se abordará en el contexto del flujo del fósforo en el embalse.

Salida de fósforo por extracción de agua

Observando la figura 27, a principios de cada año (enero a junio), se alcanzaron los picos más altos, respondiendo a las políticas de manejo de la presa en cada uno. En el verano de 2002 se presentó mucha extracción de P del sistema, con un total de 43.7 T. Los años siguientes (2003-2007), disminuyó alrededor de la mitad (~20 T/año), pero volvió a aumentar de forma marcada en los veranos de 2008 y 2009, sobre todo en el último año mencionado, en el que salieron por esta vía 65.6 T. Al contrario, en 2010 se dio una disminución de 36% (23.3 T) con respecto al 2009, probablemente por el aumento de volumen gestionado a finales de septiembre del año anterior.

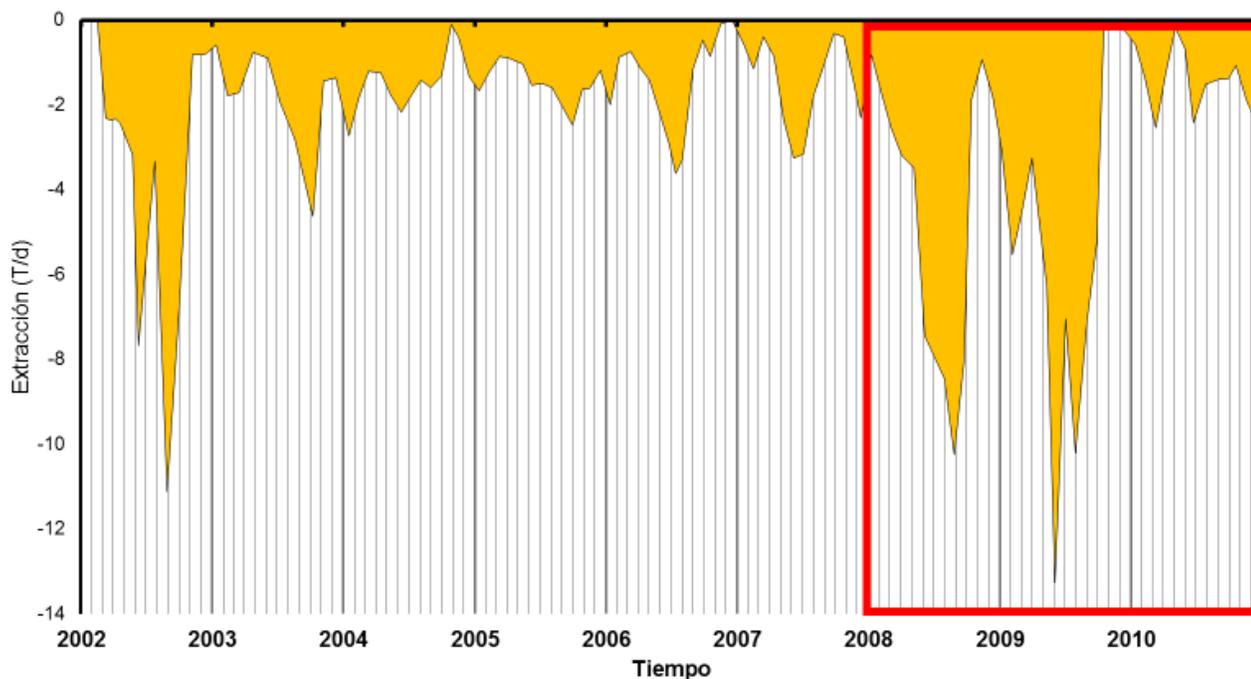


Figura 27 Extracción mensual de fósforo del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/d). El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

A escala de periodos de estudio (Tabla 8), el periodo 2002-2005 se posicionó entre los dos periodos posteriores, con 23.2 T/año (21%); recalando que el año con mayor salida por esta fuente fue el 2002. Esto resultó contrario a lo que se esperaría, pues en la temporada seca de 2005 se presentó la mayor extracción desde 2002. En el periodo 2005-2007 salió de la presa la cantidad más baja de P, con 15 T/año. En este periodo, la mayor cantidad de P salió del sistema en los años 2006 y 2007 (19.3 T), coincidiendo en 2006 con el año de extracción de agua más baja en la escala de estos nueve años y también un año de disminución del nivel considerable debido a la alta extracción en 2005. Recordando el contexto de la temporada de lluvias de 2006, se gestionó un aumento en el volumen de inyección, el cual representó una recuperación del nivel a finales de este año. También se debe tomar en cuenta que el 2007 también presentó una inyección de agua parecida aunque su extracción aumentó. Siguiendo con el año 2008, que tuvo un volumen de extracción de agua similar a 2004, aumentó la cantidad de P en esta salida 36% (52.8 T). Los siguientes dos años presentaron volúmenes de extracción de agua bastante parecidos; sin embargo, la cantidad de P extraída varió, resultando 36% menor en 2010 que en 2009, pudiéndose suponer que está relacionado con la situación de bajo nivel, es decir, si el nivel es bajo, como en esos años, implica una extracción mayor de P.

Tabla 8. Magnitud de la extracción de fósforo respecto a la entrada total al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican la cantidad de fósforo extraída del embalse(T). El promedio (T/año) y su porcentaje con respecto a la entrada total, se muestran en cursivas.

	<i>Volumen (10^6m^3)</i>	<i>Masa (T)</i>	<i>Promedio (T/año)</i>		<i>Entrada total (T/año)</i>
2002	-209.0	43.7			
2003	-208.9	20.0	<i>-23.2</i>	<i>-21%</i>	109.7
2004	-190.0	18.9			
2005	-222.4	16.7			
2006	-135.7	19.3	<i>-15.0</i>	<i>-25%</i>	60.4
2007	-178.8	19.3			
2008	-191.3	52.8			
2009	-159.5	65.6	<i>-47.2</i>	<i>-74%</i>	63.7
2010	-156.3	23.3			

Tomando en cuenta esta proposición, se esperaría una disminución de la cantidad de masa de P en el sistema, lo que se traduce en cambios sustanciales en la dinámica de P en esos años en particular, p. ej. El aumento de la remineralización, que se discutirá más adelante.

La siguiente sección discute la entrada de P de la que se esperaría, al igual que su contraparte en aporte de agua, induzca cambios rápidos en las dinámicas del sistema.

Entrada de fósforo por inyección de agua

Como se discutió en la sección sobre la inyección de agua, la mayor cantidad de agua proveniente de la presa Colorines es ingresada al embalse durante la temporada de lluvias, como una implementación para que la presa recupere su nivel máximo.

Desde 2002, el comportamiento de P en esta componente fue variable en todos los años, pero se observa la tendencia de que ha incrementado a partir de la falta de esta gestión en 2005 y 2008, implicando mayores aportes de P en respuesta al aumento de la frecuencia en las operaciones de inyección de agua. En la figura 28, se observa la cantidad de P que ingresa al embalse y, a diferencia de la extracción, existe una relación más clara entre el volumen de agua ingresado por esta vía y la concentración de P.

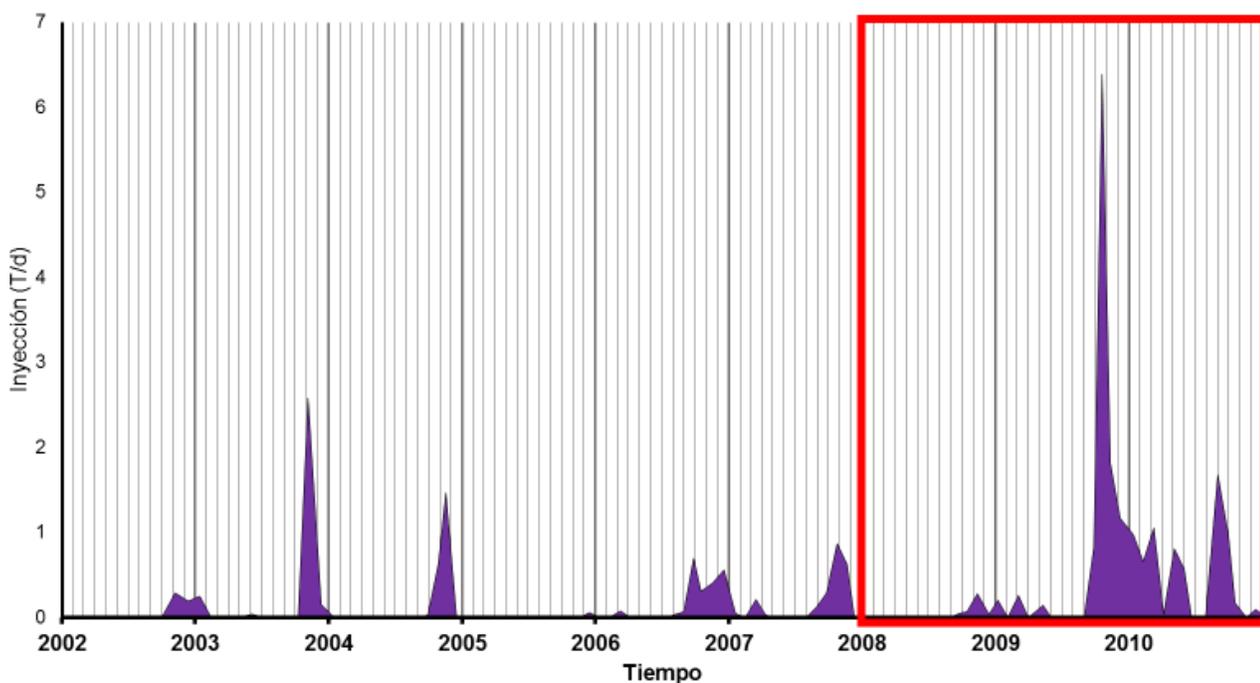


Figura 28 Inyección mensual de fósforo al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/d). El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010

A escala anual (Tabla 9), se puede mencionar la similitud de carga y entre 2002 (0.7 T) y 2008 (0.6 T), debido a su volumen de aporte, lo mismo puede asociarse para los años 2006 (2.2 T) y 2007 (2.1 T).

El año con la carga mayor desde 2002 y años anteriores fue 2009 (10.8 T), aunque en 2010 también hubo una carga parecida de 7.3 T, a pesar de que la inyección de agua en este año disminuyó casi la mitad que el año anterior; sin embargo, este término continuó por encima de otros años.

Se puede deducir que los eventos altos de inyección han proporcionado una importante cantidad de P al sistema, sobre todo en los últimos años del estudio (particularmente 2009 y 2010), por lo que, al igual que los afluentes, hay una relación directa de esta fuente de P con la cantidad de agua ingresada por esta vía. A partir de 2009, al modificarse la política de nivel de la presa, aumentando la inyección, ésta se convirtió en una fuente importante de P al sistema, a diferencia de los periodos comprendidos entre los años 2002-2007 y años anteriores, suponiéndose que hubo una nueva fuente de P, tal vez debiéndose a una disminución en la calidad del agua trasvasada.

La carga correspondiente a los altos ingresos de agua por inyección en 2009 y 2010, implicaron un aporte promedio mayor, pues esta entrada en el periodo de estudio 2008-2010 aumentó al menos 4 veces en comparación a los periodos anteriores (Tabla 9).

Tabla 9. Aporte promedio de fósforo por inyección de agua al embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican la cantidad de fósforo en el embalse (T). El promedio (T/año) se muestra en cursivas.

<i>Inyección por año</i>	<i>Volumen (10^6m^3)</i>	<i>Masa (T)</i>	<i>Promedio (T/año)</i>
<i>2002</i>	3.7	0.7	
<i>2003</i>	15.5	2.7	<i>1.4</i>
<i>2004</i>	9.7	2.1	
<i>2005</i>	0.2	0	
<i>2006</i>	18.5	2.2	<i>1.4</i>
<i>2007</i>	16.8	2.1	
<i>2008</i>	3.8	0.6	
<i>2009</i>	40.0	10.8	<i>6.1</i>
<i>2010</i>	21.4	7.3	

La siguiente sección integra los resultados hasta ahora discutidos, obteniendo una imagen espacio-temporal de éstos para el periodo de estudio, previo a los resultados y discusión del balance de masa de P. A partir de esta integración, se busca poner en contexto estos tres años de estudio (2008-2010) en el marco de los años anteriores para resaltar su comportamiento particular.

Variaciones temporales y espaciales del fósforo en el embalse

Ya que se han descrito los principales flujos de entrada y salida del P al sistema, ahora se explicarán los cambios en el embalse observados en las diferentes escalas de tiempo propuestas.

Como se dijo en Ramírez–Zierold, et al. (2015), la presa VB se estratificó todos los años aunque en Valeriano-Riveros, et al. (2014) se sugiere que podría cambiar la frecuencia de la mezcla por las situaciones de bajo nivel, lo cual afectaría la distribución de P (y otros nutrientes) en la capa hipolimnética. Sin embargo, VB siguió comportándose como un cuerpo monomítico cálido.

Por otro lado, se puede observar en la figura 29 que la carga interna de P en el embalse aumentó cada año. Algunos autores (Valdespino Castillo, 2008; Valeriano-Riveros, et al., 2014; Ramírez-Zierold, et al., 2013) opinan que para mejorar la calidad del agua en esta presa se deberían mantener niveles altos de agua. Se puede coincidir con esta proposición, pues durante cada bajada considerable (p. ej. Los años 2006, 2008 y en particular, 2009) la carga interna aumentó, sobre todo a partir del mínimo histórico de 2009, que representó 62% (608.3 T) más que en 2006 (378.1 T) y 55% más que en 2008 (334.9 T), sugiriendo una acumulación de P de los años anteriores.

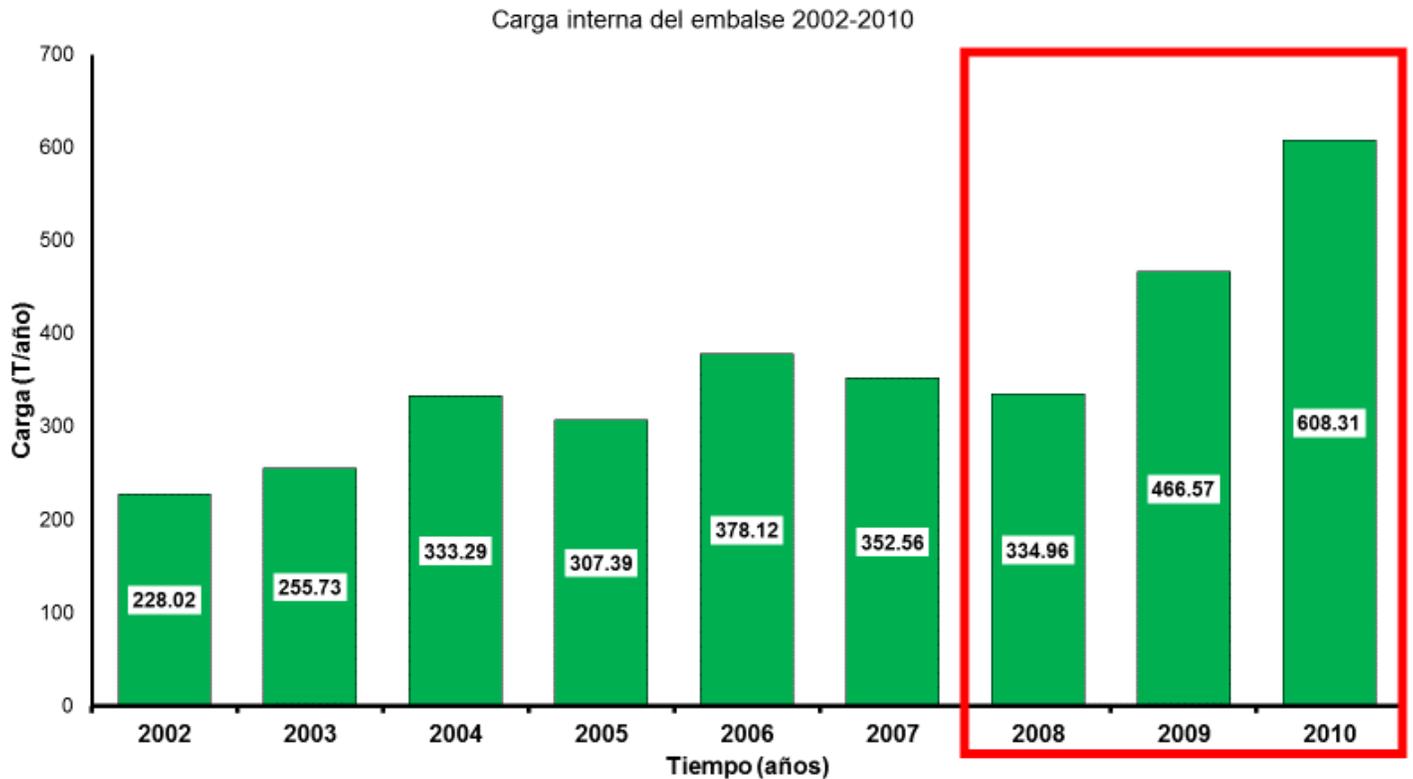


Figura 29 Carga interna anual del embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/año). Los números representan la carga interna anual. El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010

En la tabla 10, se muestra que los periodos de estudio que presentaron disminuciones de nivel considerables reportaron mayor carga interna promedio: el periodo 2005-2007 tuvo 287.8 T/año, y el siguiente periodo, 2008-2010 aumentó esa cantidad al 61% (469.9 T/año), debido a sus disminuciones de nivel consecutivas. Cabe mencionar que la mezcla durante estos periodos fue total. Por otro lado, si la profundidad de la columna de agua aumenta, se puede decir que se favorecen los procesos como el hundimiento y la sedimentación de P y, en este caso, no alcanza a mezclarse todo el sistema, observándose un aumento en la carga interna.

Tabla 10. Carga interna anual de fósforo en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/año). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican la carga interna de fósforo en el embalse (T/año). El promedio (T/año) se muestra en cursivas.

	<i>Volumen del embalse (10⁶m³)</i>	<i>Carga interna (T/año)</i>	<i>Promedio (T/año)</i>
2002	345.5	228.0	
2003	346.3	255.7	<i>272.3</i>
2004	354.5	333.2	
2005	328.1	307.3	
2006	273.1	378.1	<i>345.9</i>
2007	310.4	352.5	
2008	277.0	334.9	
2009	247.9	466.5	<i>469.9</i>
2010	341.5	608.3	

Disminuyendo la escala a nivel mensual (Figura 30), la variabilidad de las concentraciones de P se encuentra en función de las condiciones particulares de cada año. Durante la época de lluvias, que es cuando se lleva a cabo la recuperación del nivel del agua, se aprecia que la carga interna aumenta ligeramente cada año, sugiriendo que los factores como la lluvia y la inyección no tienen una influencia marcada como la que tiene la disminución del nivel de la presa correspondiente a la época de secas.

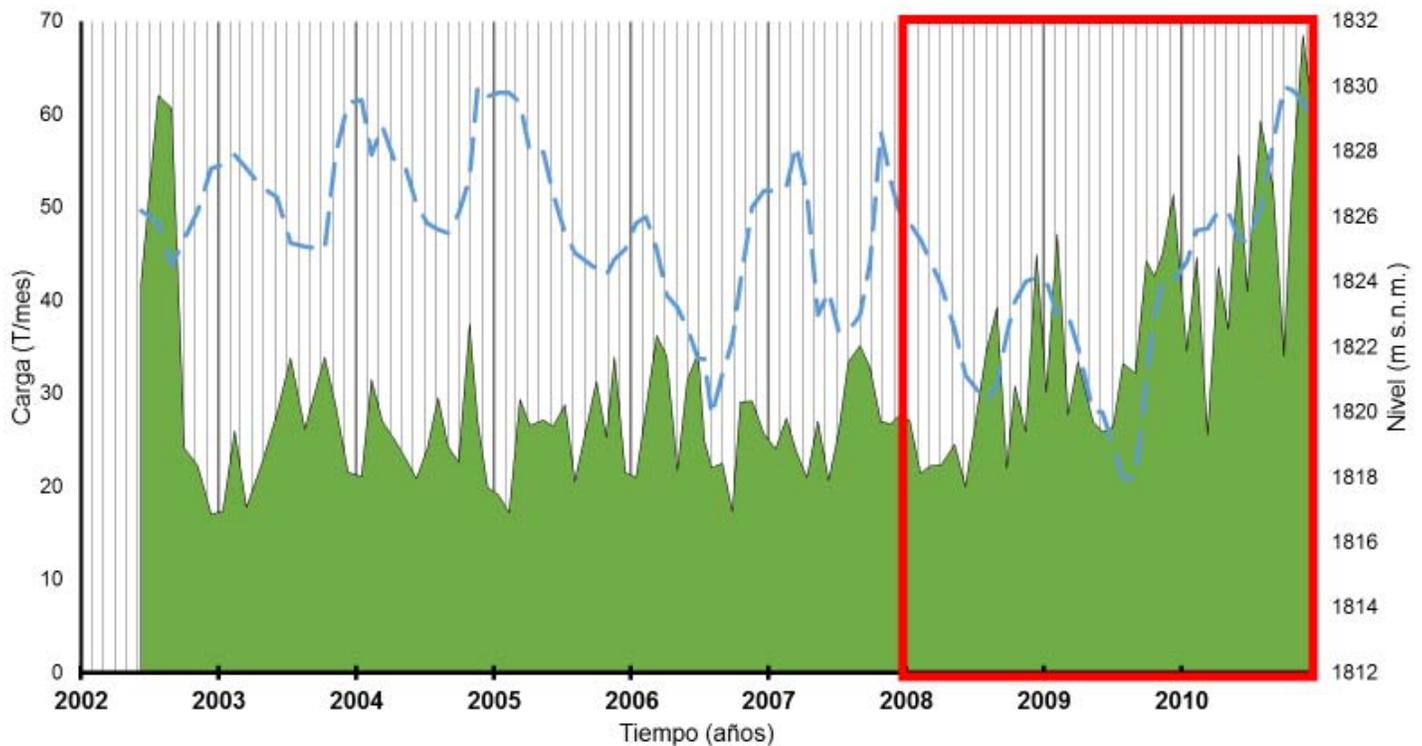


Figura 30 Carga interna mensual del embalse y nivel mensual de la presa de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en T/mes). La línea punteada azul indica el nivel mensual de la presa (en m s.n.m.). El recuadro rojo separa el periodo de estudio 2008-2010.

Considerando la entrada total al sistema (Tabla 11), se evidencia que la proporción entre la cantidad de P en el reservorio aumentó del periodo 2002-2005 al periodo 2008-2010. Al principio, esta carga total del reservorio equivalió al 23% de la entrada total, casi una cuarta parte de la entrada total correspondiente a ese periodo (27.4 T/año). En el periodo 2005-2007 aumentó a 44% (26.6 T/año) a costa de una disminución en el flujo de entrada total de 60.4 T/año. Para el último periodo, la proporción aumentó a 58%, esta vez, la entrada total fue mayor al periodo anterior (63.7 T/año), como se indicó en la sección de aporte por afluentes.

A partir de estas observaciones, se hace evidente que el aumento de la carga interna (P reservorio) aumentó su proporción con el tiempo, sobre todo en el último periodo de estudio; mientras que, las entradas al embalse (afluentes e inyección) fueron menores. Como se explicó en secciones anteriores, esto se debió a la disminución de flujo de agua en los afluentes, y se debe recordar que la inyección, aunque aumentó en el tiempo, sigue siendo una entrada menor que los afluentes, por lo que la afirmación sobre el aumento de la carga interna se vuelve congruente.

Las fluctuaciones del nivel y su implicación en la carga interna, podrían relacionarse con las diferencias de masa de P anuales (ΔP) observadas en el reservorio. En primera instancia, se observa que su proporción respecto al total tuvo la misma tendencia que la cantidad de P en el reservorio; sin embargo, la dirección del flujo de P se modificó, indicando que debería haber una fuente de P liberando materia al sistema y que esta fuente fue mayor en el periodo 2008-2010, particularmente en las condiciones determinadas para el año 2010.

Tabla 11. Relación del fósforo en el reservorio de Valle de Bravo y la entrada total durante el periodo 2002-2010 (en T/año). Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican el promedio de fósforo en el embalse(T/año). En cursivas se señala el porcentaje con respecto a la entrada total.

	2002-2005		2005-2007		2008-2010	
	<i>T/año</i>		<i>T/año</i>		<i>T/año</i>	
P embalse	27.4	<i>23%</i>	26.6	<i>44%</i>	37.1	<i>58%</i>
ΔP embalse	-7.7	<i>-6%</i>	4.3	<i>7%</i>	10.9	<i>17%</i>
Entrada total	109.7	<i>100%</i>	60.4	<i>100%</i>	63.7	<i>100%</i>

Para comprobar estas suposiciones, se continuará con la discusión del balance de masa de P, que indicó el comportamiento de P en el sistema en función de los términos discutidos en las secciones anteriores.

Balance de masa de fósforo.

El flujo neto (E-S) de PT en Valle de Bravo fue positivo desde 2002 a 2007, excepto durante la primera disminución notoria del nivel en 2006, lo cual indica que las entradas de P al sistema predominaron sobre las salidas. Es interesante notar que esta condición cambió y se mantuvo durante 2008 y la primera mitad de 2009, con mayor magnitud que el evento observado en 2006,

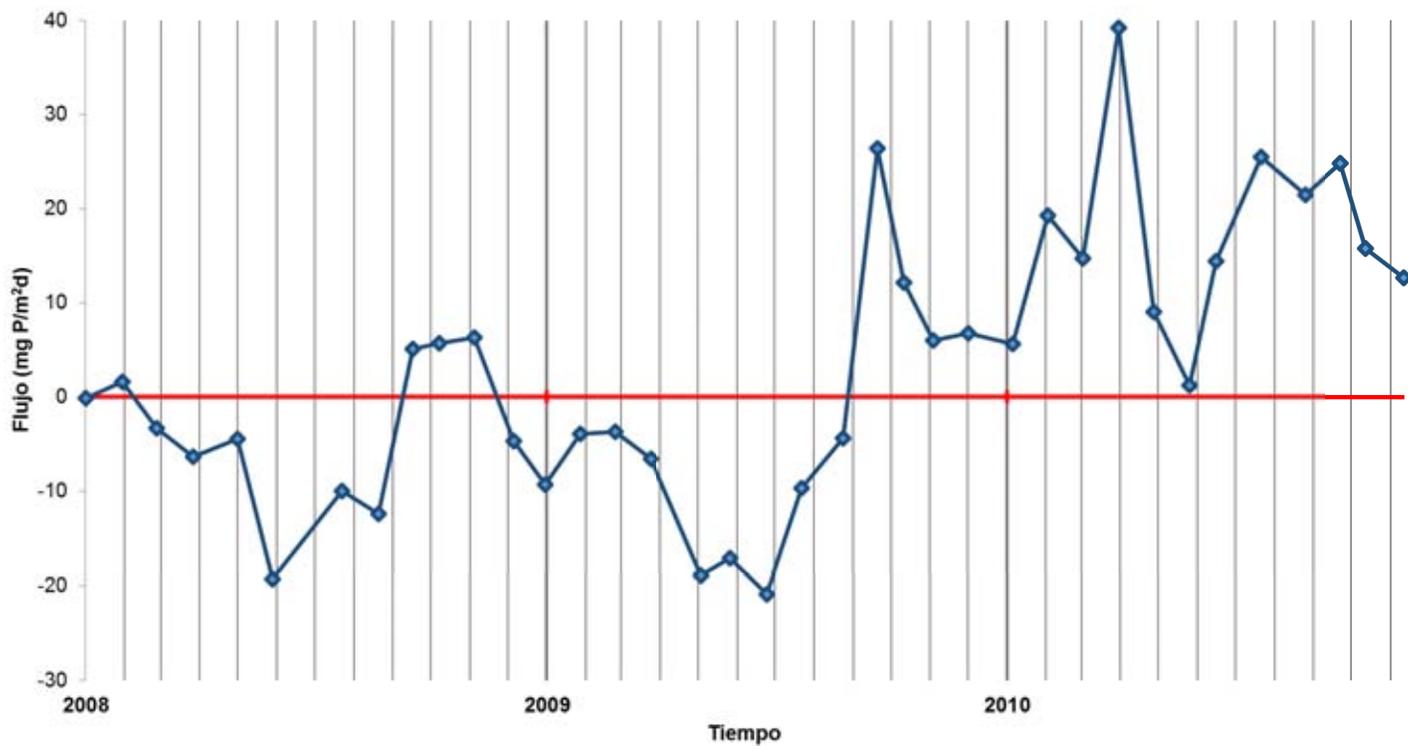


Figura 32 Flujo neto mensual de P en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en mg P /m²d). Flujo neto de P en el embalse 2008-2010. La línea roja aclara los flujos positivos y negativos. La sombra color verde indica los periodos de mezcla.

Las variaciones del flujo neto y de ΔP en el embalse determinaron el valor de los residuales del balance de masa de P, mostrando uno de los resultados más interesantes de esta tesis. Estos residuales ($\pm PIN$) determinan la condición de P en el embalse, es decir, indican si el sistema es un sumidero o una fuente de P. Por lo regular, el P tendió a precipitarse y acumularse en el sedimento ($-PIN$), como puede verse en la figura 33.

En el periodo 2002-2005 la sedimentación por año fue equivalente al 85% de la entrada total, con 102.3 T/año. Mientras que, en el periodo siguiente, disminuyó a 73% con 43.9 T/año (Tabla 5). Se puede observar que la sedimentación fue disminuyendo conforme se presentaban episodios de bajo nivel, dando lugar a eventos mayores en frecuencia y flujo de remineralización ($+PIN$). En Ramírez-Zierold *et al.*, (2010) atribuyen estos eventos a entradas netas menores al embalse.

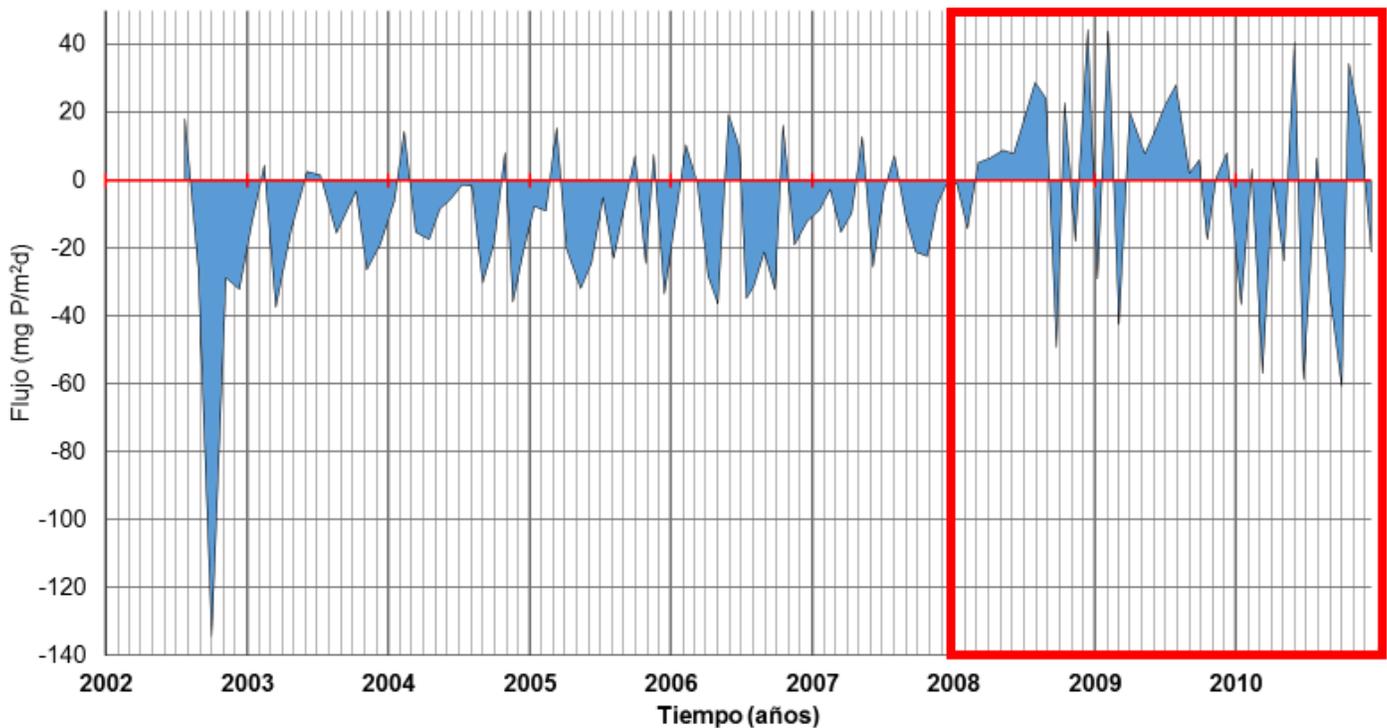


Figura 33 Procesos Internos Netos por mes en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2002-2010 (en mg P/m²d). La línea roja aclara los flujos positivos y negativos. El recuadro rojo separa el periodo 2008-2010.

Durante 2008 y 2009, debido a las condiciones particulares de aporte de afluentes, extracción y la sucesión de eventos de bajo nivel, la remineralización de P en 2008 (39.2 T) y 2009 (45.5 T) aportaron cantidades de P que no se habían reportado antes, sugiriendo que una posible fuente de P haya sido la liberación de P del sedimento. En el año 2010, el regreso de las condiciones regulares de los afluentes, junto con los altos eventos de inyección de agua, promovieron que el proceso de sedimentación aumentara (-87.0 T); sin embargo, se mantuvo por debajo del año 2002 (-110.2 T).

Las variaciones de volumen y de nivel repercuten en la dinámica de la mezcla. En la figura 34, la sedimentación (-PIN) tuvo lugar durante los periodos de mezcla en 2008 y 2009. En cambio, la remineralización (+PIN) comenzó y alcanzó su valor máximo durante la estratificación, sugiriendo que el P tiende a salir del sedimento cuando incrementa la temperatura hipolimnética, alcanzando las tasas máximas de liberación en el verano. Esta tendencia se modificó en 2010 respondiendo a las condiciones particulares en ese año. Se observa que la sedimentación dominó sobre la remineralización; sin embargo, en el verano de este año se observó un pequeño pico de remineralización, en el verano, igual que en los dos años anteriores. A finales de este año, la mezcla de invierno produjo una sedimentación de P.

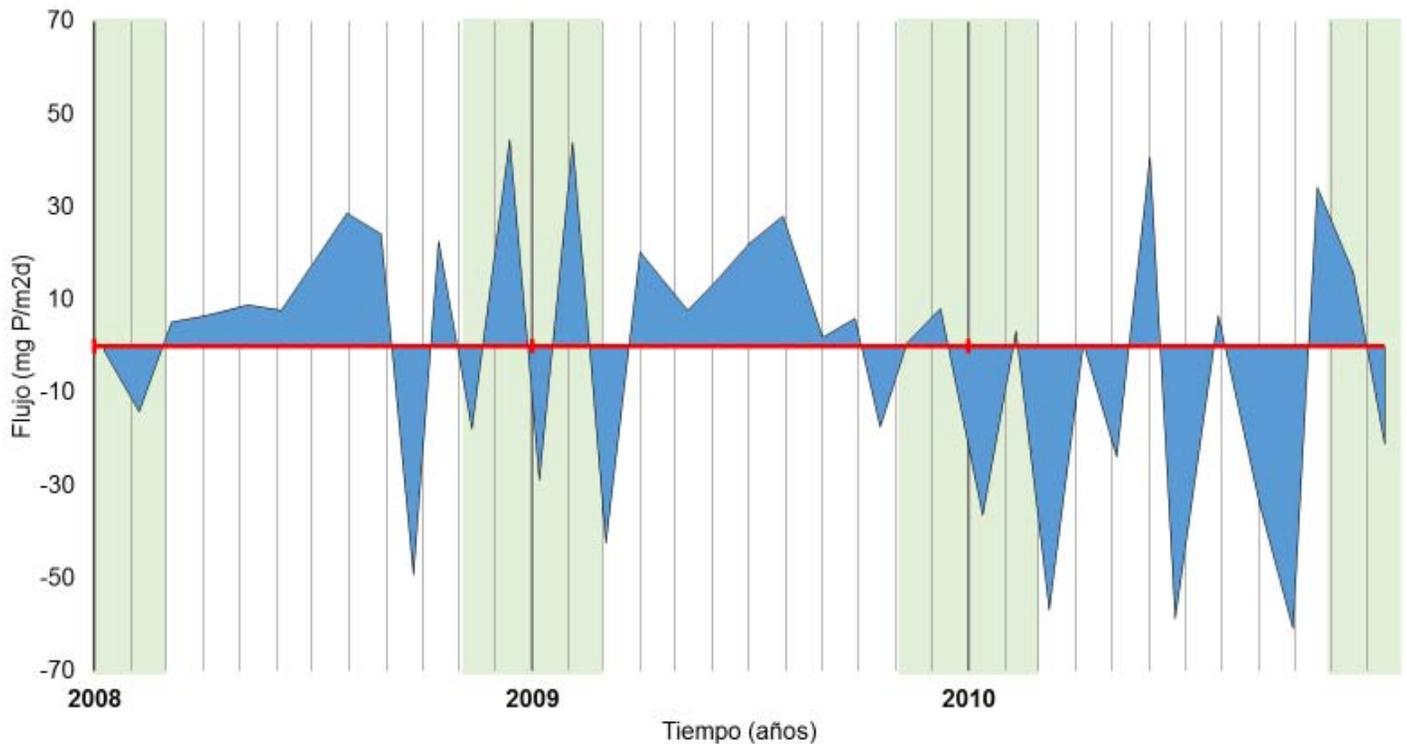


Figura 34 Procesos Internos Netos por mes en el embalse de Valle de Bravo durante el periodo 2008-2010 (en mg P/m²d). La línea roja separa los flujos positivos y negativos. Los recuadros sombreados en verde indican los periodos de mezcla.

Para resumir los resultados relacionados a las variaciones de P, a escala de periodos (Tabla 12), se puede ver que la masa de P en el reservorio varió entre periodos de estudio y que el valor más alto se encontró en los años 2008-2010.

La entrada total de P disminuyó alrededor de la mitad en los periodos siguientes a 2002-2005, debido a la disminución del caudal que tuvo lugar a partir de 2005. Aunque estas fuentes se hayan recuperado en 2010, los dos años anteriores tuvieron mayor influencia en el periodo comprendido entre 2008 y 2010.

Los drenajes fueron una fuente importante de P, aunque su flujo de agua fue menor.

El P ingresado por las operaciones de manejo de la presa tuvo un incremento importante en el periodo 2008-2010, convirtiéndose en 10% de la entrada total al embalse.

La sedimentación disminuyó en los periodos siguientes a 2002-2005, alcanzando a sedimentarse sólo 22% de la entrada total en el último periodo. Como se discutió, la remineralización se volvió una

fuelle de P notable en el tiempo, sobre todo entre los años 2008-2010. EnTces, se puede deducir que este proceso se ve favorecido cuando se presentan las siguientes condiciones:

- entradas de afluentes menores
- altos volúmenes de extracción
- bajo volumen y nivel de la presa

Se debe recalcar que los procesos internos se modificaron al no haber recuperación del nivel en 2008 y 2009. Aunque en 2010 se presentó una recuperación de las fuentes, la carga interna aumentó considerablemente debido a la liberación de P del sedimento de los años anteriores.

Se pueden relacionar estos resultados con aquellos reportados en Valeriano-Riveros *et al.* (2014). En ese artículo se menciona que durante los años 2008 y 2009, en VB se presentó un comportamiento de fitoplancT particular, pues las diatomeas y cianobacterias desarrollaron su mayor biomasa durante los periodos de estratificación y no durante la circulación vertical. Esta situación pudo deberse a que la remineralización de P del sedimento en ese tiempo haya migrado al epilimnion por eventos de mezcla en la frontera, según los patrones reportados en Monroy-Ríos (2004).

Tabla 12. Flujos del embalse 2002-2010. Se dividen los 3 periodos de estudio: 2002-2005 en naranja, 2005-2007 en azul y 2008-2010 en rojo. El año 2005 formó parte de dos estudios. Los números en negritas indican el promedio de fósforo en el embalse(T/año). En cursivas se señala el porcentaje con respecto a la entrada total.

	2002-2005		2005-2007		2008-2010	
	<i>T/año</i>		<i>T/año</i>		<i>T/año</i>	
P reservorio	27.4	23%	26.6	44%	37.1	58%
ΔP embalse	-7.7	-6%	4.3	7%	10.9	17%
Entrada total	120.5	100%	60.3	100%	63.8	100%
Afluentes						
Amanalco	66.5	61%	41.8	69%	35.7	56%
Molino	10.6	10%	6.1	10%	8.6	14%
González	3.9	4%	1.4	2%	2.2	4%
Carrizal	2.9	3%	0.9	1%	0.7	1%
Drenaje	24.4	22%	8.7	14%	10.5	16%
Inyección	1.4	1%	1.4	2%	6.0	10%
Extracción	-26.2	-22%	-15.0	-25%	-47.2	-74%
Sedimentación	-102.3	-85%	-43.9	-73%	-7.8	22%

4. Conclusiones

- I. El periodo de estudio 2008-2010 se caracterizó por la sucesión de dos años de nivel y volumen bajos de la presa de VB. Uno de estos años, el 2009, fue un mínimo histórico que no se había presentado en años previos, a diferencia del año 2010, que fue un año que se mantuvo bastante cercano a la capacidad máxima de almacenamiento.

Sobre los flujos que componen al balance hidrológico, se puede concluir que:

- II. Los afluentes continuaron como la principal fuente de agua que ingresa al sistema. Sin embargo, durante 2008 y 2009 se presentó una disminución inesperada a pesar de las precipitaciones regulares.
- III. El flujo de agua de los afluentes volvió a responder proporcionalmente a las lluvias extraordinarias extemporáneas de invierno en 2010.
- IV. El aporte de agua por los drenajes fue incrementando cada año. Durante los años de bajo nivel de la presa (2008 y 2009), tuvieron una contribución mayor a la entrada total de agua que en el año con alto nivel (2010) en el embalse.
- V. La inyección y extracción de agua, que son gestionadas por las políticas de manejo, produjeron cambios rápidos en el sistema, promoviendo dinámicas particulares tanto de agua como de P.

En cuanto a las variaciones de P relacionadas con las fuentes de agua, se concluye que:

- VI. Se esperaba un aumento de la cantidad P en los afluentes que ingresan al embalse análogo al incremento del flujo del agua durante 2009; sin embargo, esta suposición resultó acertada solamente hasta el año 2010.
- VII. Los drenajes contribuyeron con el 16% de la entrada total de P al embalse, por encima de otros aportes como el río Molino.
- VIII. La extracción de agua del embalse fue una importante salida de P durante 2008 y 2009.
- IX. El ingreso de P por inyección fue mayor en 2009, coincidiendo con el evento característico de ese año.

- X. La carga interna aumentó considerablemente en 2009 y 2010, sobre todo durante la transición de nivel mínimo al nivel máximo.
- XI. La cantidad de P en el reservorio fue equivalente a 58% de la entrada total al embalse, aportando evidencia sobre un aumento en la carga interna.
- XII. La mezcla total correspondiente a los años de nivel bajo promovió la liberación de P del sedimento durante la estratificación.

Respecto a estos tres años en el contexto de los periodos anteriores, se concluye que:

- XIII. Los eventos de bajo nivel que se venían presentando desde 2005 y 2006 aumentaron en el periodo de estudio 2008-2010
- XIV. El comportamiento general de 2010 mostró una tendencia parecida al periodo 2002-2005; sin embargo, tanto las medidas de recuperación del nivel, como la disminución del flujo de agua en los afluentes durante los dos años anteriores fueron insuficientes para observar esos resultados esperados.
- XV. Se presentó una disminución en el flujo de agua de los afluentes desde la segunda mitad del año 2005 hasta 2009.
- XVI. La inyección y la extracción de agua fueron variables entre años, pero se observó que después de los años con alta extracción y bajo nivel, en el siguiente se gestionó que aumentara el volumen de inyección. Por ejemplo, el caso de 2005 ($-222.4 \times 10^6 \text{m}^3$) y 2006 ($18.5 \times 10^6 \text{m}^3$), así como el caso de 2008 ($-191.3 \times 10^6 \text{m}^3$) y 2009 ($39.9 \times 10^6 \text{m}^3$).
- XVII. La entrada de P por inyección durante el lapso 2008-2010 aumentó hasta 4 veces, de 1.4 T/año a 6 T/año, respecto a otros periodos de estudio.
- XVIII. A pesar de la disminución de la entrada total externa en los tres periodos de estudio, la carga interna aumentó, sugiriendo que podría haber una nueva fuente de P en el sistema.

5. Recomendaciones

Se recomienda investigar a fondo los motivos de la disminución del caudal en los afluentes, así como el aumento del ingreso de P por inyección de la presa Colorines, a fin de asegurar o mejorar las discusiones aquí propuestas.

Sería interesante realizar métodos para la estimación directa de los Procesos Internos de P en el embalse para precisar los resultados expuestos, así como un estudio integral de la composición del fitoplancT en VB en el contexto de todos los años de datos.

La integración de los resultados de múltiples estudios que se han llevado a cabo en VB demuestran que debe continuar con esta tarea, así como la importancia que tiene el monitoreo para la elaboración de los balances de agua y masa de P. El conjunto de estos avances permitirá entender los procesos biogeoquímicos de VB con mayor precisión e identificar las tendencias en el largo plazo.

6. Referencias

- Alcocer, J. (2007). El agua epicontinental de México. *Ciencia*, 58, 26-35.
- Barjau-Aguilar, M. (2017). *Balance biogeoquímico comparativo de los elementos biolimitantes Nitrógeno y Fósforo en un embalse tropical eutrofizado: Valle de Bravo durante el periodo 2011-2015*. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
- Bashkin, VN, & Howarth, RW (2003). *Modern Biogeochemistry*. Kluwer Academic.
- Boström, B., Andersen, JM, Fleischer, S., & Jansson, M. (1988). Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. En *Phosphorus in freshwater ecosystems* (págs. 229-244). Springer.
- Castelán, E. (2001). Water management in the Mexico City metropolitan area: The hard way to learn. *Proceedings from the Symposium Frontiers in Urban Water Management: Deadlock or Hope*, (págs. 260-268).
- De Nys, E. (2015). *Cutzamala. Diagnóstico integral*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Banco Mundial.
- Downing, JA, Watson, SB, & McCauley, E. (2001). Predicting cyanobacteria dominance in lakes. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 58, 1905-1908.
- Elser, J., & Bennett, E. (2011). Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature*, 478, 29-31.
- González-Carranza, H. (2015). *Generalidades Valle de Bravo*. Recuperado el 12 de 03 de 2017, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15110a.html>
- Istvánovics, V. (2010). Eutrophication of lakes and reservoirs. *Lake ecosystem ecology*. Elsevier, San Diego, CA, 47-55.
- Kamarainen, AM, Penczykowski, RM, de Bogert, V, Hanson, PC, & Carpenter, SR (2009). Phosphorus sources and demand during summer in a eutrophic lake. *Aquatic Sciences*, 71, 214-227.
- Kirkwood, DS (1994). Sanplus segmented flow analyzer and its applications. Seawater analysis. *Skalar*. Amsterdam.
- Lewis, WM (1996). Tropical lakes: how latitude makes a difference. *Perspectives in tropical limnology*, 4364.
- Lewis, WM, & Wurtsbaugh, WA (2008). Control of lacustrine phytoplankton by nutrients: erosion of the phosphorus paradigm. *International Review of Hydrobiology*, 93, 446-465.
- Likens, GE (1992). The ecosystem approach: its use and abuse.
- Likens, GE (2010). *Biogeochemistry of inland waters*. Academic Press.
- Madigan, MT, Clark, DP, Stahl, D., & Martinko, JM (2010). *Brock Biology of Microorganisms 13th edition*. Benjamin Cummings.
- McMahon, KD, & Read, EK (2013). Microbial contributions to phosphorus cycling in eutrophic lakes and wastewater. *Annual review of microbiology*, 67, 199-219.
- Merino-Ibarra, M., Monroy-Ríos, E., Vilaclara, G., Castillo, FS, Gallegos, ME, & Ramírez-Zierold, J. (2008). Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir. *Aquatic Ecology*, 42, 335-345.
- Monroy-Ríos, E. (12 de 2004). *Hidrología del embalse de Valle de Bravo, México*. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

- Muñoz-del Valle, MM (2010). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Recuperado de*. Obtenido de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010
- Nandini, S., Merino-Ibarra, M., & Sarma, SS (2008). Seasonal changes in the zooplankton abundances of the reservoir Valle de Bravo (State of Mexico, Mexico). *Lake and Reservoir Management*, 24, 321-330.
- Nürnberg, GK (2009). Assessing internal phosphorus load--problems to be solved. *Lake and Reservoir Management*, 25, 419-432.
- Olvera-Viascán, V., Bravo-Inclán, L., & Sánchez-Chávez, J. (1998). Aquatic ecology management assessment in Valle de Bravo reservoir and its watershed. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 1, 277-290.
- Patronato Pro Valle de Bravo AC. (2014). *Sistema Cutzamala*. Recuperado el 25 de 08 de 2015, de <http://www.provalle.org.mx/sistema-cutzamala.html>
- Quintanilla-Terminel, JG (2012). Estudio de las variaciones de elementos biolimitantes (nitrógeno y fósforo) en la fuente de agua superficial más importante que abastece al Valle de México. Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM.
- Ramírez-Zierold, J. A. (2010). *Dinámica biogeoquímica de N y P de un embalse tropical eutrofizado (Valle de Bravo, Estado de México)*. Ph.D. dissertation, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramírez-Zierold, JA, Merino-Ibarra, M., Monroy-Ríos, E., Olson, M., Castillo, FS, Gallegos, ME, & Vilaclara, G. (2010). Changing water, phosphorus and nitrogen budgets for Valle de Bravo reservoir, water supply for Mexico City Metropolitan Area. *Lake and Reservoir Management*, 26, 23-34.
- Ramírez-Zierold, J., Merino-Ibarra, M., Valdespino-Castillo, PM, Sergio, C., Ardiles, V., Monroy-Ríos, E., . . . Carmona, J. (2013). Nuestro lago. 6ta parte: El valor del monitoreo. (A. C. Patronato Pro Valle de Bravo, Ed.)
- Ramírez-Zierold, J., Merino-Ibarra, M., Castillo-Sandoval, FS, Monroy-Ríos, E., López-Gómez, LM, Quintanilla-Terminel, JG, . . . Vilaclara-Fatjó, G. (2015). *Variabilidad de la mezcla vertical y el flujo de nutrientes asociado en un embalse estratificado, Valle de Bravo, México*. (JM Alcocer, M. Merino-Ibarra, & E. Escobar Briones, Edits.) Asociación Mexicana de Limnología, A.C. and Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. México.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2014). *Cuidar el agua es cosa de tod@s: El costo de traerla*. Recuperado el 23 de 08 de 2015, de <http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/costo.html>
- Smith, VH, Joye, SB, & Howarth, RW (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51, 351-355.
- Solomon, EP, Berg, LR, & Martin, DW (2008). *Biology* (Octava ed.).
- Valderrama, JC (1981). The Simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Marine chemistry*, 10, 109-122.
- Valdespino Castillo, PM (2008). Evaluación del metabolismo comunitario (producción bruta, respiración y producción neta) mediante la dinámica del oxígeno en el embalse de Valle de Bravo, México.
- Valeriano-Riveros, ME, Vilaclara, G., Castillo-Sandoval, FS, & Merino-Ibarra, M. (2014). Phytoplankton composition changes during water level fluctuations in a high-altitude, tropical reservoir. *Inland Waters*, 4, 337-348.
- Waters, S., & Webster-Brown, JG (2016). The use of a mass balance phosphorus budget for informing nutrient management in shallow coastal lakes. *Journal of Hydro-environment Research*, 10, 32-49.

- Wetzel, RG (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. Gulf Professional Publishing.
- Wyant, KA, Corman, JE, Corman, JR, & Elser, J J (2013). *Phosphorus, food, and our future*. Oxford University Press.
- Yu, Q., Chen, Y., Liu, Z., de Giesen, N., & Zhu, D. (2015). The Influence of a Eutrophic Lake to the River Downstream: Spatiotemporal Algal Composition Changes and the Driving Factors. *Water*, 7, 2184-2201.