



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

**MODELACIÓN DE LAS CARGAS DE CARBONO EN LA CUENCA HIDROLÓGICA DE LA PRESA  
VALLE DE BRAVO**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
SUHAILA ELIZABETH DÍAZ VALENCIA

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. ANNE M. HANSEN  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

COMITÉ TUTORAL  
DR. ÓSCAR FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
M. EN C. VICENTE FUENTES GEA, FACULTAD DE INGENIERÍA

JIUTEPEC, MORELOS. OCTUBRE 2020.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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:**

Presidente: Dr. Enrique César Valdez  
Secretario: M.C. Vicente Fuentes Gea  
Vocal 1: Dr. René Lobato Sánchez  
Vocal 2: Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles  
Vocal 3: Dra. Anne M. Hansen

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. Anne M. Hansen

---

**FIRMA**

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante y para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de ser parte de esta escuela y por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Al Instituto Mexicano de Tecnología del agua por el espacio y acceso a las instalaciones.

A la Dra. Anne Hansen por permitirme desarrollar este trabajo bajo su dirección, por su apoyo, su consejo y su asesoría para la realización de esta tesis.

Al Dr. Óscar Fuentes Mariles y al M. C. Vicente Fuentes Gea, por sus comentarios y observaciones realizadas cada semestre para la mejora de este trabajo. Asimismo, agradezco al Dr. René Lobato y al Dr. Enrique César por la revisión de este escrito, y por sus acertadas observaciones.

Al Dr. Martyn Futter por proporcionarme el modelo INCA-C y por la asesoría brindada para el uso de este modelo.

A los integrantes del Laboratorio de Hidrogeoquímica, por su paciencia, la buena vibra, sus comentarios y la retroalimentación del trabajo realizado.

A Dios, por permitirme estar aquí, por la vida, por sus tiempos. A mi familia y amigos, por su apoyo y ánimo durante este tiempo.

A Enrique Albores, por su paciencia infinita, sus consejos y su ánimo durante estos dos años, te amo.

## Contenido

Resumen .....	1
Abstract .....	3
1 Introducción .....	5
1.1 Hipótesis .....	6
1.2 Objetivos .....	6
1.2.1 General .....	6
1.2.2 Específicos .....	6
2 Marco teórico .....	7
2.1 El ciclo del carbono .....	7
2.2 Formas del carbono .....	8
2.3 Fuentes de carbono .....	9
2.3.1 Fuentes puntuales .....	10
2.3.2 Fuentes difusas .....	10
2.4 Estratificación térmica .....	11
2.5 Eutroficación .....	12
2.6 Evaluación de carga de contaminantes .....	13
2.6.1 Descripción del modelo INCA-C.....	14
2.6.2 Ecuaciones del modelo INCA-C.....	16
3 Antecedentes del área de estudio.....	19
3.1 Área de estudio.....	19
3.2 Evaluación de cargas en la cuenca hidrológica.....	20
4 Metodología .....	23
4.1 Delimitación de la cuenca.....	23
4.2 Análisis del inventario de emisiones.....	24
4.3 Selección del modelo .....	28
4.4 Obtención de los parámetros de entrada al modelo INCA-C .....	29
4.4.1 Cobertura de usos de suelo:.....	29
4.4.2 Hidrología .....	30
4.4.3 Clima .....	33
4.4.4 Fuentes de emisión.....	37
4.5 Determinación de carga externa de C con el modelo INCA-C.....	38
4.5.1 Atenuación natural .....	40
4.5.2 Verificación del modelo.....	40
4.6 Evaluación de escenarios de control de cargas .....	42
5 Resultados .....	43
5.1 Análisis de inventario.....	43
5.2 Parámetros de entrada al modelo INCA-C.....	47
5.3 Determinación de carga externa de carbono .....	49
5.4 Evaluación de escenarios de reducción de carga externa.....	52
6 Conclusiones.....	55
7 Referencias .....	57
Anexos .....	65

## Índice de tablas

Tabla 1.	Procesos y reacciones asociados al carbono. ....	9
Tabla 2.	Formas de carbono y su origen .....	10
Tabla 3.	Variables de estado y series de tiempo usados en el modelo .....	15
Tabla 4.	Parámetros requeridos en el modelo .....	15
Tabla 5.	Ecuaciones base del modelo INCA-C.....	16
Tabla 6.	Evaluaciones de carga de nutrientes. ....	21
Tabla 7.	Información para el cálculo de volúmenes de agua residual y de cargas de DBO <sub>5</sub> utilizadas en CONAGUA-IMTA (2015). ....	21
Tabla 8.	Inventario de emisiones de DBO <sub>5</sub> de la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo .....	22
Tabla 9.	Subcuencas y áreas de aportación.....	24
Tabla 10.	Población y volúmenes de agua residual no tratada por subcuenca.....	25
Tabla 11.	Aporte de agua por actividad trutícola. ....	25
Tabla 12.	Producción pecuaria en la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo. ....	26
Tabla 13.	Aporte de DBO <sub>5</sub> por tipo de ganado.....	26
Tabla 14.	Superficie que abarca cada subcuenca en los municipios Amanalco y Valle de Bravo.....	27
Tabla 15.	Comparación de modelos que evalúan DBO <sub>5</sub> y carbono .....	28
Tabla 16.	Área de cobertura de usos de suelo y vegetación por subcuenca.....	29
Tabla 17.	Estaciones hidrométricas de la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	33
Tabla 18.	Estaciones climatológicas en la cuenca hidrológica .....	34
Tabla 19.	Estaciones climatológicas con mayor área de influencia por subcuenca. ....	35
Tabla 20.	Datos de las PTAR en operación en la cuenca.....	37
Tabla 21.	Información disponible para la verificación de los resultados de carga externa de carbono.....	40
Tabla 22.	Emisiones de C por fuentes puntuales. ....	43
Tabla 23.	Emisión total de C por fuentes puntuales por subcuenca. ....	43
Tabla 24.	Emisión total de C por fuentes difusas por subcuenca. ....	44
Tabla 25.	Emisión de C por fuentes difusas: agua residual no tratada.....	45
Tabla 26.	Emisión de C por fuentes difusas: Ecurrimiento de usos de suelo.....	45
Tabla 27.	Emisión de DBO <sub>5</sub> y C por actividad pecuaria.....	46
Tabla 28.	Parámetros de entrada.....	47
Tabla 29.	Carga externa por fuentes puntuales.....	49
Tabla 30.	Carga externa por fuentes difusas.....	49
Tabla 31.	Resultados de los estadísticos aplicados para evaluar la simulación.....	52
Tabla 32.	Reducción de la CE de carbono por diferentes escenarios. ....	52
Tabla 33.	Estación climatológica 15374 Agua Bendita.....	65
Tabla 34.	Estación climatológica 15368 El Fresno .....	67
Tabla 35.	Estación climatológica 15241 San Pedro Tenayac .....	68
Tabla 36.	Estación climatológica 15130 Presa Valle de Bravo (CFE).....	70
Tabla 37.	Estación hidrométrica 18489 El Salto (Amanalco) .....	73
Tabla 38.	Estación hidrométrica 18169 El Molino .....	74
Tabla 39.	Estación hidrométrica 18226 San Diego.....	75

Tabla 40.	Estación hidrométrica 18275 Santa Mónica (Yerbabuena).....	76
Tabla 41.	Estación hidrométrica 18279 Carrizal .....	77

## Índice de figuras

Figura 1.	Representación del ciclo de carbono .....	7
Figura 2.	Entradas y salidas de carbono en una cuenca hidrológica. ....	10
Figura 3.	Estratificación térmica de un lago.....	11
Figura 4.	Componentes del sistema de oxigenación del cono Speece. ....	13
Figura 5.	Mapa de ubicación de la presa de Valle de Bravo y su cuenca hidrológica.....	19
Figura 6.	Subcuencas de la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo.....	23
Figura 7.	Clasificación de fuentes de emisión.....	24
Figura 8.	Usos de suelo y vegetación en la cuenca .....	30
Figura 9.	Determinación del cauce principal.....	31
Figura 10.	Cálculo de la longitud del cauce principal. ....	31
Figura 11.	Determinación del ancho del cauce principal en Google Earth Pro.....	32
Figura 12.	Medición en campo del ancho del cauce principal. ....	32
Figura 13.	Caudales promedio diarios de la estación Molino. ....	33
Figura 14.	Polígonos de Thiessen para la cuenca de la presa Valle de Bravo. ....	34
Figura 15.	Interfaz del modelo PERSiST.....	35
Figura 16.	Hoja de datos de precipitación y temperatura para PERSiST. ....	36
Figura 17.	Hoja de parámetros de entrada para el modelo PERSiST. ....	36
Figura 18.	Hoja de datos de entrada al modelo al modelo INCA-C.....	38
Figura 19.	Hoja de parámetros de entrada al modelo INCA-C.....	38
Figura 20.	Interfaz del modelo INCA-C para su ejecución.....	39
Figura 21.	Aporte de emisión y carga externa (CE) de carbono por tipo de fuente en la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo.....	50
Figura 22.	Aporte de emisión y carga externa (CE) de carbono por subcuenca a la presa Valle de Bravo.....	50
Figura 23.	Porcentajes de atenuación por tipo de fuente. ....	51

## Resumen

La eutroficación de cuerpos de agua, como lagos y embalses, se define como el enriquecimiento de nutrientes (nitrógeno y fósforo) derivado de la aportación proveniente tanto del propio cuerpo de agua (carga interna) como de la cuenca hidrológica (carga externa). Esta condición puede incrementar la producción primaria, el desarrollo de algas y plantas macrófitas, la disminución del oxígeno disuelto en la columna de agua, la acumulación de carbono e incremento en las demandas de oxígeno en agua y sedimento.

Derivado de ello, se han propuesto estrategias para contrarrestar la eutroficación de cuerpos de agua mediante el control de la carga de nutrientes, tanto externa como interna, que para su diseño e implementación se requiere de una evaluación de la cantidad que está ingresando al cuerpo de agua y la dinámica con el tipo de estrategia a utilizar.

Para entender la dinámica de carbono (C) en un cuerpo de agua se han desarrollado balances de masas de C en los cuales se considera la acumulación en sedimento, las salidas y las entradas del contaminante (carga interna y externa). La carga externa (CE), es el resultado de las diferentes actividades y procesos que se desarrollan en la cuenca hidrológica, que aportan C de manera puntual o difusa al agua de los ríos que desembocan al cuerpo de agua. Durante su transporte pueden ser atenuadas por procesos como dilución, sorción y degradación, los cuales dependen de las características de la cuenca, afectando el transporte de C al cuerpo de agua. Sin embargo, los cambios en la cuenca hidrológica modifican las aportaciones de C y los procesos de atenuación, impactando sobre la CE al cuerpo de agua. Es por ello, que el objetivo de esta tesis fue determinar la carga externa de carbono (CE-C) y su atenuación natural en la cuenca hidrológica de un cuerpo de agua.

Se delimitó la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo y se aplicó un inventario de emisiones para identificar las fuentes y cargas de emisión de carbono. Para la determinación de la CE-C y de la atenuación natural, se seleccionó y utilizó el modelo INCA-C (Integrated Catchments model for Carbon), desarrollado por Futter et al. (2007), para evaluar el transporte de carbono en cuencas hidrológicas. Los resultados de CE-C obtenidos con la modelación matemática, fueron comparados y verificados con información disponible de estaciones hidrométricas y con información sobre calidad del agua de los ríos, obteniendo un error del 40%.

Los resultados obtenidos en este trabajo indicaron que, de la emisión total de carbono (891 t/año) en la cuenca hidrológica, 90% es emitido por fuentes difusas y 10% por fuentes puntuales; además, se determinó que la CE-C corresponde al 40%, indicando una atenuación natural del 60% en la cuenca hidrológica, observándose que la carga de fuentes difusas se atenúa un 54%, mientras que se atenúa sólo 6% las cargas de fuentes puntuales.

Las cargas de carbono dependen del tipo de emisión, siendo para este caso la mayor aportación por la actividad pecuaria y las descargas de agua residual no tratada (fuentes difusas). Asimismo, las características de la cuenca hidrológica influyen en la atenuación de C durante su movilización que, en conjunto, dan lugar a la carga externa que recibe el cuerpo de agua.



Se propusieron y evaluaron cinco escenarios para la reducción de la CE-C: *i*) reducción del 68% de la emisión en las descargas de agua residual de poblaciones urbanas (mayor a 2,500 hab) de Valle de Bravo mediante su tratamiento; *ii*) reducción del 50% de emisión en las descargas de agua residual de poblaciones rurales (menor a 2,500 hab) a través de la implementación de humedales; control de la emisión por *iii*) actividad trutícola, *iv*) actividad porcícola y *v*) actividad bovina, reduciendo el 50% de la emisión en cada una ellas.

Se encontró la mayor reducción en la emisión total (7%) y en la CE-C (33%) al reducir las emisiones por actividad bovina (*v*). El tratamiento del agua residual de poblaciones urbanas (*i*) y el control de la emisión por actividad trutícola (*iii*), reducen la emisión total en un 5 y 4% respectivamente, disminuyendo la CE-C un 38% en ambos casos. La CE-C resultante de aplicar los escenarios *ii*) y *iv*) no presentó cambios significativos, observándose lo mismo en la carga de emisión.

## Abstract

The eutrophication of water bodies, such as lakes and reservoirs, is defined as the enrichment of nutrients (nitrogen and phosphorus), derived from the contribution from the water body itself (internal load) and the hydrological basin (external load). This condition can increase primary production, the development of algae and macrophytes, the decrease of dissolved oxygen in the water column, the accumulation of carbon and the increase in oxygen demands in water and sediment.

In consequence, strategies for controlling nutrient loads, external and internal, have been proposed to control eutrophication in waterbodies. One example is the hypolimnetic oxygenation, which consists of supplying oxygen in the hypolimnium of water bodies, that for its design and implementation its important to evaluate the loads of nutrients and carbon that are entering into the water body and the effects that it may have on them.

To understand the dynamics of carbon (C) in a body of water, C mass balances have been developed in which the accumulation in sediment, carbon outlets and inlets (internal and external loads) are considered. The external load of C (EL-C) is the result of the different activities and processes that take place in the catchment, which emit C as point or diffuse sources to the rivers that flow into the water body. During their transport, loads can be attenuated by processes such as dilution, sorption and degradation, which depend on the characteristics of the basin, affecting the transport of C. However, the changes in the catchment modify the C contributions and the attenuation processes, impacting the EL-C on the water body. For this reason, the objective of this thesis was to determine the external carbon load (EL-C) and its natural attenuation in the hydrological basin of a water body.

The hydrological basin of the Valle de Bravo reservoir was delimited and an emissions inventory was applied to identify carbon emission sources and loads. To obtained the EL-C and thereby, the natural attenuation, the INCA-C model (Integrated Catchments model for Carbon), developed by Futter *et al.* (2007) to evaluate carbon transport in hydrological basins, was selected. The EL-C results obtained with the modeling were compared and verified with available information from hydrometric stations and with data on river water quality, obtaining an acceptable difference of about 40%.

The results obtained in this thesis indicated that of the total carbon emission (891 t/year) in the catchment, 90% is emitted by diffuse sources and 10% by point sources; in addition, it was determined that the EL-C corresponds to 40%, indicating a natural attenuation of 60% in the basin, detecting that the load from diffuse sources is attenuated by 54% while point sources are only attenuated by 6%.

Carbon loads depend on the type of emission, being in this case the greatest contribution from livestock activity and untreated wastewater discharges (diffuse sources). Likewise, the characteristics of the basin influence the attenuation of C during its mobilization, which together influences the external load received by the water body.

Five scenarios were proposed and evaluated to reduce the external carbon load: *i*) 68% reduction of the emission in the wastewater discharges of urban populations (more than 2,500 inhab) of Valle de Bravo through its treatment, *ii*) 50% reduction of the emission in the wastewater discharges of rural populations (less than 2,500 inhab) through the implementation of wetlands, control of the emission by *iii*) trout production *iv*) pig farming and *v*) cattle raising, reducing 50% of the emission in each one.

The greatest decrease in total emission and in EL-C was found when reducing emissions from cattle raising (*v*), with 7 and 33% respectively. The wastewater treatment of urban populations (*i*) and the control of the emission by trout production (*iii*), reduce the total emission by 5 and 4% respectively, decreasing the EL-C by 38% in both cases. The EL-C resulting from applying scenarios *ii*) and *iv*) did not present significant changes, observing the same in the emission loads.

## 1 Introducción

El carbono (C) es un elemento que está presente en la atmósfera, la superficie terrestre, los seres vivos y los océanos. Los ecosistemas acuáticos de agua dulce tienen un rol en el ciclo de este elemento ya que procesan, transportan y retienen carbono orgánico e inorgánico que proviene de la cuenca hidrológica en forma de agua residual, sedimentos y de la deposición atmosférica (cargas externas), así como también de la liberación de partículas de agua y sedimento del mismo cuerpo de agua (cargas internas) (Raupach *et al.*, 2001; Tranvik *et al.*, 2009; Butman *et al.*, 2016).

Aunque ambas formas de carbono (orgánico e inorgánico) mantienen relación entre sí por los procesos en los que están involucrados, el carbono orgánico es asociado principalmente a la materia orgánica disuelta o particulada, que se encuentra depositado en el suelo y en el agua de la cuenca hidrológica (Dodds y Whiles, 2002).

El carbono inorgánico se relaciona con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en la atmósfera, los minerales y rocas que contienen carbono en su estructura, los compuestos que conforman el sistema de carbonatos en agua, y a las actividades biológicas (fotosíntesis, respiración y degradación de materia orgánica) que producen CO<sub>2</sub> y metano (CH<sub>4</sub>) (Dodds y Whiles, 2002; Palau *et al.*, 2010; Ajani *et al.*, 2013).

El transporte de C hacia el cuerpo de agua es influenciado por las características de la cuenca y los escurrimientos que en ella se generan, las fuentes que lo emiten, puntuales o difusas, y de los procesos que ocurren en su movilización provocando la atenuación o incremento de la carga (Dodds y Whiles, 2002; Pennino *et al.*, 2016; Mei-Yan *et al.*, 2019). Debido a la alteración de las condiciones de la cuenca hidrológica con el incremento de las actividades humanas que en ella se desarrollan, se genera una mayor cantidad de carbono y otros nutrientes como nitrógeno y fósforo, provocando la eutroficación.

Esta condición ocasiona el incremento de la materia orgánica, la disminución del oxígeno disuelto y la proliferación en exceso de algas y cianobacterias, que van deteriorando la calidad del agua y, por ende, la disponibilidad de esta para los diferentes usos a la que es destinada (Cooke *et al.*, 2005; Niemistö *et al.*, 2019). En consecuencia, se han propuesto e implementado diferentes técnicas para contrarrestar la eutroficación en cuerpos de agua, que se enfocan tanto en la carga externa, con la disminución de actividades antropogénicas, como en la carga interna, con la implementación de tecnologías en cuerpos de agua como lo es la oxigenación hipolimnética (Beutel y Horne, 1999; Cooke *et al.*, 2005; Bierlein *et al.*, 2017).

Sin embargo, para la selección, diseño e implementación de estas estrategias, es necesario realizar una evaluación de la cantidad de nutrientes que se generan y llegan de la cuenca hidrológica, así como del propio cuerpo de agua. Para ello, se han aplicado diferentes metodologías como lo son los balances de masas de cuerpos de agua considerando las entradas y salidas de nutrientes (Palau *et al.*, 2010, Hansen *et al.*, 2017); la realización de monitoreos de agua y sedimento en cuerpos de agua y ríos tributarios para la determinación de cargas interna y externa (Olvera Viascán, 1992; Ramírez Zierold *et al.*, 2010; Márquez

Pacheco, 2013; Pacheco *et al.*, 2013); la elaboración de inventarios de emisiones de diferentes fuentes de emisión para estimar la carga externa que recibe el cuerpo de agua (Corzo Juárez, 2009; Villanueva Beltrán, 2011; CONAGUA-IMTA, 2015); y la aplicación de modelos que describen el transporte hacia el cuerpo de agua estimando la carga externa (Whitehead *et al.*, 1998; Futter *et al.*, 2007; Mayorga *et al.*, 2010; Ruiz Castro, 2018; Jayme-Torres y Hansen, 2018).

Varios de estos métodos se han aplicado a la presa Valle de Bravo, Estado de México, que pertenece al Sistema Cutzamala, que se emplea para abastecer de agua potable a gran parte de la Zona Metropolitana del Valle de México. Como presenta una condición eutrófica, se propuso un sistema de oxigenación hipolimnética (SOH) para el saneamiento y recuperación de la calidad del agua de la presa.

Para evaluar el impacto de este método sobre el contenido de carbono en el cuerpo de agua, se propuso un balance de masas de carbono basado en el propuesto por Hansen *et al.* (2017) en el que se evalúan las demandas de oxígeno. Este balance de carbono considera las salidas del cuerpo de agua, la acumulación en sedimento y las entradas, dentro de las cuales se encuentran la carga interna y externa. Sin embargo, no se ha evaluado la carga externa de C por lo que no se ha considerado la atenuación natural que ocurre desde su emisión hasta que llega al cuerpo de agua.

Por lo anterior, para el desarrollo de este trabajo se plantearon la hipótesis y los objetivos siguientes:

## **1.1 Hipótesis**

La carga externa de carbono a un cuerpo de agua depende de las características y la ubicación de las fuentes de emisión influyendo en la atenuación natural durante su movilización.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Determinar la carga externa de carbono de diferentes fuentes de emisión y la atenuación natural en la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo.

### **1.2.2 Específicos**

- Analizar el inventario de emisiones de demandas de oxígeno (CONAGUA-IMTA, 2015) para la cuenca hidrológica de la presa de Valle de Bravo.
- Estimar la carga externa de carbono a la presa Valle de Bravo.
- Verificar las cargas estimadas con datos de campo.
- Determinar la atenuación natural de carbono por tipo de emisión y subcuenca.
- Evaluar escenarios de control de carga externa de carbono.

## 2 Marco teórico

En este apartado se describen el ciclo de carbono, las formas en que se encuentra este elemento en el agua, las fuentes y los procesos que lo generan. Además, se presenta el concepto de la estratificación térmica, la eutroficación y las técnicas de saneamiento, describiendo brevemente el sistema de oxigenación hipolimnética. Finalmente, se presentan los métodos de evaluación de cargas en donde se proporciona información del modelo INCA-C.

### 2.1 El ciclo del carbono

El carbono (C) es un elemento que interactúa con la atmósfera, los suelos y los océanos; es un constituyente básico de todos los compuestos orgánicos y es importante para la fijación de energía a través de la fotosíntesis. El ciclo de C (Figura 1) comienza con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) proveniente de la atmósfera que ingresa al ecosistema por medio de la fotosíntesis o por difusión.

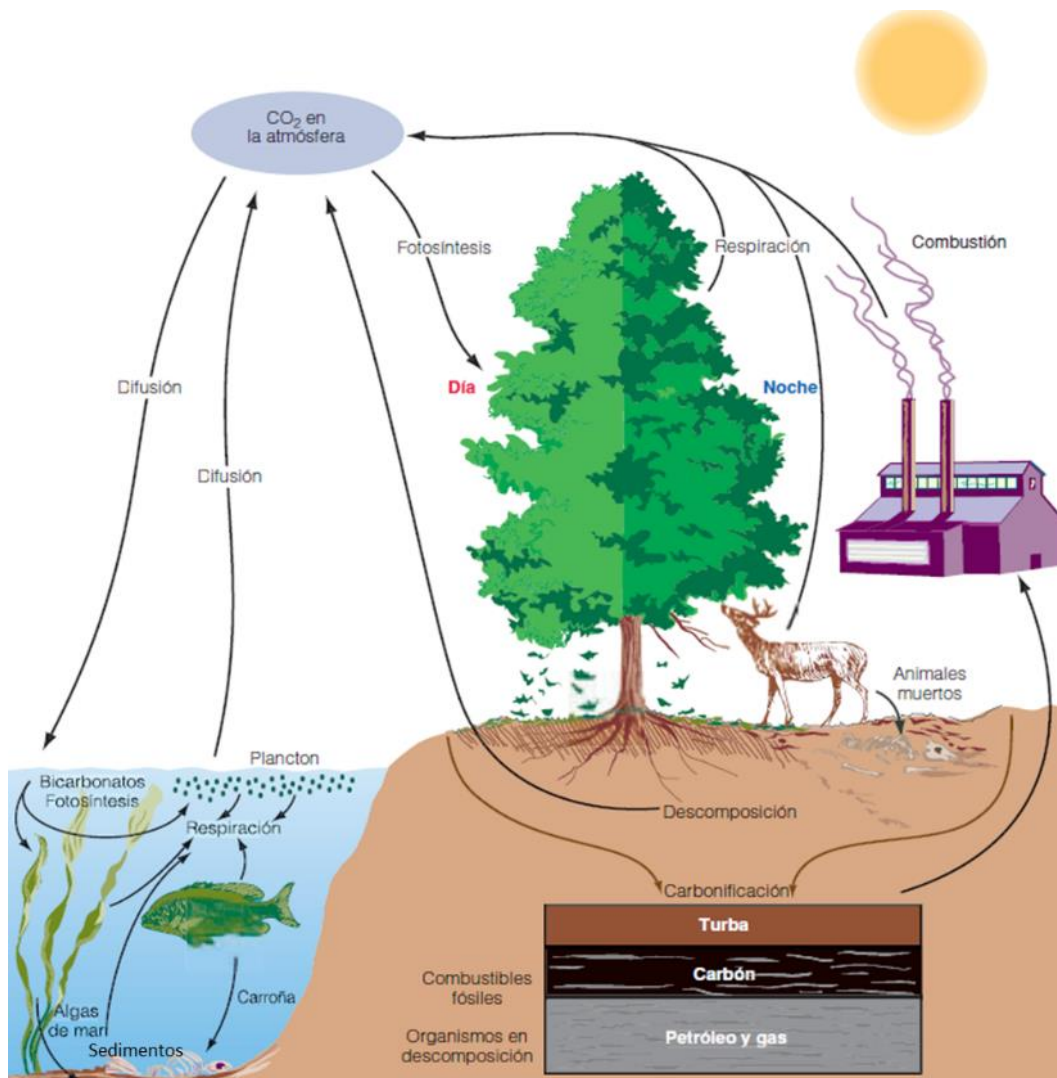


Figura 1. Representación del ciclo de carbono (Fuente: Smith y Smith, 2007).

De manera general, la entrada de este nutriente al ecosistema es por medio de la fotosíntesis, ya que los organismos fotoautótrofos fijan  $\text{CO}_2$  de la atmósfera en sustancias orgánicas mediante el empleo de la energía de la luz solar (Tortora *et al.*, 2007). Una vez que el carbono va siendo digerido y transformado del  $\text{CO}_2$ , la energía producida se va transfiriendo a través de la cadena trófica pasando a los herbívoros y luego a los carnívoros. Consecuentemente, el carbono vuelve a ser liberado a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  derivado de la respiración, con lo que el ciclo vuelve a iniciar (Smith y Smith, 2007); o a través de la excreción y descomposición de organismos, en donde los descomponedores además de liberar  $\text{CO}_2$  con la oxidación de la materia orgánica, también lo hacen por medio de la respiración. Asimismo, el carbono puede ser almacenado en el subsuelo dando origen a los combustibles fósiles como el petróleo, que posteriormente será devuelto a la atmósfera por medio de la combustión (Elías, 2009).

En el caso de los ecosistemas acuáticos, el ciclo ocurre de una manera similar. Los organismos utilizan el dióxido de carbono proveniente de la atmósfera y que se difunde en las capas superficiales del agua o del que está presente en forma disuelta y lo convierten en tejido vegetal. Después pasa a los productores y el  $\text{CO}_2$  que es producido a través de la respiración puede ser reutilizado o reintroducido en la atmósfera por difusión desde la superficie del agua hacia el aire. Además, puede encontrarse el carbono en los sedimentos por la materia orgánica particulada y el sistema de carbonatos, los cuales pueden disolverse nuevamente en el agua o quedar enterrados (Smith y Smith, 2007).

De los diferentes procesos que involucran el ciclo de carbono, se generan y encuentran productos ya sean orgánicos o inorgánicos, y de forma disuelta o particulada.

## **2.2 Formas del carbono**

El carbono puede encontrarse de manera orgánica o inorgánica y estar en forma disuelta o particulada. Ambas formas de C comparten procesos que dan lugar a la generación y transformación de uno en otro (Tabla 1). No obstante, el carbono orgánico (CO) se refiere principalmente a la materia orgánica disponible en el suelo y en la superficie del agua, y a los productos de la descomposición y excreción de los organismos. El carbono inorgánico se encuentra principalmente de manera disuelta y como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ingresando al agua a través de la atmósfera por difusión, y por la descomposición y respiración de organismos que se encuentran en ambas superficies.

Además, el carbono orgánico disuelto se puede dividir en sustancias húmicas, que son compuestos de gran peso molecular que le dan un color café al agua y se presentan en el agua como moléculas disueltas, suspensiones coloidales y como material particulado; y no húmicas, compuestos con pesos moleculares pequeños, y donde se incluye el azúcar y otros carbohidratos, aminoácidos, urea, proteínas, pigmentos y lípidos (Dodds y Whiles, 2002). Es por ello, que algunos de los compuestos de carbono orgánico pueden ser muy resistentes a la degradación y otros pueden tener una alta disponibilidad biológica. Es así, que uno de los métodos común para estimar la disponibilidad total de carbono orgánico está basado en los procesos de respiración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o demanda química de oxígeno de reacciones oxidativas, siendo la variación de esta concentración un

buen indicador de los efectos de la contaminación en ambientes acuáticos (Dodds y Whiles, 2002).

**Tabla 1. Procesos y reacciones asociados al carbono.**

Proceso	Reacción
Fotosíntesis	$6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$
Degradación aerobia y respiración	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Degradación anaerobia (acetogénesis, acetogénesis y metanogénesis)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 4\text{H}_2$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{CO}_2 + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 3\text{HCOO}^-$ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$  $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ $\text{H}_2 + 0.25\text{HCO}_3^- + 0.25\text{H}^+ \leftrightarrow 0.25\text{CH}_4 + 0.75\text{H}_2\text{O}$ $3\text{HCOO}^- + 0.25\text{H}_2\text{O} + 0.25\text{H}^+ \leftrightarrow 0.25\text{CH}_4 + 0.75\text{HCO}_3^-$
Sistema de carbonatos	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$

Elaborada con información de Dodds y Whiles (2002).

El carbono inorgánico proviene de la atmósfera en forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Roldán y Ramírez, 2008). Cuando está disuelto en agua, puede estar presente como  $\text{CO}_2$ , ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), componentes que dan lugar al sistema de carbonatos (Tabla 1). La suma de las concentraciones de todas estas formas es la concentración de carbono inorgánico y se representa como  $\sum\text{CO}_2$ . Esta serie de reacciones químicas permiten conocer cómo los ecosistemas acuáticos amortiguan los cambios de pH, cómo el  $\text{CO}_2$  se vuelve disponible para la fotosíntesis, y cómo el incremento de la presión atmosférica permite incrementar las cantidades de  $\text{CO}_2$  para ser diluidas en solución (Dodds y Whiles, 2002).

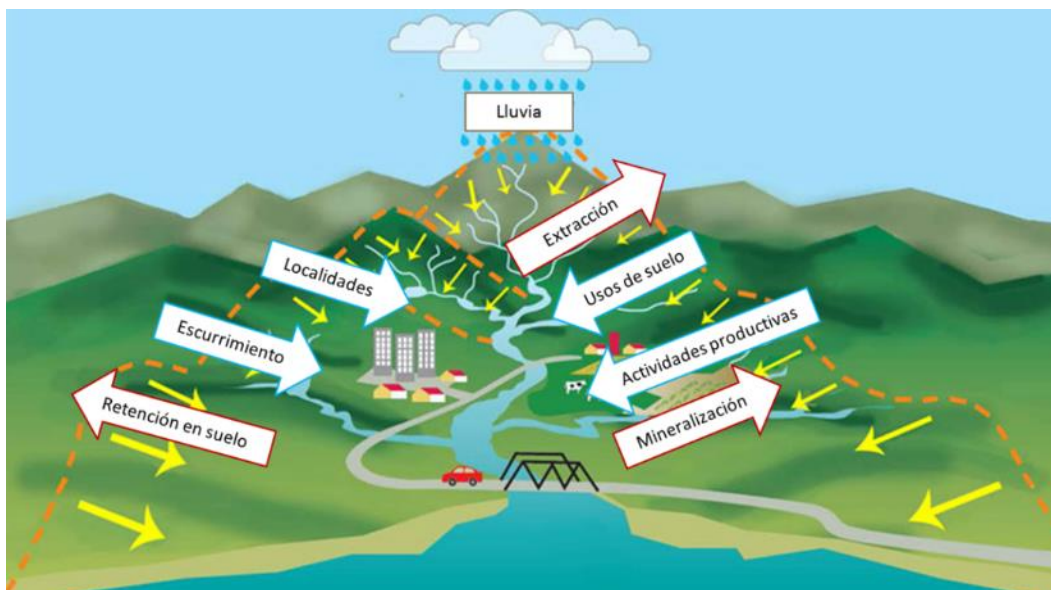
### 2.3 Fuentes de carbono

La carga de un nutriente o contaminante puede ser “externa” o “interna”. La carga externa es aquella proveniente de la cuenca hidrológica y de la atmósfera (Figura 2); mientras que la interna, está relacionada con la liberación de nutrientes dentro del propio cuerpo de agua debido a las condiciones que en él se presenten (UNEP-IETC, 1989).

Las fuentes de contaminación de un cuerpo de agua pueden ser puntuales o difusas. Las entradas son las cantidades que llegan al lago desde el exterior, por fuentes puntuales o difusas, y las salidas son los sumideros que conforman las pérdidas ya sea con la acumulación en sedimento o con la emisión hacia la atmósfera. Sin embargo, es importante



prestar atención al sedimento mismo, ya que no solo constituye un sumidero de material, sino que, bajo ciertas condiciones, puede actuar como fuente interna (UNEP-IETC, 1989).



**Figura 2. Entradas y salidas de carbono en una cuenca hidrológica.**

### 2.3.1 Fuentes puntuales

Las fuentes puntuales son aquellas que se descargan en un solo sitio y provienen, normalmente, de descargas de drenaje provenientes de complejos urbanos o industriales, como de una planta de tratamiento de agua residual.

### 2.3.2 Fuentes difusas

Las fuentes difusas son provenientes de áreas agrícolas y ganaderas, áreas forestales, erosión, áreas urbanas por falta de drenaje, fugas y fosas sépticas. La contaminación generada por estas fuentes es producida principalmente por las lluvias, las cuales generan escurrimientos, acarreado los contaminantes hacia el cuerpo de agua. En la Tabla 2 se pueden observar de dónde proviene cada una de las formas del carbono.

**Tabla 2. Formas de carbono y su origen (Modificado de Kon-Kee *et al.*, 2010).**

Forma	Nombre	Origen
Disuelto	Carbono inorgánico disuelto (CID)	Aire, descomposición de materia orgánica
		Disociación de ácido carbónico y disolución de carbonatos
	Carbono orgánico disuelto (COD)	Producción primaria, degradación de carbono orgánico particulado, escurrimiento
Particulado	Carbono inorgánico particulado (CIP)	Erosión
	Carbono orgánico particulado (COP)	Producción primaria, escurrimiento

La manera en que el ciclo de carbono fluye en un cuerpo de agua, está en función de la morfometría, la hidrología (tiempo de residencia del agua), la carga proveniente de la cuenca, además de la biomasa total, su actividad metabólica y la diversidad bioquímica de las poblaciones. Además de lo anterior, una característica importante es la estratificación térmica, que indica la frecuencia de mezcla de un cuerpo de agua.

## 2.4 Estratificación térmica

La estructura vertical de los ecosistemas de aguas abiertas como los lagos, puede representarse como una capa superficial cálida, de baja densidad sobre una capa de agua fría de densidad más alta, separadas por una zona delgada denominada termoclina. En este sentido, se puede dividir en tres zonas (Smith y Smith, 2007) (Figura 3):

**Epilimnion** o aguas superficiales, el cual es relativamente cálido como resultados de la intercepción de la radiación solar; el contenido de oxígeno es elevado debido a la difusión del oxígeno de la atmósfera en la superficie del agua; y presenta alta productividad debido a las condiciones de temperatura y luz que existe.

**Hipolimnion** o aguas profundas, es frío y también se caracteriza por presentar poco oxígeno. En esta capa, se produce la descomposición de materia orgánica, por lo que es rica en nutrientes. Sin embargo, por las condiciones de temperatura y luz no presentan una productividad muy elevada.

La zona de transición entre la superficie y las aguas profundas se caracteriza por un abrupto gradiente de temperatura, denominado **termoclina**.

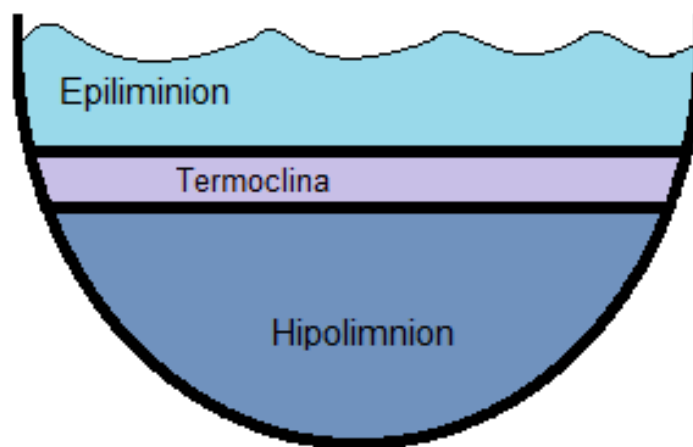


Figura 3. Estratificación térmica de un lago.

Tomando en cuenta esta estructura y el estado trófico que presente el lago, se puede conocer el comportamiento que tienen algunos los elementos a lo largo de la columna de agua. Por ejemplo, el oxígeno se encuentra en mayor cantidad cerca de la superficie, en donde existe un intercambio entre el agua y la atmósfera (difusión). Además, puede estar

disponible en el cuerpo de agua como consecuencia de la fotosíntesis; sin embargo, la cantidad de oxígeno disminuye con la profundidad debido a la demanda de oxígeno de los organismos y del material orgánico que se encuentran en las zonas más profundas (Roldán y Restrepo, 2008).

## **2.5 Eutroficación**

El estado trófico radica principalmente en la productividad primaria y depende de los nutrientes disponibles. En algunos cuerpos de agua, se presentan factores limitantes como los elementos traza, la penetración de la luz y la ausencia de clorofila (Arredondo Figueroa *et al.*, 2007).

Los estados tróficos principales son: oligotrófico, mesotrófico y eutrófico. La palabra eutrófico, deriva del griego *eutrophos*, que significa rico en nutrientes y describe una condición de los lagos que involucran un crecimiento en exceso de algas. Aunque una cierta productividad de las algas es necesaria, el crecimiento en exceso bajo un estado eutrófico puede llevar a un severo deterioro del cuerpo de agua (Manahan, 2007).

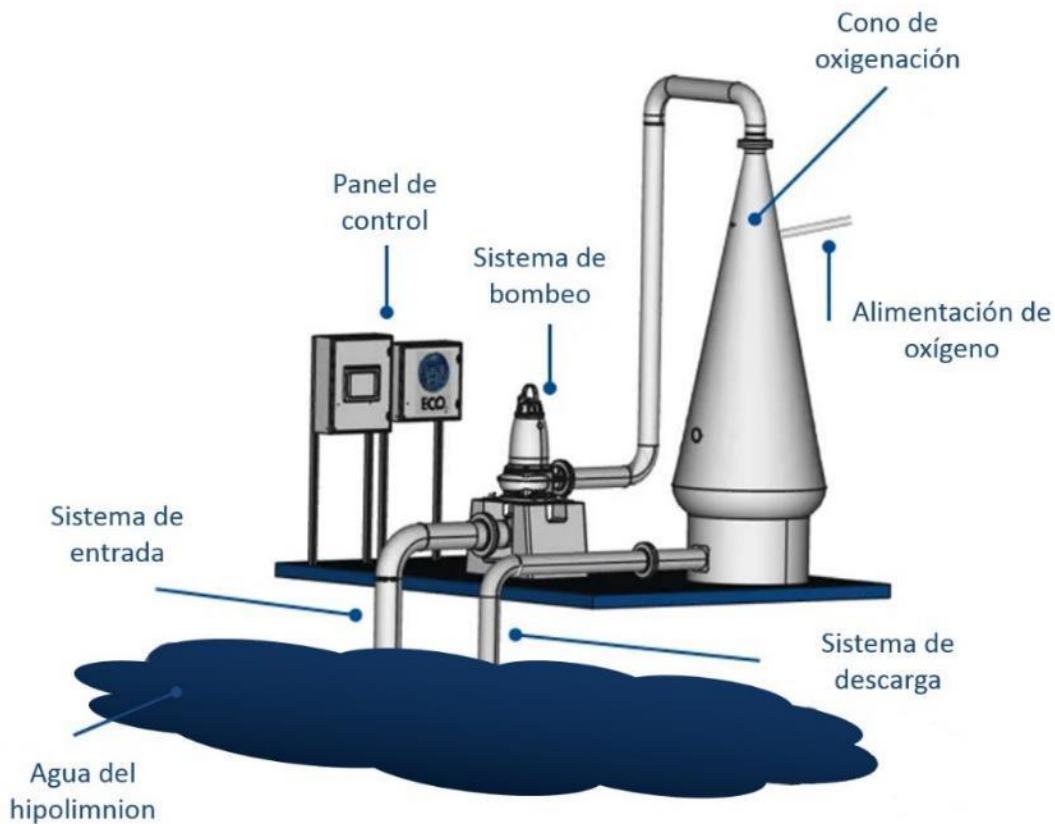
La eutroficación es un fenómeno natural, pero está asociada a las actividades humanas que se efectúan en la cuenca como la agricultura. Este fenómeno involucra varios aspectos como la ubicación, el clima, la morfometría, la estratificación térmica, la productividad primaria, etcétera (Arredondo Figueroa *et al.*, 2007).

### **2.5.1 Métodos de saneamiento: oxigenación hipolimnética**

Una característica de un cuerpo de agua eutrófico es el agotamiento de oxígeno en el cuerpo de agua. Si el enriquecimiento de nutrientes es suficiente para agotar la reserva de oxígeno del hipolimnion antes del periodo de desestratificación, el cuerpo se volverá anóxico (Cooke *et al.*, 2005). La oxigenación hipolimnética es una técnica de saneamiento y control de la carga interna de contaminantes, que consiste principalmente en el suministro de oxígeno disuelto en las zonas más profundas de un cuerpo de agua, preservando la estratificación térmica del cuerpo de agua (Bierlein *et al.*, 2017).

Este sistema fue diseñado para contraatacar la anoxia e incrementar la concentración de oxígeno disuelto en la capa más profunda del lago sin provocar la desestratificación y se utilizó por primera vez en Suiza en los años cuarenta (Ashley, 1976; NRC-US, 1991). La implementación de esta técnica aumenta los procesos de descomposición al incrementar la cantidad de oxígeno disuelto promoviendo la oxidación del sedimento, reduce la carga interna de nutrientes, incrementa la precipitación de iones mayores que pueden también remover fósforo del agua, inhibe la presencia de compuestos reducidos (ej. hierro y manganeso) en la columna de agua y también modifica las condiciones de pH en el hipolimnion (Ashley, 1983; Beutel y Horne, 1999).

Entre los sistemas de oxigenación desarrollados se destacan los aireadores superficiales, los difusores de burbujas y el cono Speece (Singleton y Little, 2006; Bierlein *et al.*, 2017). Este último consta de una fuente de oxígeno, una cámara en forma de cono, un sistema de bombeo y un difusor que dispersa el agua oxigenada en el hipolimnion (Figura 4).



**Figura 4. Componentes del sistema de oxigenación del cono Speece. (Modificado de ECO Oxygen Technologies (2003))**

Las burbujas del agua del hipolimnion y el gas de oxígeno se introducen en la parte superior del cono y, a medida que el agua fluye hacia abajo, la velocidad disminuye, quedando las burbujas en suspensión y permitiendo la disolución del oxígeno (Beutel y Horne, 1999; Singleton y Little, 2006). Para el diseño de estos sistemas se requiere información sobre el oxígeno disuelto inicial en el cuerpo de agua, así como la temperatura y la profundidad. Además, para determinar el número de unidades, dependerá de la cantidad de oxígeno disuelto a suministrar para el saneamiento.

Por tal motivo, para evitar subestimar el oxígeno requerido, es necesario considerar los elementos que modifican constantemente las concentraciones de oxígeno en el cuerpo de agua para su diseño, mediante la aplicación de balance de masas basado en las entradas y salidas de oxígeno disuelto y demanda de oxígeno (Hansen *et al.*, 2017). Lo anterior, se resume en la evaluación de cargas del contaminante tanto interna como externa.

## 2.6 Evaluación de carga de contaminantes

La evaluación de las cargas de contaminantes puede realizarse de dos maneras, ya sea por estimación directa o indirecta. A la primera, también se le conoce como monitoreo, y consiste en realizar mediciones continuas de la concentración del contaminante y del flujo de agua del río, para posteriormente obtener la carga del contaminante que llega en unidades de masa por tiempo (Palau *et al.*, 2010, Pacheco *et al.*, 2013).

La evaluación por estimación indirecta o modelación, involucra el uso de modelos que representan el transporte del contaminante en la cuenca hidrológica y para ello, se utiliza información de climatología, hidrología, propiedades del suelo, inventarios de fuentes de emisión, entre otros, que permite describir la cuenca. Aunque la modelación es una técnica complementaria que permite evaluar diferentes situaciones según el propósito del estudio (Benedini y Tsakiris, 2013), incluye un proceso de validación el cual permite evaluar qué tan adecuado es el modelo para representar el problema real para el que fue utilizado a través del análisis de los resultados obtenidos (Sargent, 2014).

### **2.6.1 Descripción del modelo INCA-C**

Los modelos INCA han sido diseñados para investigar el transporte y la distribución de contaminantes en el ambiente acuático y terrestre. Están basados en el primer modelo INCA (*Integrated Nitrogen model in Catchments*) desarrollado para evaluar el transporte de nitrógeno en cuencas hidrológicas (Whitehead *et al.*, 1998). Además, son de uso libre y se pueden obtener contactando a los desarrolladores del submodelo de interés en la página web de la Universidad de Reading: <http://www.reading.ac.uk/INCA>.

De manera general, los modelos INCA operan a una escala de 1 km<sup>2</sup> y de manera diaria, se pueden configurar hasta seis usos de suelo, consideran el aporte de diferentes fuentes de emisión (ej. la agricultura, la descarga de aguas residuales y la deposición atmosférica) y, están conformados por cuatro componentes: i) un sistema de información geográfica para definir los límites de la cuenca o subcuencas y para calcular el área de los usos de suelo en cada una de ellas, ii) un modelo hidrológico para calcular la lluvia hidrológica efectiva y la humedad del suelo, iii) un modelo hidrogeoquímico para simular los flujos y transformaciones del nutriente o contaminante en la fase terrestre, y iv) un modelo de flujo para simular los procesos en la fase acuosa (Whitehead *et al.*, 1998; Wade *et al.*, 2002a y Futter *et al.*, 2007).

El primer modelo INCA-N (*Integrated Catchments model for Nitrogen*) describe la dinámica del nitrógeno en la cuenca hidrológica, proporcionando resultados de las variaciones del flujo y de las concentraciones de nitrógeno como nitrato (N-NO<sub>3</sub>) y como amonio (N-NH<sub>3</sub>) en el río de manera diaria (Whitehead *et al.*, 1998). Sin embargo, se observaron errores en la aplicación de algunas de las ecuaciones implementadas y se desarrolló una nueva versión con la corrección de estos errores (Wade *et al.*, 2002b).

El modelo INCA-C (*Integrated Catchments model for Carbon*) fue desarrollado como un submodelo del modelo INCA-N, para simular los procesos de transformación del carbono orgánico en la cuenca hidrológica y que considera la relación entre el carbono orgánico disuelto, el carbono inorgánico disuelto y el carbono orgánico particulado. Sin embargo, es la fracción orgánica la que más se ha utilizado y que mejores resultados ha presentado (Futter *et al.*, 2007).

Los procesos entre cada una de las fuentes de carbono son simulados como procesos de primer orden. Los flujos de agua son reportados en m<sup>3</sup>/s mientras que los cambios en la masa de carbono son reportados en kg/día. En este modelo, la cuenca es modelada como

un conjunto de uno o más usos de suelo, cada uno representado como dos cajas de suelo con una capa orgánica superficial. El agua que se filtra a través de la capa orgánica superficial puede incorporar carbono orgánico o humus antes de ingresar a la capa siguiente del suelo, donde se produce la sorción y desorción de carbono orgánico y la mineralización a carbono inorgánico.

Algunos de los procesos incluidos son la entrada de carbono orgánico a través de hojarasca, la sorción-desorción de carbono orgánico en suelos, la mineralización de carbono y el transporte advectivo del suelo al agua, todos dependientes de la temperatura y de la humedad del suelo; y para los ríos, se modela como un sistema que está completamente mezclado y que fluye continuamente. El modelo INCA-C requiere de variables de estado (Tabla 3) y de parámetros referentes a las características de la cuenca (Tabla 4).

**Tabla 3. Variables de estado y series de tiempo usados en el modelo (Modificado de Futter *et al.*, 2007).**

Variable	Unidad	Descripción
$q_x$	$m^3/s$	Flujo de agua
$k_{x,yz}$	1/día	Coeficiente para la transformación de carbono entre las formas $y$ y $z$ en el compartimento $x$ donde $y$ y $z$ pueden ser DOC, DIC y POC y $x$ es la misma que para los flujos
$m_{y,x}$	kg	Masa de carbono $y$ en $1 \text{ km}^2$ del compartimento $x$
$SMD_t$	mm	Déficit de humedad de suelo en el tiempo $t$
$HER_t$	mm/día	Lluvia hidrológica efectiva en el tiempo $t$

**Tabla 4. Parámetros requeridos en el modelo (Modificado de Futter *et al.*, 2007).**

Parámetro	Unidad	Descripción
$A_T$	$\text{km}^2$	Área de la cuenca
$L$	m	Longitud del río
$\beta$	-	Índice de flujo base
$I$	mm/día	Máxima tasa de infiltración en la cuenca
$q_{U,Max}$	$m^3/día$	Flujo de la capa superior del suelo por encima del cual se genera un exceso de saturación
$SMD_{max}$	mm	Máxima humedad del suelo a la que los procesos de C pueden ocurrir
$k_L$	m/día	Velocidad de transferencia de masas de CID desde el compartimento superior del suelo a la atmósfera
$T_x$	día	Tiempo de residencia del agua en el compartimento $x$
$\sigma_1$	-	Multiplicador de la mineralización de COD en agua
$\sigma_2$	-	Compensación de la mineralización de COD en agua

Las series de datos de temperatura y precipitación se utilizan para estimar la lluvia hidrológica efectiva y el déficit de humedad del suelo con el modelo PERSiST, incluido en el paquete de instaladores del modelo. Además, también se requieren de datos de monitoreo de concentraciones de carbono y caudales para la calibración y verificación del modelo.

### 2.6.2 Ecuaciones del modelo INCA-C

Las ecuaciones de los procesos que sustentan al modelo INCA-C (Tabla 5) (Futter *et al.*, 2007), se dividen en generación de escurrimiento (Ecuaciones 1-3), coeficientes de transformación (Ecuaciones 4 y 5), procesos de C en suelo (Ecuaciones 6-11) y procesos de C en agua (Ecuaciones 12-16).

**Tabla 5. Ecuaciones base del modelo INCA-C (Futter et al., 2007)**

Ecuación	No.
Generación de escurrimiento y flujo de agua	
$\frac{dq_D}{dt} = \frac{q_s + \frac{1}{86.4} \left( \text{HER} - I \left( 1 - e^{-\frac{\text{HER}}{I}} \right) \right) - q_D}{T_D}$	1
$\frac{dq_U}{dt} = \frac{\text{HER} - q_s - q_U}{T_U}$	2
$\frac{dq_L}{dt} = \frac{\beta \cdot q_U - q_L}{T_L}$	3
Coeficientes de velocidad para la transformación de carbono	
$k = k^0 \cdot \eta^{T-\theta}$	4
$k = k^0 \left( \frac{\text{SMD}_{\max} - \text{SMD}_t}{\text{SMD}_{\max}} \right)$	5
Procesos de carbono en suelo	
$\frac{dm_{\text{SOC},U}}{dt} = 1000(LF_t + RB_t) + k_{\text{DS},U} \cdot m_{\text{D},U} - m_{\text{S},U} (k_{\text{SD},U} + k_{\text{SI},U})$	6
$\frac{dm_{\text{SOC},L}}{dt} = k_{\text{DS},L} \cdot m_{\text{D},L} - m_{\text{S},L} (k_{\text{SD},L} + k_{\text{SI},L})$	7
$\frac{dm_{\text{DOC},U}}{dt} = k_{\text{SD},U} \cdot m_{\text{S},U} - m_{\text{D},U} \left( (k_{\text{DS},U} + k_{\text{DI},U}) - 86400 \cdot \frac{q_U + q_s}{V_{r,U} + V_{d,U}} \right)$	8
$\frac{dm_{\text{DOC},L}}{dt} = k_{\text{SD},L} \cdot m_{\text{S},L} - m_{\text{D},L} (k_{\text{DS},L} + k_{\text{DI},L}) - 86400 \left( \frac{q_L + m_{\text{D},L}}{V_{r,L} + V_{d,L}} - \frac{\beta \cdot q_U \cdot m_{\text{D},U}}{V_{r,U} + V_{d,U}} \right)$	9

**Tabla 5. Ecuaciones base del modelo INCA-C (Futter et al., 2007) (Cont.)**

Ecuación	No.
$\frac{dm_{DIC,U}}{dt} = k_{DI,U} \cdot m_{D,U} + k_{SI,U} \cdot m_{S,U} - 86400 \cdot \frac{m_{I,U}}{V_{r,U} + V_{d,U}} \cdot (q_U + q_S) - k_L \left( \frac{m_{I,U}}{V_{r,U} + V_{d,U}} - DIC_S \right)$	10
$\frac{dm_{DIC,L}}{dt} = k_{SI,L} \cdot m_{S,L} + k_{DI,L} \cdot m_{D,L} + 86400 \left( \beta \cdot q_U \frac{m_{I,U}}{V_{r,U} + V_{d,U}} - q_L \frac{m_{I,L}}{V_{r,U} + V_{d,L}} \right)$	11
Procesos de carbono en agua	
$T_R = \frac{L}{v \cdot 86400}$	12
$\frac{dq_R}{dt} = q_R^U - A_T \cdot (q_D + q_U + q_L) - q_R$	13
$k_{R,DI(P)} = (\sigma_1 \cdot SR_T) \div \left( \sigma_2 + \frac{m_{D,R}}{v_R} \right)$	14
$\frac{dm_{D,R}}{dt} = 86.4 \left( \left( q_R^U \cdot \frac{m_{D,R}^U}{V_R^U} - q_R \cdot \frac{m_{D,R}}{V_R} \right) + A_T \left( \frac{m_{D,U}(q_S + (1+\beta) \cdot q_U)}{V_{r,U} + V_{d,U}} + \frac{m_{D,L} \cdot q_L}{V_{r,L} + V_{d,L}} \right) \right) - (k_{R,DI(P)} + k_{R,DI(M)}) \cdot m_{D,R}$	15
$\frac{dm_{I,R}}{dt} = 86.4 \left( \left( q_R^U \cdot \frac{m_{I,R}^U}{V_R^U} - q_R \cdot \frac{m_{I,R}}{V_R} \right) + A_T \left( \frac{m_{I,U}(q_S + (1+\beta) \cdot q_U)}{V_{r,U} + V_{d,U}} + \frac{m_{I,L} \cdot q_L}{V_{r,L} + V_{d,L}} \right) \right) + (k_{R,DI(P)} + k_{R,DI(M)}) \cdot m_{D,R} - k_{R,I} \cdot m_{I,R}$	16

La generación de escurrimiento y flujo de agua están representadas por las Ecuaciones 1-3. El cálculo del escurrimiento y flujo del río considera que el flujo es generado por el escurrimiento directo ( $q_D$ ) y el escurrimiento difuso de las capas superior ( $q_U$ ) e inferior ( $q_L$ ) del suelo, representado por la ecuación 1. La variación del flujo desde la capa superior del suelo ( $q_U$ ) (Ecuación 2) considera la cantidad de lluvia efectiva (HER) que ingresa al suelo menos la velocidad a la que el agua se filtra a la capa inferior del suelo ( $\beta \cdot q_U$ ), que se transporta al río por escurrimiento difuso ( $(1 - \beta)q_U$ ) o vuelve a la superficie como exceso de saturación de escorrentía ( $q_S$ ) y se divide entre el tiempo de retención del agua en la capa superior del suelo ( $T_U$ ). La variación del escurrimiento difuso desde la capa inferior del suelo (Ecuación 3) corresponde a la tasa de percolación desde la capa superior ( $\beta \cdot q_U$ ) menos el volumen de agua que se difunde desde la capa inferior del suelo al agua abierta ( $q_L$ ) dividido entre el tiempo de retención del agua en la capa inferior del suelo ( $T_L$ ).

Los coeficientes de velocidad para la transformación de C (Ecuaciones 4 y 5) son representados como  $k$ , indicando la transformación que puede ocurrir en la capa superior o inferior del suelo y son dependientes de la temperatura ( $T$ ) y la humedad del suelo (SMD).

Los cambios en la masa de carbono del suelo se definen con las Ecuaciones 6 – 11. El cambio en la masa de COS en la capa superior (Ecuación 6) e inferior (Ecuación 7) del suelo es la suma de las entradas de hojarasca o adición de fertilizantes (LF), el material de



descomposición (RB) y la cantidad de carbono orgánico ( $k_{DS,U} \cdot m_{D,U}$ ) saliendo de la solución menos la masa de COS que es mineralizada a COD ( $m_{S,U} \cdot (k_{SD,U} + k_{SI,U})$ ). Sin embargo, en la Ecuación 7, la suma de las entradas es iguales a cero.

Los cambios en la masa de COD en la capa superior (Ecuación 8 es igual a la masa de COS de la solución ( $k_{SD,U} \cdot m_{S,U}$ ) menos la masa de COD que es mineralizada ( $k_{DI,U} \cdot m_{D,U}$ ), que proviene de la solución ( $k_{DS,U} \cdot m_{D,U}$ ) o que es transportada fuera del suelo. Así el COD que sale de la capa es igual a la concentración de COD multiplicado por el flujo de agua superior ( $q_U$ ) y el flujo de saturación ( $q_S$ ), que puede transportarse a un río o percolar a la capa inferior. La Ecuación 9, representa los cambios en la masa de COD en la capa inferior y es calculada de manera similar a la anterior, con la diferencia de que considera la entrada de COD de la capa superior a una velocidad igual al índice de flujo base multiplicado por la concentración de COD en la capa superior ( $\beta \cdot q_U \cdot m_{D,U}$ ). Los cambios en la masa de CID en la capa superior (Ecuación 10) es igual al coeficiente al cual el COS y el COD son mineralizados ( $k_{DI,U} \cdot m_{D,U} + k_{SI,U} \cdot m_{S,U}$ ) menos la velocidad a la que CID es liberada a la atmósfera. Esta velocidad depende de la diferencia entre la concentración de CID en el agua y la constante de saturación ( $DIC_S$ ). La Ecuación 11 que describe los procesos en la capa inferior, opera de manera similar a la anterior, a excepción de que no hay evasión de CID a la atmósfera.

Ya que las Ecuaciones 8-11 son modeladas como el flujo de agua multiplicado por la concentración de COD o CID, los flujos de agua son multiplicados por 86,400 para homologar las unidades de  $m^3/s$  a  $s/d$ .

Por último, las ecuaciones del modelo que simulan los procesos de C en agua se representan con las ecuaciones 12-16. El COD puede ser mineralizado a CID ya sea por procesos fotolíticos o microbianos, donde el CID se pierde de la columna de agua a través de una combinación de fotosíntesis, transformaciones químicas y liberación a la atmósfera. El coeficiente de velocidad para la pérdida de CID de la columna de agua ( $k_{R,I}$ ) (Ecuación 14) representa la suma de los procesos de fotosíntesis y respiración, las transformaciones químicas y la desgasificación a la atmósfera. Sin embargo, estos procesos no se toman en cuenta, ya que no se consideran procesos comunes en corrientes de agua y en la modelación afecta principalmente al CID, cuando este es el objeto de estudio (Futter, 2017).

La velocidad de cambio en el flujo del río (ecuación 13) es el caudal ( $q_R^U$ ) y el escurrimiento difuso ( $q$ ) aguas arriba del río menos el caudal de salida. Como el escurrimiento difuso por uso de suelo se calcula por cada  $km^2$ , se multiplica por el área de cobertura de cada uso ( $A_T$ ) para calcular el flujo real. Los cambios en la masa de COD (ecuación 15) y CID (ecuación 16) en el río, representan los flujos advectivos dentro y fuera del río así como los escurrimientos difusos del ambiente terrestre y los procesos en el agua. Los afluentes advectivos son iguales al flujo aguas arriba ( $q_{RU}$ ) multiplicados por la concentración inicial. Esto equivale a la masa de carbono ( $m_{YU}$ ) aguas arriba entre su volumen ( $v_{RU}$ ).

### 3 Antecedentes del área de estudio

En este capítulo se presenta la descripción del área de estudio y los trabajos realizados en la cuenca hidrológica referentes a la evaluación de cargas de nutrientes y demandas de oxígeno.

#### 3.1 Área de estudio

La presa Valle de Bravo se ubica en el Estado de México, en las coordenadas 19°21'20" N y 100°11' 00 O. Se encuentra dentro de la Cuenca del Río Cutzamala en la Región Hidrológica 18 del Río Balsas. Forma parte del Sistema Cutzamala, el cual abastece de agua potable a la Zona Metropolitana del Valle de México, que incluye municipios y alcaldías del Estado de México y la Ciudad de México. (CONAGUA-BM, 2015). La cuenca hidrológica de la presa tiene un área de 615.48 km<sup>2</sup> y su ubicación se observa en la Figura 5.

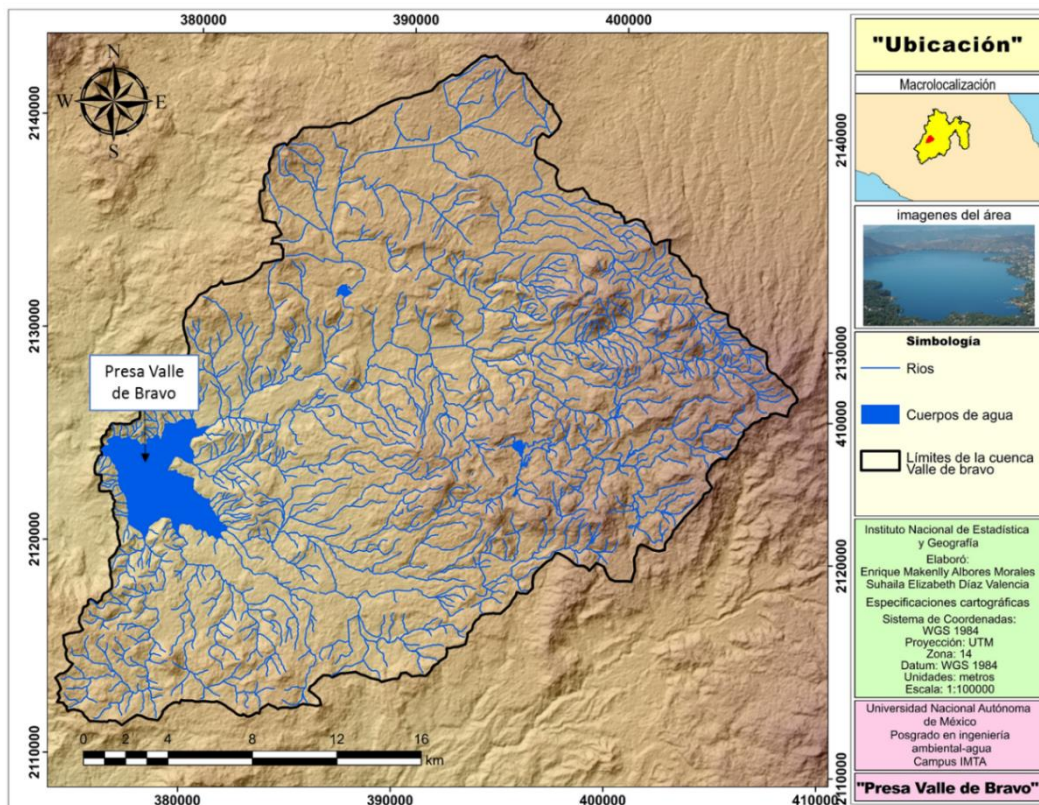


Figura 5. Mapa de ubicación de la presa de Valle de Bravo y su cuenca hidrológica.

La cuenca hidrológica de la presa se divide en ocho subcuencas, pero el embalse recibe aportaciones de siete: Amanalco, Molino, San Diego-Los González, Yerbabuena- Santa Mónica, Las Flores- Tizates, El Carrizal y Las Laderas. El área de la cuenca abarca en su mayoría el área de los municipios de Amanalco y Valle de Bravo y, en menor extensión, parte de Donato Guerra, Villa Allende, Villa Victoria, Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec (IMTA-Fundación Gonzalo Río Arronte, 2012), con una población total de 100, 475 habitantes (CONAGUA-IMTA, 2015).

Fisiográficamente, la cuenca presenta lomeríos con mesetas, laderas abruptas y pequeñas áreas de planicie, con desniveles altitudinales que van desde los 1,830 hasta los 3730 msnm. La pendiente media de la cuenca es del 16%, correspondiendo a zonas de terrenos accidentados. Sin embargo, pueden encontrarse zonas con pendientes más abruptas (Olvera-Viascán, 1992 y Villanueva Beltrán, 2011). Predominan suelos de origen volcánico, siendo más del 70% de la superficie total de la cuenca cubierto por andosoles (INEGI, 2007), los cuales presentan una alta retención de humedad y alta porosidad.

De acuerdo con la información cartográfica de climatología (INEGI, 2005), en la cuenca se presentan tres tipos de clima: templado semifrío subhúmedo (parte alta), templado subhúmedo (parte central) y templado semicálido subhúmedo (parte baja). La precipitación media anual es de 1042 mm (CONAGUA-BM, 2015) y la temperatura media anual oscila entre los 18 y 22 °C (Olvera-Viascán, 1992 y CONAGUA-IMTA, 2015).

### **3.2 Evaluación de cargas en la cuenca hidrológica**

En México, se han realizado estudios en donde se determina la emisión de contaminantes por fuentes puntuales y difusas en la cuenca hidrológica de un cuerpo de agua. El cálculo de estas emisiones y de la carga externa, se ha realizado principalmente para cuerpos de agua eutróficos, considerando las emisiones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y demandas de oxígeno en la cuenca hidrológica mediante modelación (Corzo Juárez, 2009; Ruíz Castro, 2018; Jayme-Torres y Hansen, 2018) y monitoreo (Olvera-Viascán, 1992).

El vaso de la presa Valle de Bravo es clasificado como eutrófico, y dada la importancia que representa por la variedad de servicios que de ella resultan, principalmente el suministro de agua potable a la Zona Metropolitana del Valle de México, a través del Sistema Cutzamala, se ha monitoreado constantemente la calidad del agua del embalse y de sus ríos tributarios. Además, se han propuesto diferentes estrategias para el control de la eutrofización y para ello, se ha realizado en diferentes ocasiones la evaluación de las cargas interna (CI) y externa (CE) del embalse.

La CI se ha determinado mediante el análisis de muestras de sedimento y, para la CE, por estimación de la emisión de nutrientes (fósforo y nitrógeno), de DBO<sub>5</sub> y de SST provenientes de la cuenca hidrológica de la presa y por monitoreo.

La evaluación de las cargas se ha hecho principalmente para nutrientes (N y P) que dan lugar a la eutrofización y se ha presentado un incremento de las CE del 6% y 38%, para nitrógeno y fósforo respectivamente, en el periodo de 1992 a 2011. La DBO no ha sido siempre considerada en dichas evaluaciones, por lo que su variación en la CE de la cuenca hidrológica o en el cuerpo de agua se desconoce. Con respecto a los inventarios de emisión realizados, se observan cambios en las coberturas de usos de suelo, un aumento en la población y, por ende, en el volumen de agua residual generada, así como también un incremento en la actividad trutícola.

Los resultados de las evaluaciones de las cargas de nutrientes realizadas para la presa Valle de Bravo se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6. Evaluaciones de carga de nutrientes.**

Autor	Método	CE	CI*	Observaciones
Olvera-Viascán (1992)	Monitoreo	N: 277 P: 47	N: -31 P: -3	Muestreos en campo de agua y sedimento.
Ramírez-Zierold (2010)	Monitoreo	N: 592 P: 121	N: -258 P: -102	
Villanueva Beltrán (2011)	Inventario de emisiones	DBO: 1607 N: 294 P: 65 SST: 14,117	-	Fuentes: usos de suelo, PTAR, agua no tratada, actividad trutícola y pecuaria
Carnero-Bravo <i>et al.</i> (2015)	Monitoreo	-	COT: -4637 N: -482 P: -44	Muestreos de sedimento
Márquez Pacheco (2015)	Monitoreo	-	CIP: 26.4 P: -67	Muestreos de agua y sedimento de la presa.
CONAGUA-IMTA (2015)	Inventario de emisiones (CE) y monitoreo (CI)	DBO: 1600	DBO: 174	Mismas que en 2011 pero no actividad pecuaria.

\*Los valores negativos hacen referencia a una acumulación en el sedimento de la presa.

El inventario de emisiones más reciente fue elaborado por CONAGUA-IMTA en el 2015 y fue el que se utilizó para los propósitos de la presente tesis. Este inventario se desarrolló para estimar las cargas de demandas de oxígeno y fue elaborado como parte del diseño de un sistema de oxigenación hipolimnética para el saneamiento de la presa Valle de Bravo.

Las fuentes puntuales consideradas fueron las descargas de agua residual tratada de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales Amanalco, ubicada en la subcuenca con el mismo nombre; y las descargas del agua residual no tratada generada en las subcuencas que drenan a la presa, determinadas con la siguiente información (Tabla 7).

**Tabla 7. Datos para el cálculo de volúmenes de agua residual y de cargas de DBO<sub>5</sub> (CONAGUA-IMTA, 2015).**

Dato	Cantidad	Unidad	Fuente
Población	100,475	Habitantes (hab)	CONAPO (2015)
Dotación promedio de agua potable por habitante del Estado de México (CAEM, 2008)	236	L/hab-día	Villanueva Beltrán (2011)
Porcentaje de generación de agua residual	75	%	CONAGUA (2007)
Porcentaje de cobertura de agua potable*	80	%	INEGI (2013)
Porcentaje de cobertura de drenaje y alcantarillado*	69	%	INEGI (2013)
Concentración típica de DBO en agua residual municipal	200	mg/L	FAO (1992)

\*Se presenta el porcentaje promedio de ambas coberturas. Varía por municipio.

Como fuentes difusas, se consideraron los escurrimientos por diferentes usos de suelo y la actividad trutícola. La carga asociada con la actividad pecuaria no fue incluida en este inventario, asumiéndose que esta es proporcional a la carga emitida por los pastizales que conforman la cuenca hidrológica.

Los resultados del inventario se presentan por subcuenca en la Tabla 8, siendo la emisión total de 1600 t/año de DBO<sub>5</sub>, resaltando que la mayor aportación es proveniente de las fuentes difusas y de la subcuenca de Río Amanalco.

**Tabla 8. Inventario de emisiones de DBO<sub>5</sub> de la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo (CONAGUA-IMTA, 2015).**

Subcuenca	Fuentes puntuales (t/año)	Fuentes difusas (t/año)	Total (t/año)
Río Amanalco	199	418	617
Río Molino	108	336	444
Río San Diego	26	44	70
Arroyo El Carrizal	2	38	40
Arroyo Las Flores	30	63	92
Arroyo Yerbabuena	7	24	32
Las Laderas	255	50	305
Total	627	973	1600

## 4 Metodología

En este apartado se describe la metodología implementada en este trabajo, que consistió en la delimitación de la cuenca hidrológica; el análisis del inventario de emisiones de demandas de oxígeno (CONAGUA-IMTA, 2015); la selección del modelo y la obtención de los parámetros de entrada; la determinación de la carga externa de carbono, con la aplicación del modelo INCA-C; y la evaluación de escenarios para el control de cargas.

### 4.1 Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca hidrológica y las subcuencas de la presa de Valle de Bravo (Figura 6), se utilizó un modelo digital de elevación del área de estudio y la red hidrográfica de la subcuenca del río Tilostoc, ambos a una escala 1: 50,000 disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

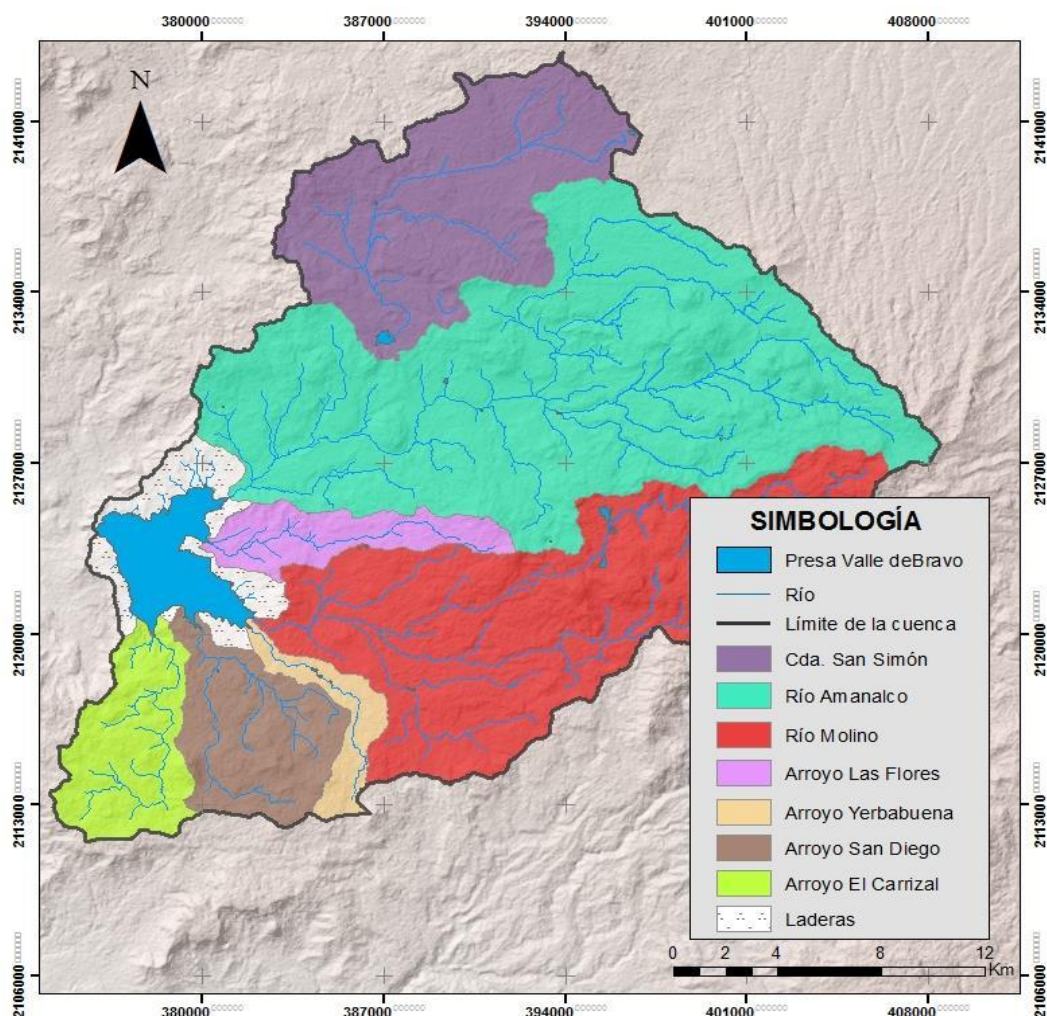


Figura 6. Subcuencas de la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo.

La cuenca se divide en ocho subcuencas de las cuales para la determinación de la carga externa se consideran siete: los ríos Amanalco, Molino y San Diego; los arroyos Carrizal, Las

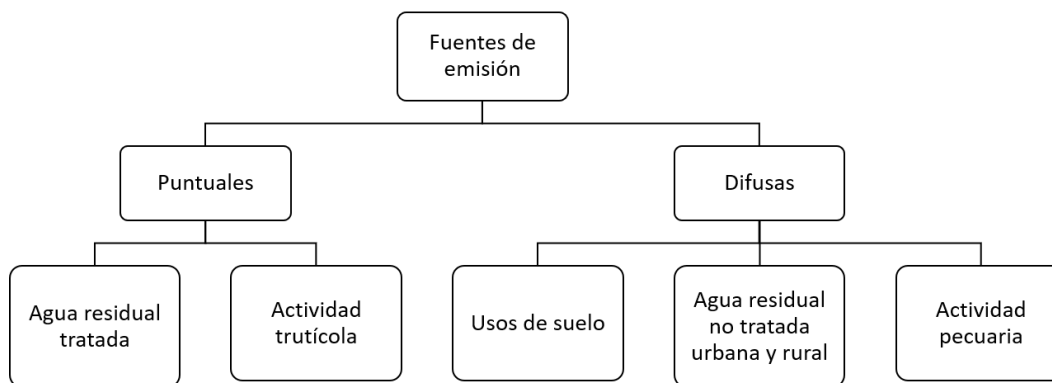
Flores y Yerbabuena; y Las Laderas, que son aquellas que drenan a la presa (Tabla 9). La subcuenca Cda. San Simón (90.4 km<sup>2</sup>) drena a un lago natural que se encuentra en la comunidad de San Simón de la Laguna en el municipio de Donato Guerra (IMTA-Fundación Gonzalo Río Arronte 2012).

**Tabla 9. Subcuencas y áreas de aportación.**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )
Río Amanalco	232.4
Río Molino	151.5
Río San Diego	37.5
Arroyo El Carrizal	33.5
Arroyo Las Flores	20.7
Arroyo Yerbabuena	12.5
Las Laderas	19.0
Total	507.1

#### 4.2 Análisis del inventario de emisiones

El inventario de emisiones de carbono se obtuvo del inventario de emisiones de demandas de oxígeno (CONAGUA-IMTA, 2015) (Tabla 8). Sin embargo, se modificaron las fuentes puntuales y difusas, reagrupándose como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7. Clasificación de fuentes de emisión**

De acuerdo con esta clasificación, se realizaron las consideraciones siguientes:

- a) Separación del agua residual generada en urbanas y rurales.
- b) Modificación de las fuentes puntuales: descargas de agua residual tratada y el aporte por actividad trutícola.
- c) Modificación de las fuentes difusas: descargas de agua residual no tratada, escurrimiento por diferentes usos de suelo y el aporte por actividad pecuaria.

- d) Obtención de las cargas de carbono basado en las cargas de demanda de oxígeno.

La clasificación del agua residual no tratada, en rural y urbana (Tabla 10), se realizó con base en la información de CONAGUA-IMTA (2015) (Tabla 7) y considerando que una comunidad es rural si su población es menor a 2,500 habitantes (INEGI, 2010).

**Tabla 10. Población y volúmenes de agua residual no tratada por subcuenca.**

Subcuenca	Población (hab)		Agua residual no tratada (m <sup>3</sup> /año)	
	Rural	Urbano	Rural	Urbano
Río Amanalco	26,270	6,879	982,373	0
Río Molino	10,259	0	538,357	0
Río San Diego	2,449	0	131,104	0
Arroyo El Carrizal	147	0	7,869	0
Arroyo Las Flores	2,769	0	148,235	0
Arroyo Yerbabuena	694	0	37,152	0
Las Laderas	3,752	47,256	200,859	1,073,074
Total	46,340	54,135	2,045,949	1,073,074

Para las fuentes puntuales, se adicionó el aporte de las descargas de agua tratada de la PTAR Valle de Bravo, dado que su descarga se localiza dentro de la cuenca de la presa. Además, se incluyó el aporte de la actividad trutícola, para lo cual se determinó el volumen de agua asociado a la producción de truchas (Tabla 11), asumiendo que una tonelada de trucha producida al año requiere de 5 L/s ó 157, 680 m<sup>3</sup>/año de agua (Guerrero Muñoz, 2012).

**Tabla 11. Aporte de agua por actividad trutícola.**

Subcuenca	Producción de truchas (t/año)	Emisión de DBO <sub>5</sub> (t/ año)	Volumen de agua (m <sup>3</sup> /año)
Río Amanalco	306	104	48,297,384
Río Molino	203	69	32,056,344
Río San Diego	3	1	473,040
Arroyo Las Flores	48	16	7,505,568
Las Laderas	17	6	2,617,488
Total	577	195	90,949,824



Una vez obtenido el volumen de agua, se determinó la concentración de DBO<sub>5</sub> considerando que si la emisión es igual a la concentración por el volumen de agua (Corzo Juárez, 2009), se obtiene la concentración en mg/L dividiendo la emisión entre el volumen de agua, multiplicando el resultado por 1,000,000. Esto dio un resultado de DBO<sub>5</sub> promedio de 2.14 mg/L.

En el caso de las fuentes difusas, al no ser considerado el aporte por actividad pecuaria en el inventario, se calculó la emisión de DBO<sub>5</sub> para este tipo de fuente y posteriormente se obtuvo la carga de carbono. Para ello, se utilizó la información sobre la producción anual porcina, bovina y ovina del anuario estadístico de la producción ganadera del año 2015 (SIAP, 2015) para los municipios de Amanalco y Valle de Bravo (Tabla 12).

**Tabla 12. Producción pecuaria en la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo.**

Municipio	Ganado en pie	2015		
		Producción (t/año)	Peso promedio por cabeza (kg)	Número de cabezas
Amanalco	Porcino	125	115	1087
	Bovino	386	430	899
	Ovino	252	48	5266
Valle de Bravo	Porcino	181	112	1610
	Bovino	223	435	512
	Ovino	73	43	1698

Además, se obtuvo el aporte de contaminante por estiércol para cada tipo de ganado (Tabla 13). La emisión por ganado porcino se calculó con respecto a la producción anual, el peso promedio del animal y la información de DBO<sub>5</sub> obtenida por el Consejo Mexicano de Porcicultura en kg/UPA·día, donde 1 UPA (Unidad de Producción Animal) es igual a 100 kg de peso vivo (Taiganides *et al.*, 1996). Para el caso de la emisión por ganado bovino y ovino, se determinó con base en el número de cabezas y los valores de DBO<sub>5</sub> reportados en kg/cabeza·día (Polprasert, 2007).

**Tabla 13. Aporte de DBO<sub>5</sub> por tipo de ganado.**

Ganado	Cantidad	Unidades	Referencia
Porcino	0.25	kg/UPA·d	Taiganides <i>et al.</i> , 1996
Bovino	0.73	kg/Cabeza·d	Polprasert, 2007
Ovino	0.16	kg/Cabeza·d	Polprasert, 2007

Sin embargo, para obtener la emisión por cada subcuenca, se calculó el número de cabezas de ganado equivalente a la superficie que abarca cada subcuenca de los municipios de Amanalco y Valle de Bravo, asumiendo que se distribuyen de manera uniforme dentro de la superficie de cada municipio (Tabla 14). Esta información se obtuvo con el manejo de información de municipios (INEGI, 2014) en un sistema de información geográfica.

**Tabla 14. Superficie que abarca cada subcuenca en los municipios Amanalco y Valle de Bravo.**

Subcuenca	Superficie por municipio (km <sup>2</sup> )	
	Amanalco	Valle de Bravo
R. Amanalco	161	35
R. Molino	49	86
R. San Diego	0	38
A. El Carrizal	0	33
A. Las Flores	4	17
A. Yerbabuena	0	13
Las Laderas	0	19
Superficie del municipio en la cuenca	214	241
Superficie total del municipio	221	401

Finalmente, para obtener la cantidad emitida de carbono por cada tipo de fuente, se estableció la Ecuación 17, basada en la reacción química de la degradación de la materia orgánica en presencia de oxígeno (Tabla 1). En ella, se consideraron los pesos moleculares correspondientes a los componentes de carbono (C) y oxígeno (O<sub>2</sub>), y la información de las cargas de emisión de DBO<sub>5</sub> del inventario de emisiones.

$$C = \frac{PA-C \cdot DBO_{5-E}}{PM-O_2} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- C = Carga de carbono (t/año)
- PA-C = Peso atómico de carbono (12 g/mol)
- PM-O<sub>2</sub> = Peso molecular del oxígeno (32 g/mol)
- DBO<sub>5-E</sub> = Carga emitida de demanda bioquímica de oxígeno (t/año).

### 4.3 Selección del modelo

Para la selección y aplicación de un modelo se debe tener en cuenta el tipo de análisis a realizar, los procesos hidrológicos, la escala de tiempo y espacial, las características de las fuentes de contaminación y el requerimiento de información (Arabi 2015). Sin embargo, aunque se han desarrollado distintos modelos para la evaluación del transporte de contaminantes, estos son enfocados principalmente a nutrientes (nitrógeno y fósforo) y son pocos los que han considerado la demanda bioquímica de oxígeno o el carbono en su diseño (SWAT, Global NEWS2, INCA-C).

Es por ello, que para la selección del modelo se evaluaron los modelos SWAT (Neitsch *et al.*, 2011), Global NEWS2 (Mayorga *et al.*, 2010) e INCA-C (Futter *et al.*, 2007) (Tabla 15).

**Tabla 15. Comparación de modelos que evalúan DBO<sub>5</sub> y carbono**

Modelo	Escala temporal	Área mínima (km <sup>2</sup> )	Autor	Parámetros que evalúa	Desventaja
SWAT	Día, Mes, Año	0.0009	Neitsch <i>et al.</i> (2011)	Nutrientes, DBO <sub>5</sub> y SST	Se utiliza DBO para modelar nutrientes
NEWS2	Año	3,000	Mayorga <i>et al.</i> (2010)	Nutrientes, SST y carbono	Considera solo dos fuentes de emisión
INCA-C	Día, Año	1	Futter <i>et al.</i> (2007)	Carbono	Simula C

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es una versión modificada del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) desarrollado por Arnold (1993) como herramienta de apoyo para la gestión de los recursos hídricos evaluando el impacto de la contaminación por fuentes puntuales y no puntuales en cuencas hidrológicas (Neitsch *et al.*, 2011). Adoptó una versión modificada del modelo QUAL2E para simular los procesos de nutrientes y DBO carbonácea final en el río; sin embargo, presenta limitaciones al simular algas, materia orgánica y DBO<sub>5</sub> (Chu, 2004; Jae-Ho *et al.*, 2012).

El modelo Global NEWS (Nutrient Exports Watersheds) fue desarrollado por un grupo de trabajo científico con el mismo nombre en el 2002, en donde se simulaba el transporte de nutrientes (N, P y C) por separado (Seitzinger, 2005). Con la versión 2, Global NEWS2, el transporte de nutrientes en sus formas disueltas y particuladas, orgánicas e inorgánicas, provenientes de fuentes naturales y antropogénicas se integró de tal manera de simular todos los nutrientes en una misma corrida. Opera de manera anual y la escala de aplicación mínima para la que ha sido utilizado es de 3,000 km<sup>2</sup>. Sin embargo, para la simulación del C, solo considera dos tipos de fuentes difusas, que son los humedales y suelo seco, y ninguna puntual (Mayorga *et al.*, 2010).

El modelo INCA- C (Integrated Catchments model for Carbon) (Futter *et al.*, 2007), fue desarrollado como un submodelo del modelo INCA-N (Integrated Catchments model for Nitrogen), que originalmente solo evaluaba el transporte de nitrógeno (Whitehead *et al.*,

1998). Integra los procesos que ocurren tanto en la cuenca hidrológica y en el río, fuentes puntuales y difusas, operando de manera diaria a una escala de 1 km<sup>2</sup>.

Aunque los tres modelos se pueden obtener de forma gratuita y requieren información de entrada semejante (clima, propiedades del suelo, usos de suelo e hidrología, fuentes de emisión), el modelo NEWS2 fue descartado debido a que la escala mínima aplicable es mayor al área de la cuenca de la presa Valle de Bravo, abarcando en una sola celda la totalidad de la cuenca. En el caso del SWAT, se encontró que simula la DBO carbonácea final en el río, pero no simula la atenuación de este contaminante en el ambiente terrestre. Finalmente, se optó por seleccionar el modelo INCA-C, que cumple con la escala espacial y temporal requerida y evalúa carbono en ambos ambientes, terrestre y acuático, proveniente de fuentes puntuales y difusas.

#### 4.4 Obtención de los parámetros de entrada al modelo INCA-C

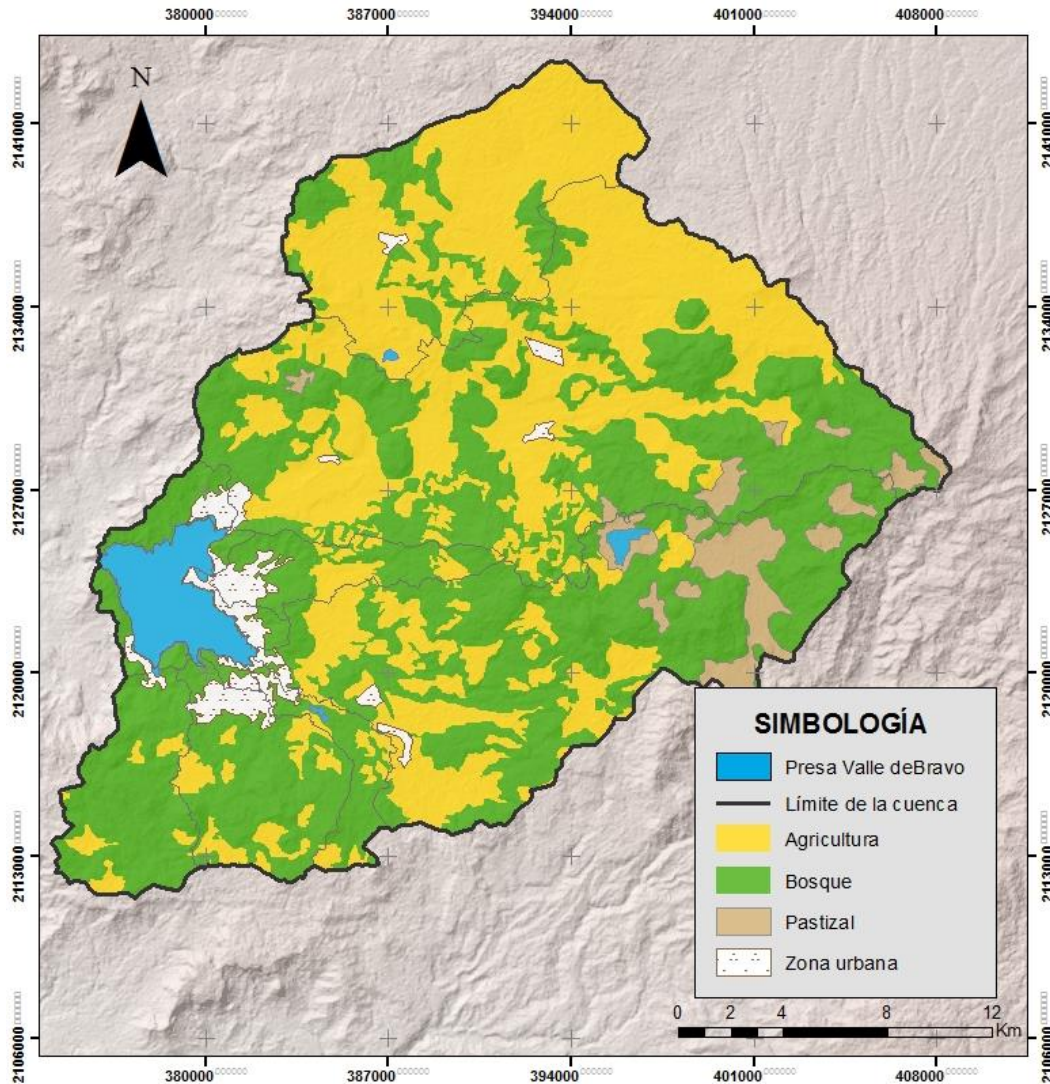
Los parámetros de entrada del área y porcentaje de cobertura por uso de suelo, las dimensiones del cauce principal (longitud, ancho y ubicación de descarga) y el caudal del río fueron obtenidos para cada subcuenca, con el manejo de información cartográfica disponible en la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI: <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>), de la descarga de datos climatológicos del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN: <https://smn.conagua.gob.mx/es/>), de información hidrométrica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>) y del inventario de emisiones de carbono.

##### 4.4.1 Cobertura de usos de suelo:

Para el cálculo del porcentaje de cobertura por uso de suelo, se utilizó el área de aportación de cada subcuenca (Tabla 9) y el área de cobertura por uso de suelo (Tabla 16), obtenida de la capa de uso de suelo y vegetación serie V (INEGI, 2013) (Figura 8).

**Tabla 16. Área de cobertura de usos de suelo y vegetación por subcuenca.**

Subcuenca	Área para diferentes usos de suelo (km <sup>2</sup> )			
	Agricultura	Bosque	Pastizal	Urbano
Río Amanalco	113.16	110.95	6.53	1.72
Río Molino	41.95	89.27	17.02	2.19
Río San Diego	7.41	26.84	0.00	3.20
Arroyo El Carrizal	3.54	29.36	0.00	3.54
Arroyo Las Flores	4.09	13.49	0.00	4.09
Arroyo Yerbabuena	3.21	8.01	0.00	1.16
Las Laderas	0.03	12.48	0.00	5.93
Total	173.38	290.40	23.55	17.89



**Figura 8. Usos de suelo y vegetación en la cuenca (Fuente: INEGI, 2013).**

#### 4.4.2 Hidrología

Las características de los cauces principales se determinaron con la red hidrográfica de la cuenca hidrológica (INEGI, 2010). En primer lugar, se identificó el río principal de cada una de las subcuencas y se eliminaron los afluentes que llegaban al río principal con el programa de QGis (Qgis.org, 2019) (Figura 9).

A la línea resultante, se le calculó la longitud utilizando la “tabla de atributos”, que mediante la opción de “Statistics...” provee información de la longitud total del cauce de la corriente principal determinada. Para su acceso, se dio click derecho sobre la columna de “Longitud” y posteriormente en “Statistics...” (Figura 10).

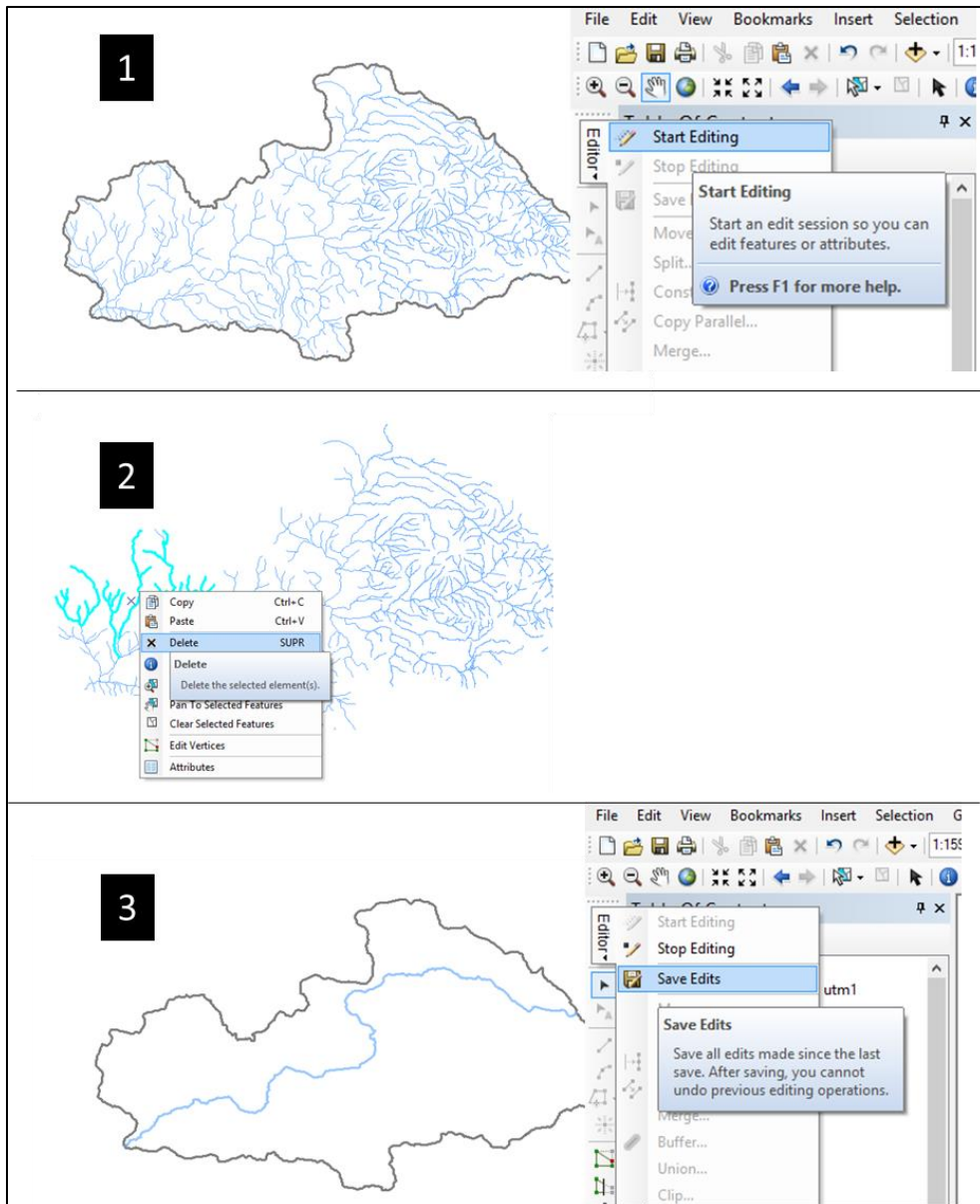


Figura 9. Determinación del cauce principal.

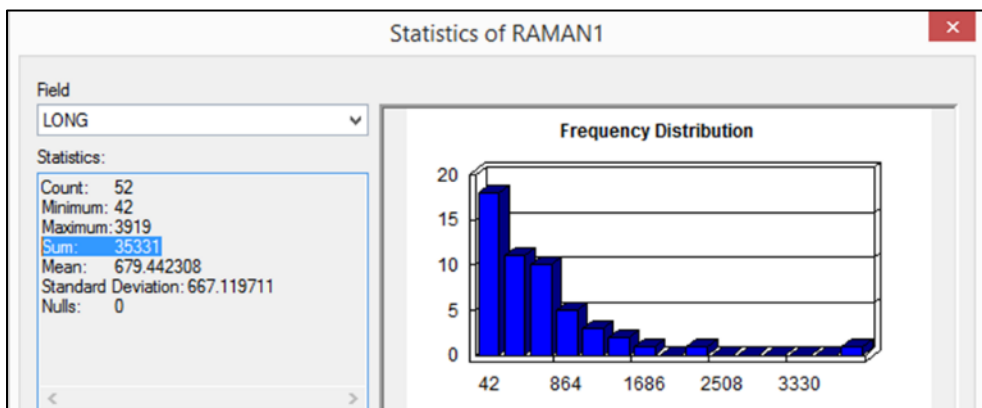
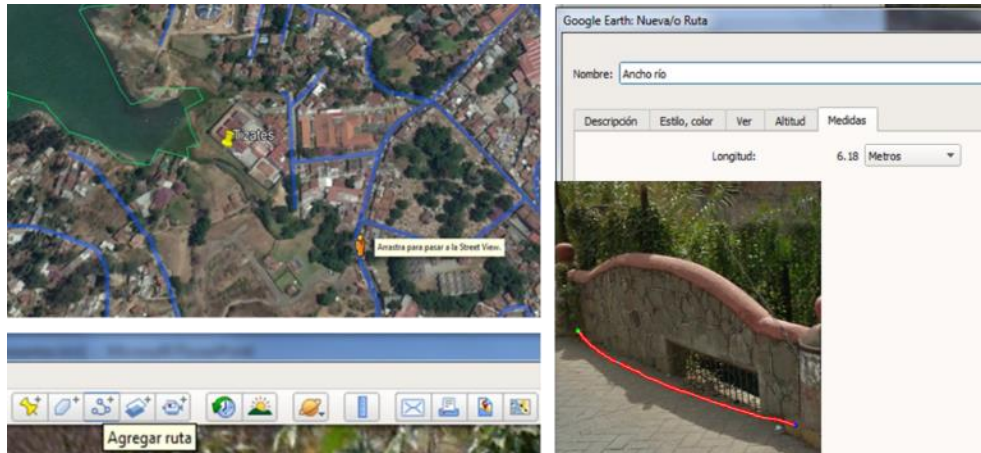


Figura 10. Cálculo de la longitud del cauce principal.

Una vez obtenidos los archivos vectoriales de los cauces de principales ríos, se determinó el ancho de cada uno con el programa Google Earth Pro (Google, 2019). Para ello, se cargaron los archivos de cada río en formato \*.shp y se buscó dentro de cada subcuenca una zona a lo largo del río que permitiera la utilización de la herramienta de “Street view (vista a nivel de suelo)”. Una vez localizada cada zona, se midió el ancho del cauce trazando una línea con la herramienta “Agregar ruta”, identificándose la información requerida en la pestaña de “Medidas” (Figura 11). Es importante aclarar, que la selección de la zona de medición varió en cada subcuenca, dado que el uso de esta herramienta está limitado a las calles que se reconocen en las imágenes disponibles en el programa.



**Figura 11. Determinación del ancho del cauce principal en Google Earth Pro.**

Esta información, se corroboró en campo para los Ríos de San Diego y Molino, con la medición del ancho del cauce utilizando una cinta métrica (Figura 12). Sin embargo, por el acceso al cauce principal, se midió en las zonas cercanas a la descarga a la presa.



**Figura 12. Medición en campo del ancho del cauce principal.**

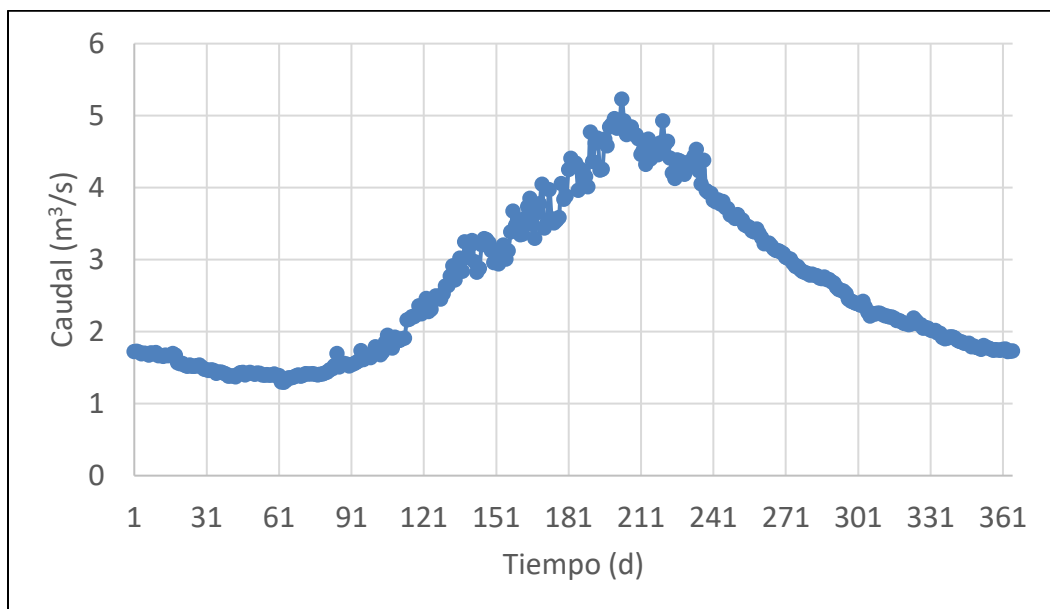
Los caudales de los ríos y los índices de flujo base, fueron obtenidos con base en la información hidrométrica disponible (CONAGUA, 2016) (Tabla 17). Se determinó el promedio diario del caudal (Anexo B. Promedio diario del gasto de los ríos de cinco

estaciones hidrométricas localizadas en la cuenca de la presa Valle de Bravo.) con los años de medición y se consideró como valor inicial el valor correspondiente al primer día del año.

**Tabla 17. Estaciones hidrométricas de la cuenca de la presa Valle de Bravo.**

Estación	Nombre	Años de información	Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)
18169	Molino	1948 a 1968	2.6
18226	San Diego	1952 a 1968	0.7
18275	Santa Mónica	1956 a 1965	0.2
18279	Carrizal	1958 a 1985	0.4
18489	Amanalco	1950 a 1965	6.5

El índice de flujo base se determinó para cada subcuenca con la aplicación del método gráfico (Aparicio, 2009), donde se analizaron los caudales promedio por día de cada estación, se identificó el caudal máximo y mínimo (Figura 13) y se dividió el caudal mínimo entre el caudal máximo para la obtención de este índice.



**Figura 13. Caudal promedio diario de la estación Molino.**

#### 4.4.3 Clima

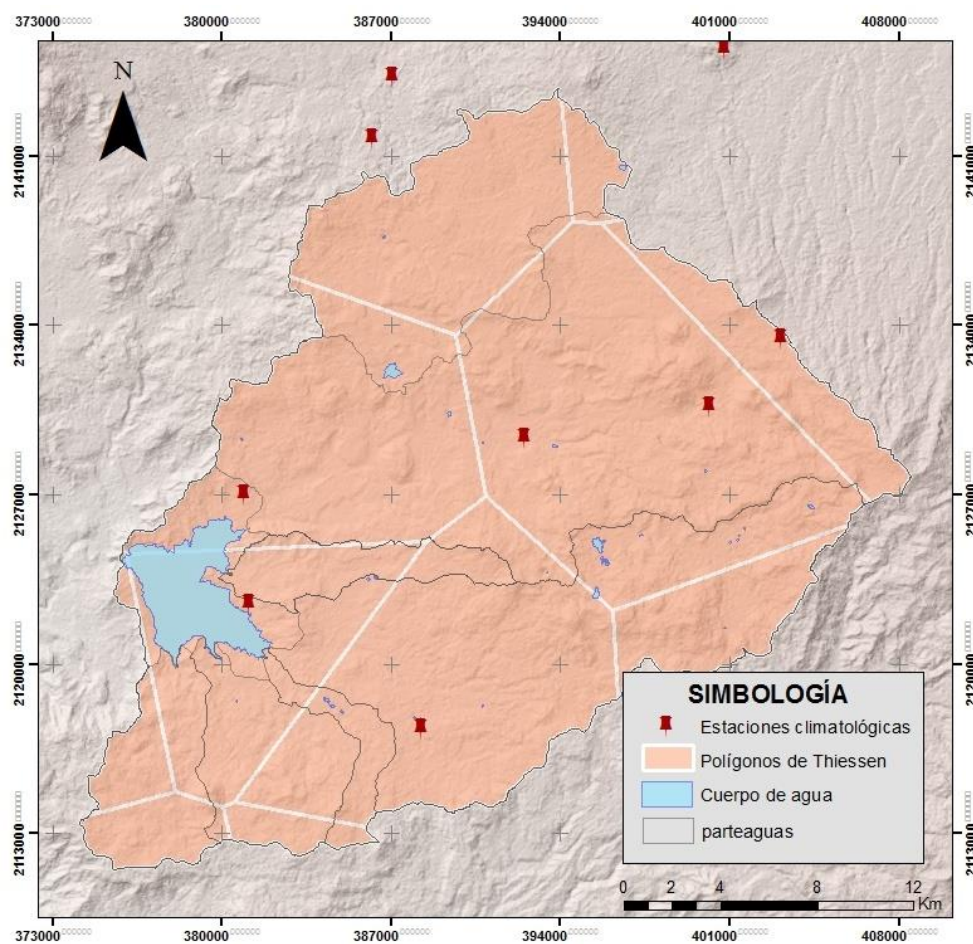
El modelo INCA-C requiere series de datos diarios de temperatura, precipitación, déficits de humedad de suelo (SMD) y lluvia efectiva (HER), los cuales se obtuvieron con el modelo hidrológico PERSiST (Futter *et al.*, 2014). Se consultó la información de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019) y se seleccionaron aquellas dentro de la cuenca hidrológica (Tabla 18).



**Tabla 18. Estaciones climatológicas en la cuenca hidrológica (SMN 2019).**

Clave	Nombre	Periodo de datos
15046	Presa Colorines (CFE)	1970 a 2010
15088	San Francisco Oxtotilpan	1979 a 2009
15130	Presa Valle de Bravo (CFE)	1970 a 2010
15160	Santiago del Monte	1970 a 2009
15165	Valle de Bravo	1970 a 1976
15174	Palo mancornado	1972 a 2009
15241	San Pedro Tenayac, MEX	1978 a 2005
15265	Campamento los berros	1981 a 2010
15368	El fresno, MEX	1983 a 2010
15374	Agua bendita	1983 a 2010
15392	La albarrada	1988 a 2010

Se añadió la capa de las estaciones climatológicas en el programa de QGis y se aplicó el método de polígonos de Thiessen (Figura 14).



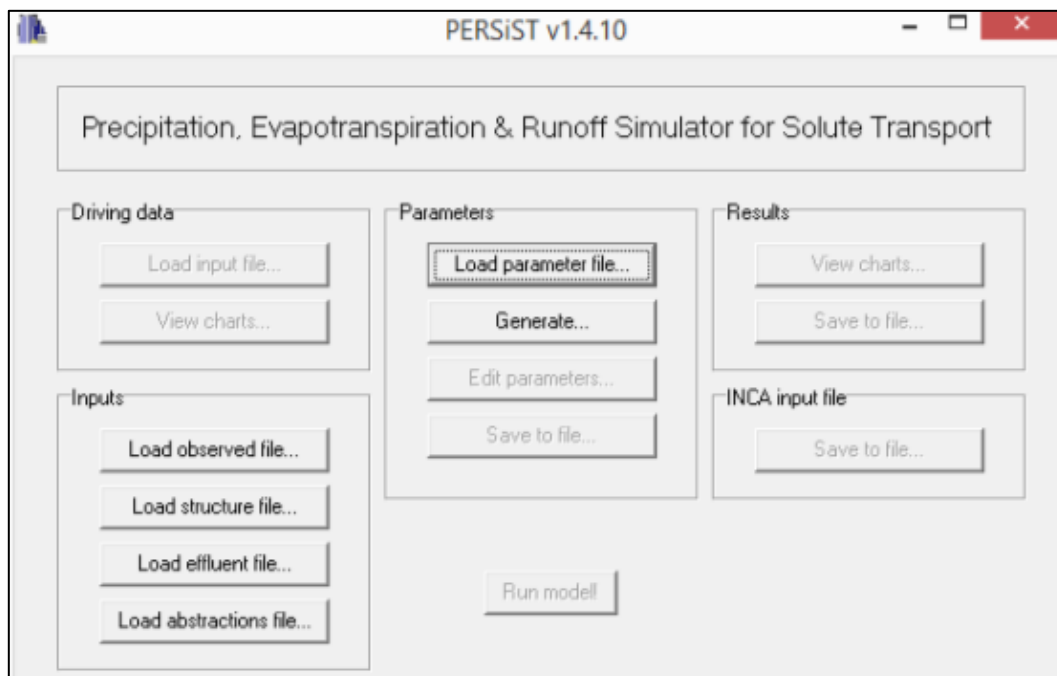
**Figura 14. Polígonos de Thiessen para la cuenca de la presa Valle de Bravo.**

Con este método, se identificaron las estaciones con mayor área de influencia en cada subcuenca (Tabla 19) y se conformaron las series de datos de promedios diarios de temperatura y precipitación.

**Tabla 19. Estaciones climatológicas con mayor área de influencia por subcuenca.**

Subcuenca	Clave	Nombre	Área de influencia (km <sup>2</sup> )
Río Amanalco	15374	Agua Bendita	121.9
Río Molino	15368	El Fresno	82.4
Río San Diego			14.2
Arroyo Las Flores			5.5
Arroyo Yerbabuena			8.8
Arroyo El Carrizal	15241	San Pedro Tenayac	12.9
Las Laderas	15130	Presa Valle de Bravo (CFE)	9.2

Posteriormente, se implementó el modelo PERSiST (Precipitation, Evapotranspiration and Runoff Simulator for Solute Transport) (Figura 15) con información de las características de la cuenca, hidrológicas y series de datos climatológicos para obtener las series de lluvia hidrológica efectiva (HER, por sus siglas en inglés), los déficits de humedad del suelo (SMD, por sus siglas en inglés), temperatura y precipitación.



**Figura 15. Interfaz del modelo PERSiST.**

La información lluvia y precipitación, se configuró en una hoja creada con el “Bloc de notas” acomodando en el extremo superior izquierdo el número de días a los que corresponde la

información, el número de ríos a estudiar para este conjunto de datos y el número o identificador del río. Posteriormente, se añadieron los datos de precipitación (izquierda) y de temperatura (derecha) diarios (Figura 16) y se guardó el archivo como \*.dat.

```

1095
*Time steps
1
*Number of reaches
1
*Reach number
0      13
0      12.5
0      13
0      13
0      12
0      12.5
0      12.5
0      12.5
0      12.5

```

**Figura 16. Hoja de datos de precipitación y temperatura para PERSiST.**

La hoja de datos de parámetros de entrada al modelo PERSiST (Figura 17) se generó directamente en el modelo con la opción de “Generate...” en el apartado de parámetros, en donde se definieron características de la cuenca como la superficie de captación, longitud del río, y usos de suelo. El archivo se guardó con terminación \*.par, para su consulta y/o modificaciones posteriores.

```

1095
1/1/1989
3
0
"Agriculture", "Forest", "Pasture", "Urban"
1      1      1      1
0      0      0      0
3      3      3      3
1      1      1      1
0      0      0      0
0      0      0      0
0.12  0.12  0.12  0.12

```

**Figura 17. Hoja de parámetros de entrada para el modelo PERSiST.**

Finalmente, se aplicó el modelo PERSiST con la opción “Run model!” y los resultados se guardaron con “Save to file...” como una serie de archivos de Excel. Asimismo, como esta

información es utilizada como hoja de entrada al modelo INCA-C, se guardaron los resultados con la opción “INCA input file -> save to file”, con el formato \*.dat requerido por el INCA-C.

#### 4.4.4 Fuentes de emisión

La aportación de carbono por fuentes puntuales se adicionó en el apartado de características del río como una descarga con caudal y concentración definidas. El carbono emitido por fuentes difusas se añadió en el apartado de parámetros del ambiente terrestre como un aporte diario distribuido uniformemente en la superficie de la subcuenca.

##### 4.4.4.1 Fuentes puntuales

La carga externa de C asociada al agua residual tratada se determinó sólo para las subcuencas de Amanalco y Las Laderas, utilizando la información de los gastos de operación de cada planta de tratamiento y aplicando la Ecuación 17 a los datos de DBO<sub>5</sub> en el efluente de cada PTAR, reportados en el inventario de emisiones (Tabla 20).

**Tabla 20. Datos de las PTAR en operación en la cuenca (CONAGUA-IMTA, 2015).**

Subcuenca	Nombre de la PTAR	Gasto de operación (m <sup>3</sup> /s)	C en efluente (mg/L)
Río Amanalco	Amanalco	0.009	4
Las Laderas	Valle de Bravo	0.046	8

Para las fuentes trutícolas, se utilizó la información generada de los volúmenes de agua requeridos para la producción anual de truchas. Como en ambos casos, el volumen se determinó anualmente, se realizó la conversión de m<sup>3</sup>/año a m<sup>3</sup>/s dividiendo el volumen estimado entre 365 días \* 86,400 segundos.

##### 4.4.4.2 Fuentes difusas

Las fuentes difusas evaluadas fueron las descargas de agua residual no tratada urbana y rural, los escurrimientos por uso de suelo y la actividad pecuaria. Para el agua residual no tratada, se utilizó la carga de C asociada a comunidades rurales y urbanas. Sin embargo, para la subcuenca de Las Laderas, esta información se evaluó como una fuente puntual.

El aporte de emisión por cada tipo de fuente se calculó por superficie de cada subcuenca, en hectáreas, por día, de acuerdo con lo siguiente:

$$A = E_m \cdot 2.74 / A_{sc}$$

**Ecuación 18**

Donde:

- A = Aporte de carbono (kg/ha·día)
- E<sub>m</sub> = Cantidad de carbono emitido (t/año)
- A<sub>sc</sub> = Área de la subcuenca (ha)
- 2.74 = Factor de conversión de t/año a kg/día

#### 4.5 Determinación de carga externa de C con el modelo INCA-C

La carga externa de C se determinó por cada subcuenca con la aplicación del modelo INCA-C. Se ordenó la información de entrada en dos archivos diferentes realizados con el bloc de notas y guardados en carpetas designadas para cada subcuenca con las terminaciones *\*.dat* (datos de entrada) y *\*.par* (parámetros de entrada). El primero, con las series de datos de déficits de humedad de suelo, lluvia hidrológica efectiva, temperatura y precipitación (Figura 18); mientras que el segundo, con la información referente a la hidrología, los usos de suelo y los aportes de emisión (Figura 19).

INCA-Molino-1: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
509.346	0.099	11.5		0.099
510.473	0.180978	12		0.495
511.784	0.17576	12		0.297
512.776	0.174599	11.4		0.495
513.908	0.170497	11.7		0.396
514.964	0.168452	11.9		0.495
515.742	0.167462	11.5		0.693
516.366	0.166527	11.8		0.891
516.39	0.169645	11.8		1.485
517.448	0.156817	12.1		0.495
518.577	0.15304	12		0.396
518.563	0.305951	12.3		1.584
519.971	0	11.4		0
519.989	0.15501	11.4		1.386
520.43	0.148431	11.6		0.99
519.471	0.159899	11.5		2.376
518.286	0.159413	11.3		2.574
517.569	0.358339	11.1		2.079
518.749	0.297	11.8		0.297
520.167	0	11.5		0

Figura 18. Hoja de datos de entrada al modelo al modelo INCA-C.

PAR MOLIN -1: Bloc de notas						
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
MOLINO						
"Agriculture","Forest","Urban","PASTURE","5","6 "						
"Agriculture","Forest","Urban","PASTURE","5","6 "						
0.1	0.00822154		0.009884	0.001	0.001	0.001
0	0.0249752		0.006	0.1	0.1	0.1
0	0.0185539		0.001977	0.01	0.01	0.01
10000	21763.1	12500	20000	200000	200000	
15000	128460	220000	10000	10000	10000	
2.41427	8.55185	52	5	5	5	
1	5	5	5	5	5	
15000	58340.1	80000	10000	10000	10000	
2.59312	27.5274	50	10	10	10	
3	3	3	3	3	3	
1.5	1.1725	1	1.5	1	1	
4.00409	3.93627	20	4	20	20	
1/1/2010						
365						
0.0023307		0.0203387		0.007	0.0005	0.0005
0.0032692		3.25189e-05		0.0015	0.01	0.01
0.00559519		0.00532944		0.037	0.0005	0.0005

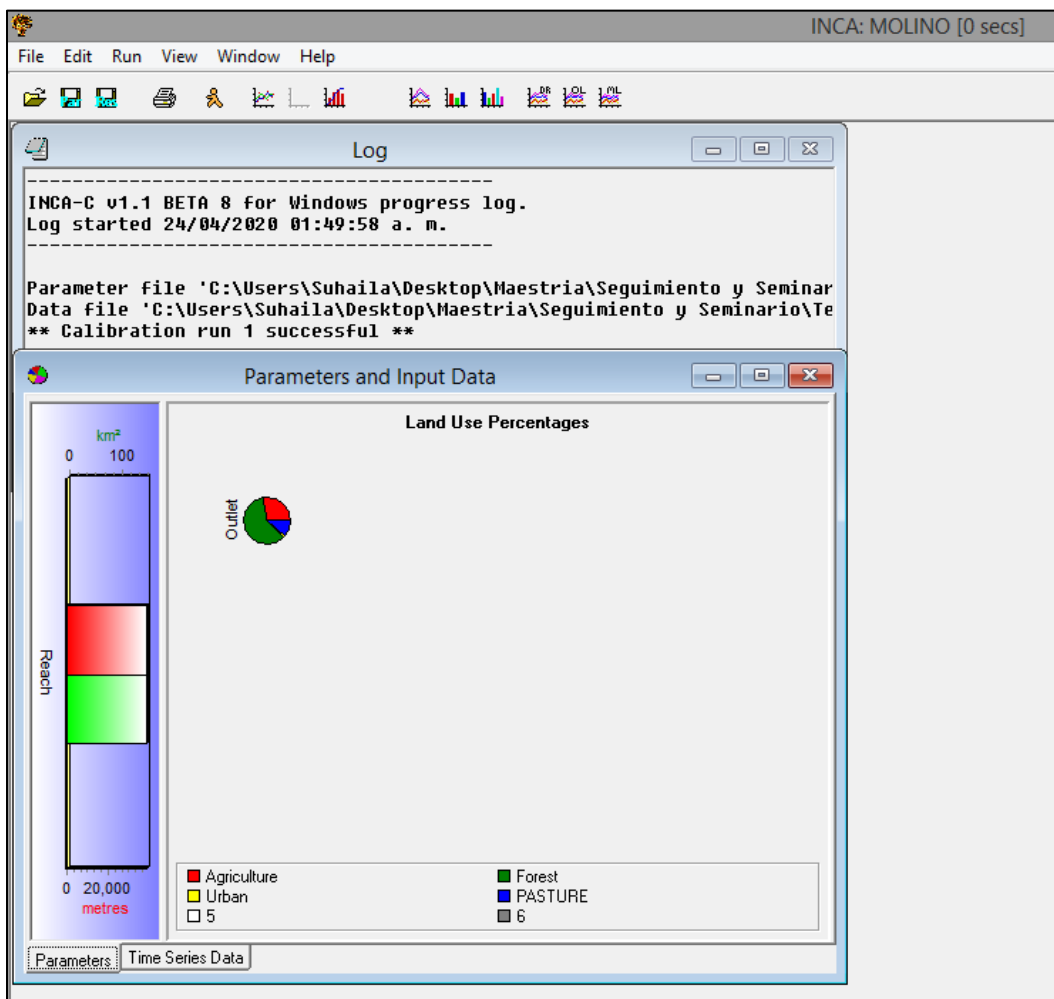
Figura 19. Hoja de parámetros de entrada al modelo INCA-C

Cada par de hojas de entrada se fue cargando al modelo INCA-C (Figura 20), y se corrió el modelo con la pestaña "Run". Los resultados obtenidos se presentan de manera semejante

a las hojas de entrada; sin embargo, el modelo guarda los resultados de carga anual por uso de suelo en un archivo con terminación \*.ald y las concentraciones simuladas a la salida del río en otro, con terminación \*.dsd.

La carga externa por fuentes difusas se determinó mediante el análisis de la hoja \*.ald, que presenta los resultados en kilogramos por hectárea por año. Para obtener los resultados en toneladas al año, se multiplicó el resultado por el área de la subcuenca en hectárea y se dividió entre 1000 kg, que es lo equivalente a una tonelada.

Para las fuentes puntuales, se realizaron dos corridas, una sin agregar las descargas de fuentes puntuales para obtener la hoja \*.dsd con los datos de fuentes difusas, y otra con la adición del aporte por cada una de las fuentes puntuales, para obtener un nuevo archivo con la información referente a éstas y se obtuvo la carga por diferencia.



**Figura 20. Interfaz del modelo INCA-C para su ejecución.**

Para ello fue necesaria la calibración, la simulación y la validación del modelo. El primer y último paso se realizaron con datos de monitoreo de calidad del agua proporcionados por CONAGUA e IMTA de años anteriores; mientras que, para los parámetros de entrada

configurados, se consideraron las condiciones presentes al año de elaboración del inventario de emisiones.

#### 4.5.1 Atenuación natural

La atenuación natural de carbono que ocurre desde que es emitido hasta la desembocadura del río de cada subcuenca, se determinó con la aplicación de la siguiente fórmula (Jayme Torres, 2014):

$$AN_x = \left( 1 - \frac{CE_{C,x}}{Em} \right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

- AN<sub>x</sub> = Atenuación natural del C emitido de x (%)
- CE<sub>C,x</sub> = CE de C de x que llega a la presa estimada con la modelación (t/año)
- x = Fuente de emisión, la subcuenca o la cuenca hidrológica
- Em = Cantidad de C emitido de x (t/año).

#### 4.5.2 Verificación del modelo

Para realizar la verificación del modelo, se utilizó la información de los muestreos de calidad del agua (Acuagranjas, 2002-2009; CONAGUA, 2011) realizados en las desembocaduras de los ríos y la información disponible de caudales obtenidos de las estaciones hidrométricas encontradas en la cuenca hidrológica (CONAGUA, 2016) (Tabla 21).

**Tabla 21. Información disponible para la verificación de los resultados de carga externa de carbono.**

Subcuenca	Años con información de caudales <sup>1</sup>	Años con datos de calidad del agua <sup>2,3</sup>
Río Amanalco	1950 a 1965	2002-2011
Río Molino	1948 a 1968	2002-2011
Río San Diego	1952 a 1968	2002-2005
Arroyo El Carrizal	1958 a 1985	NC
Arroyo Las Flores	NC	2005-2011
Arroyo Yerbabuena	1956 a 1965	NC
Las Laderas	NC	NC

NC: No se cuenta con información.

<sup>1</sup>CONAGUA 2016; <sup>2</sup>Acuagranjas-CONAGUA 2002 a 2009; <sup>3</sup>CONAGUA 2011.

Aunque el modelo INCA-C permite analizar la relación entre los valores observados y los simulados con información de manera diaria (Futter, 2017), la verificación del modelo no se

realizó con esta herramienta debido a los pocos datos disponibles sobre concentraciones de demandas de oxígeno en las desembocaduras de los ríos, siendo de máximo tres datos por año. Además, para algunas subcuencas no se cuenta con esta información ya que no existen estaciones hidrométricas o no se han realizado muestreos.

Tomando en cuenta lo anterior, se realizó un análisis estadístico de los datos simulados con respecto a los observados. Este análisis se efectuó para tres de las siete subcuencas: Amanalco, Molino y San Diego; las cuales cuentan con información de calidad del agua e hidrométrica. Dado que el modelo proporciona resultados diarios de los caudales y las concentraciones de carbono en la desembocadura de los ríos, se tomaron los resultados simulados de los días en que hay registros de calidad del agua. Para obtener dichos datos, fue necesario realizar una nueva modelación en donde se integró la información de cada tipo de fuente: las descargas de agua residual tratada y de la actividad trutícola ( $m^3/s$ ) y su concentración total ( $mg/L$ ), así como los aportes al suelo ( $kg/ha\cdot día$ ) por uso de suelo, agua residual no tratada y actividad pecuaria.

Se determinó el error medio (Ecuación 20), el cual indica la diferencia entre los valores simulados y los observados para una determinada cantidad de muestras (Fox 1981), el error medio absoluto (Ecuación 21), que es el promedio del valor absoluto de las diferencias entre los resultados simulados y observados, y la raíz cuadrada del error medio estándar (*RMSE*, por sus siglas en inglés) (Ecuación 22), indicando el promedio del cuadrado de las diferencias entre datos simulados y observados.

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (P_i - O_i) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} |P_i - O_i| \quad \text{Ecuación 21}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (P_i - O_i)^2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

- EM = Error medio
- EMA = Error medio absoluto
- RMSE = Raíz cuadrada del error medio estándar
- N = Número de observaciones
- $P_i$  = Valor simulado
- $O_i$  = Valor observado



#### 4.6 Evaluación de escenarios de control de cargas

Los escenarios de control de cargas fueron propuestos de acuerdo con los aportes de emisión por cada tipo de fuente y considerando toda la cuenca hidrológica. Estos escenarios se enlistan a continuación:

- i) Reducción del 68% de la emisión por descargas de agua residual urbana no tratada, a través del aumento del caudal tratado de la PTAR Valle de Bravo. Para ello, se debe considerar el aumento de la cobertura de drenaje en las localidades y la eficiencia del tratamiento actual (CONAGUA-IMTA, 2015).
- ii) Reducción del 50% de la emisión por descargas de agua residual rural no tratada, mediante la implementación de humedales en comunidades con una población menor a 2,500 habitantes. Para ello, se considera una eficiencia de remoción promedio del 82% (Nivala *et al.*, 2013; Cubillos *et al.*, 2014)
- iii) Control del 50 % de la emisión por actividad trutícola.
- iv) Control del 50 % de la emisión por actividad porcícola.
- v) Control del 50% de la emisión por actividad bovina.

Para la determinación de la nueva carga externa por escenario, se utilizó la metodología descrita previamente, realizando las modificaciones correspondientes en las descargas de agua, para las fuentes puntuales, y en los aportes de carbono al suelo por área en las hojas de entrada al modelo INCA-C utilizadas para la verificación, ya que en estas últimas se integró toda la información de los aportes de cada fuente considerada.

## 5 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis del inventario de emisiones, los parámetros de entrada al modelo INCA-C y de la determinación de la carga externa de carbono con el modelo INCA-C. Además, se presentan los resultados de la evaluación de los escenarios de control propuestos para la reducción de la carga externa de carbono.

### 5.1 Análisis de inventario

Los resultados de la carga emitida de carbono se presentan por tipo de fuente, con su carga y volumen de agua asociadas cuando este último aplique.

La emisión de carbono por fuentes puntuales (Tabla 22), sumó una carga total de 85 t/año, siendo la emisión de la actividad trutícola correspondiente al 86% y la del agua residual tratada al 14%.

**Tabla 22. Emisiones de C por fuentes puntuales.**

Subcuenca	Población (hab)		Agua residual tratada		Actividad trutícola		
	Rural	Urbana	C <sub>em</sub> (t/año)	V (m <sup>3</sup> /año)	C <sub>em</sub> (t/año)	Producción de trucha (t/año)	V (m <sup>3</sup> /año)
Río Amanalco	26,270	6,879	1	283,824	39	306	48,297,384
Río Molino	10,259				26	203	32,056,344
Río San Diego	2,449				0.4	3	473,040
Arroyo Las Flores	2,769				6	48	7,505,568
Las Laderas	3,752	47,256	11	1,456,717	2	17	2,617,488
Total	46,340	54,135	12	1,740,541	73	577	90,949,824

C<sub>em</sub>: Carbono emitido; V: volumen de agua

Además, se observó que, por este tipo de fuente, la subcuenca que aporta mayor emisión de C es Río Amanalco (47%), seguido por Río Molino (30.5%) y Las Laderas (15%) (Tabla 23), resaltando que, para las dos primeras la aportación proviene principalmente de la actividad trutícola y no por el agua residual tratada, como ocurre en Las Laderas.

**Tabla 23. Emisión total de C por fuentes puntuales por subcuenca.**

Subcuenca	Emisión total de C (t/año)	Volumen de agua (m <sup>3</sup> /año)
Río Amanalco	40	49,563,581
Río Molino	26	32,594,701
Río San Diego	0.4	604,144

**Tabla 23. Emisión total de C por fuentes puntuales por subcuenca. (Cont.)**

Subcuenca	Emisión total de C (t/año)	Volumen de agua (m <sup>3</sup> /año)
Arroyo Las Flores	6	7,653,803
Las Laderas	13	5,348,137
Total	85.4	95,809,388

Las subcuencas con menor aportación son el Arroyo Las Flores y el Río San Diego con el 7 y 0.5% respectivamente, siendo la única fuente de emisión las descargas de agua de la actividad trutícola. Las subcuencas Arroyo El Carrizal y Arroyo Yerbabuena, no presentan ninguna fuente puntual, por lo que no se incluyen en las tablas referidas.

Para la emisión de carbono por fuentes difusas, se presenta la información por cada tipo de fuente. La emisión total por fuentes difusas dio un total de 806 t/año (Tabla 24), siendo la aportación de los escurrimientos por diferentes usos de suelos del 36%, de la actividad pecuaria el 35% y del agua residual no tratada del 29%.

**Tabla 24. Emisión total de C por fuentes difusas por subcuenca.**

Subcuenca	Emisión total de C (t/año)
Río Amanalco	363
Río Molino	213
Río San Diego	36
Arroyo El Carrizal	24
Arroyo Las Flores	38
Arroyo Yerbabuena	16
Las Laderas	116
Total	806

Con respecto al agua residual no tratada (Tabla 25), se observó que la mayor aportación proviene de la subcuenca de las Laderas (12%), seguido los Ríos Amanalco (9%) y Molino (5%).

Las subcuencas con menor emisión por este tipo de fuente son los Arroyos El Carrizal y Yerbabuena con el 0.1 y 0.4 %, respectivamente. La baja emisión en estas subcuencas se asocia principalmente a que la población total de ambas subcuencas es menor a los 1000 habitantes, representando un volumen de agua residual menor en comparación a las demás.

**Tabla 25. Emisión de C por fuentes difusas: agua residual no tratada.**

Subcuenca	Población (hab)		Agua residual no tratada	
	Rural	Urbana	C <sub>em</sub> (t/año)	V (m <sup>3</sup> /año)
Río Amanalco	26,270	6,879	74	982,373
Río Molino	10,259	0	40	538,357
Río San Diego	2,449	0	10	131,104
Arroyo El Carrizal	147	0	1	7,869
Arroyo Las Flores	2,769	0	11	148,235
Arroyo Yerbabuena	694	0	3	37,152
Las Laderas	3,752	47,256	95	1,273,932
Total	46,340	54,135	234	3,119,023

C<sub>em</sub>: Carbono emitido; V: volumen de agua

Con respecto a los usos de suelo (Tabla 26), la mayor aportación proviene de los bosques (23%) y la menor, de los pastizales (2%). La subcuenca con mayor emisión por usos de suelo con respecto a la emisión total por fuentes difusas es Río Amanalco (15%), seguida por Río Molino (12%). Caso contrario, las subcuencas con menor aportación son las subcuencas Arroyo Yerbabuena (1%) y Arroyo El Carrizal (2%).

**Tabla 26. Emisión de C por fuentes difusas: Ecurrimiento de usos de suelo**

Subcuenca	Agrícola	Bosque	Pastizal	Urbano
	C <sub>em</sub> (t/año)	C <sub>em</sub> (t/año)	C <sub>em</sub> (t/año)	C <sub>em</sub> (t/año)
Río Amanalco	45	68	4	2
Río Molino	19	66	13	2
Río San Diego	2	12	0	2
Arroyo El Carrizal	1	13	0	0
Arroyo Las Flores	2	12	0	4
Arroyo Yerbabuena	2	6	0	1
Las Laderas	0.02	9	0	7
Total	71	186	17	18

Referente a la actividad pecuaria (Tabla 27), se obtuvo que el ganado que aporta mayor cantidad de C es el ovino (17%), seguido del bovino (15%) y el porcino (3%), que es el de menor aporte. La subcuenca que emite más por este tipo de fuente es Amanalco (21%) y la de menor fue Arroyo Yerbabuena (0.5%).

De todos los resultados, se obtiene una emisión total en toda la cuenca hidrológica de 891 t/año, obteniéndose que la mayor aportación ocurre por fuentes difusas con el 64%, mientras que las puntuales emiten el 36% del total. Asimismo, las subcuencas con mayor emisión son Río Amanalco (45%), seguida por Río Molino (27%) y Las Laderas (14%).

**Tabla 27. Emisión de DBO<sub>5</sub> y C por actividad pecuaria.**

Subcuenca	Ganado en pie		Emisión de DBO	C <sub>em</sub>
	Tipo	Número de cabezas	t/año	t/año
Río Amanalco	Porcino	929	35	13
	Bovino	699	187	70
	Ovino	3981	232	87
	Subtotal	5609	455	170
Río Molino	Porcino	586	22	8
	Bovino	309	83	31
	Ovino	1531	89	34
	Subtotal	2426	194	73
Río San Diego	Porcino	151	6	2
	Bovino	48	13	5
	Ovino	159	9	3
	Subtotal	358	28	10
Arroyo El Carrizal	Porcino	134	5	2
	Bovino	43	11	4
	Ovino	141	8	3
	Subtotal	318	25	9
Arroyo Las Flores	Porcino	88	3	1
	Bovino	38	10	4
	Ovino	167	10	4
	Subtotal	293	23	9
Arroyo Yerbabuena	Porcino	52	2	1
	Bovino	17	4	2
	Ovino	55	3	1
	Subtotal	124	10	4
Las Laderas	Porcino	76	3	1
	Bovino	24	6	2
	Ovino	81	5	2
	Subtotal	181	14	5
<b>Total</b>		9310	748	280

## 5.2 Parámetros de entrada al modelo INCA-C

La información referente a los parámetros de entrada se obtuvo para cada una de las subcuencas y se presentan de manera resumida en la Tabla 28 .

**Tabla 28. Parámetros de entrada.**

Subcuenca	Tizates	Yerbabuena	San Diego	Molino	El Carrizal	Amanalco	Las Laderas
Área (km <sup>2</sup> )	20.1	12.5	37.5	151.5	33.5	232.4	19
<b>Cobertura de uso de suelo (%)</b>							
Agricultura	19.7	25.6	19.8	27.7	10.5	48.7	0.1
Bosque	64.9	63.9	71.5	58.9	87.6	47.8	65.7
Pastizal	-	-	-	11.2	-	2.8	-
Urbano	15.1	9.3	8.54	1.4	1.7	0.7	31.2
<b>Hidrología</b>							
Longitud de río (m)	13153	12160	13320	38925	13533	33500	13762
Ancho de río (m)	8	8	7	7	7	8	8
Área del río principal (km <sup>2</sup> )	0.105	0.097	0.093	0.272	0.095	0.268	0.11
Índice de flujo base (adim)	0.1	0.1	0.04	0.25	0.04	0.2	0.1
Caudal inicial (m <sup>3</sup> /s)	0.2	0.2	0.3	2.2	0.2	5.5	0.2

**Tabla 28. Parámetros de entrada (Cont.).**

Subcuenca	Las Flores	Yerbabuena	San Diego	Molino	El Carrizal	Amanalco	Las Laderas
<b>Clima</b>							
Estación	15368 El fresno			15241 San Pedro Tenayac	15374 Agua Bendita	15130 Presa VDB (CFE)	
Precipitación media (mm)	1820			874	984	885	
Temperatura media (°C)	15			16	14	19	
<b>Aporte de agua por fuentes puntuales m3/s</b>							
Agua residual tratada [C]: 4 y 8 mg/L	-	-	-	-	-	0.009	0.046
Agua residual no tratada [C]: 75 mg/L	0.0047	0.0012	0.0042	0.0171	0.0002	0.0312	0.0404
Agua de trutícolas [C]: 0.083 mg/L	0.24	-	0.02	1.02	-	1.53	0.05
<b>Aporte de C por fuentes difusas (kg/ha*día)</b>							
Agricultura	0.0027	0.0044	0.0015	0.0034	0.0008	0.0053	2.16E-5
Bosque	0.0164	0.0132	0.0088	0.0119	0.0106	0.0080	0.0130
Pastizal	-	-	-	0.0024	-	0.0005	-
Urbano	0.0055	0.0022	0.0015	0.0004	0.0003	0.0002	0.0101
Pecuario	0.0119	0.0079	0.0076	0.0132	0.0076	0.0201	0.0076

### 5.3 Determinación de carga externa de carbono

Los resultados obtenidos de la evaluación de la carga externa de carbono (CE-C) por fuente de emisión y subcuenca con el modelo INCA-C se presentan en este apartado. La CE-C por fuentes puntuales se presenta en la Tabla 29, en donde se observó que la carga total que llega al cuerpo de agua corresponde al 4% de la emisión total; mientras que, la CE-C por fuentes difusas (Tabla 30), la carga total al cuerpo de agua corresponde al 36 % de la emisión total.

**Tabla 29. Carga externa por fuentes puntuales.**

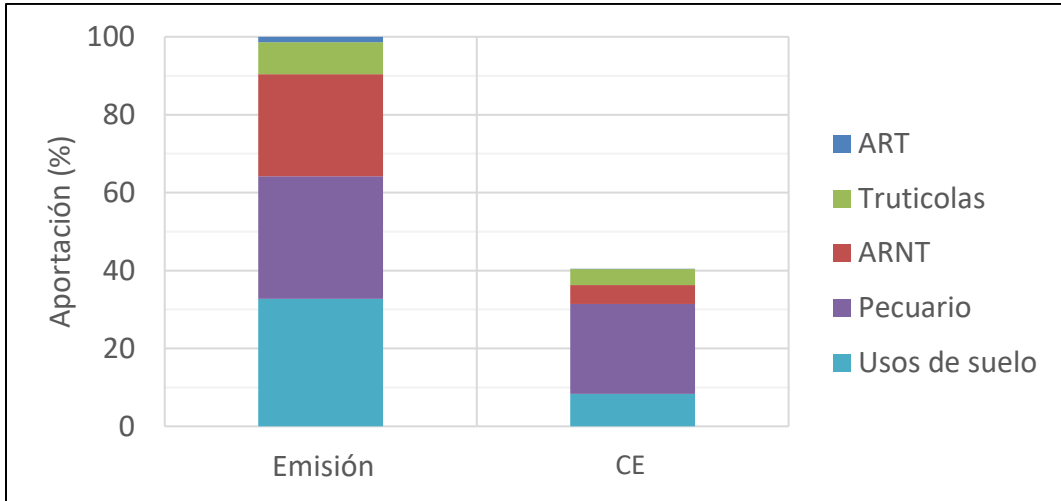
Subcuenca	Emisión (t/año)	Llega (t/año)	Atenuación (%)
Río Amanalco	40	21	72
Río Molino	26	14	46
Río San Diego	0.4	<0.1	80
Arroyo Las Flores	6	1.2	80
Las Laderas	13	0.4	88
Total	85.4	37	89

**Tabla 30. Carga externa por fuentes difusas.**

Subcuenca	Emisión (t/año)	Llega (t/año)	Atenuación (%)
Río Amanalco	363	172	83
Río Molino	213	69	74
Río San Diego	36	13	68
Arroyo El Carrizal	23.6	10	70
Arroyo Las Flores	38	5	68
Arroyo Yerbabuena	16	10	73
Las Laderas	116	46	65
Total	806	323	67

En la Figura 21, se presentan los aportes en porcentaje de las cargas externas por cada fuente con respecto a la emisión total inicial, en la cual se observa que la CE-C total corresponde al 40% de la emisión total, indicando que el 60% restante se atenuó en la cuenca hidrológica.



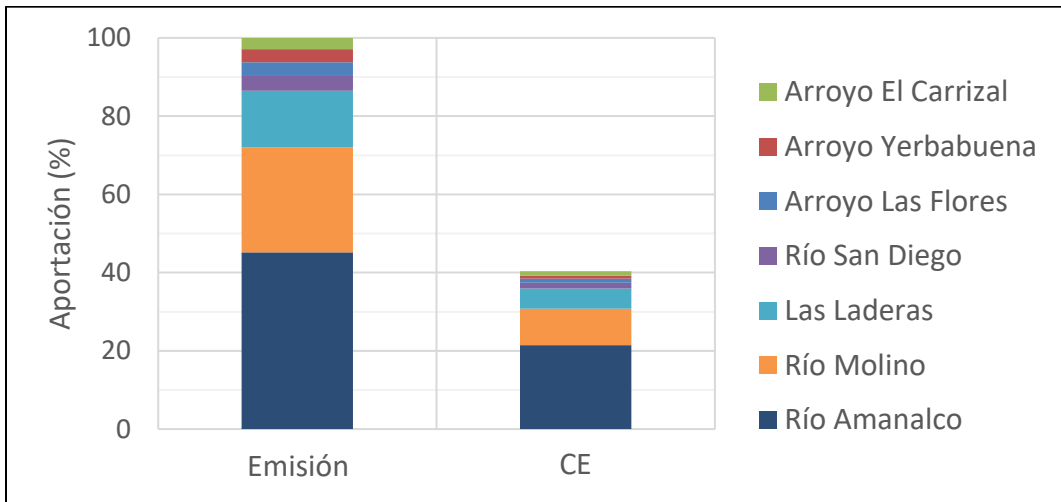


ART: Agua residual tratada; ARNT: Agua residual no tratada

**Figura 21. Aporte de emisión y carga externa (CE) de carbono por tipo de fuente en la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo.**

Las fuentes con mayor atenuación resultaron ser las puntuales, esto puede deberse a que, por su ubicación en la cuenca y la concentración de salida, permitan ser atenuados en su transporte a la presa. Para el caso del agua residual no tratada, aunque para su modelación se consideró como fuente puntual, algunas de las poblaciones se encuentran alejadas de las corrientes de agua, por lo que el agua residual no tratada permanece en fosas sépticas o en el suelo, permitiendo su atenuación.

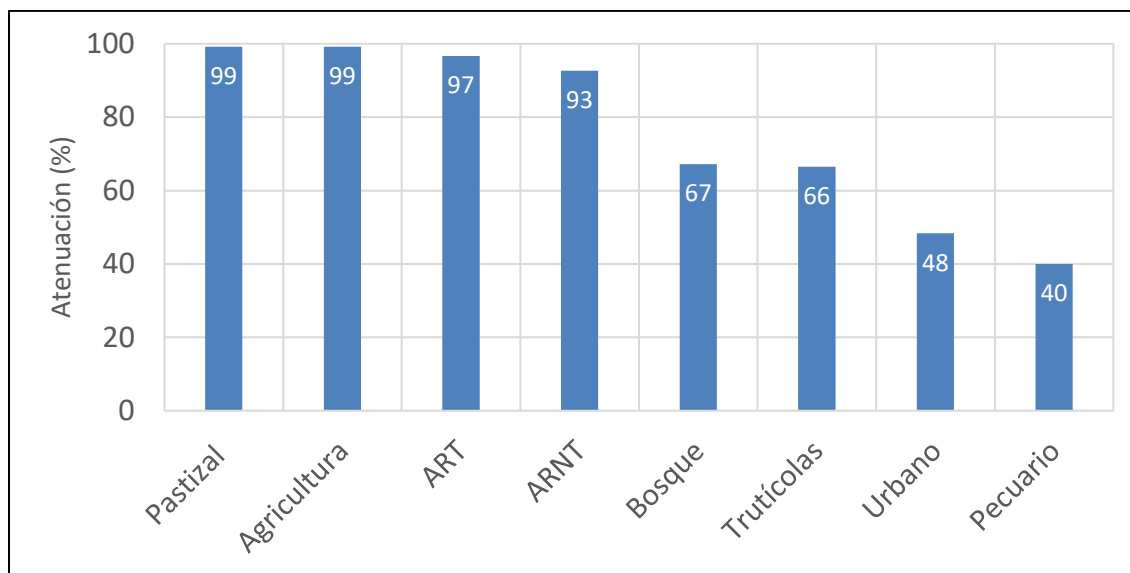
De acuerdo a la Figura 22, se observa que la subcuenca que aporta mayor CE es Río Amanalco con el 21% con respecto a la emisión total, seguida por Río Molino (9%) y Las Laderas (5%); asociándose primero, a la superficie de cada una siendo las primeras dos las más grandes de la cuenca hidrológica, y en segundo, a la cantidad de agua residual no tratada y a la actividad pecuaria que se desarrolla en ellas.



**Figura 22. Aporte de emisión y carga externa (CE) de carbono por subcuenca a la presa Valle de Bravo.**

Para las subcuencas restantes, la CE suma un total de 5%, lo que puede deberse a que las comunidades son de menor población y la actividad pecuaria no es tan significativa como en las demás.

Tras haber obtenido la CE, se obtuvieron los porcentajes de atenuación para cada fuente de emisión (Figura 23).



ART: Agua residual tratada; ARNT: Agua residual no tratada

**Figura 23. Porcentajes de atenuación por tipo de fuente.**

Se observa que la mayor atenuación se presenta en los usos de suelo de pastizal y agricultura, y la menor atenuación se presenta con la actividad pecuaria y con el escurrimiento por uso urbano.

La baja atenuación en el uso de suelo urbano puede asociarse a que estas zonas son porciones de suelo modificado que alteran los regímenes de escurrimientos y la capacidad del suelo para realizar los diferentes procesos que dan lugar a la atenuación natural de carbono (Pennino *et al.*, 2016).

En el caso de la actividad pecuaria, a pesar de que en otras cuencas hidrológicas se han presentado mayores porcentajes de atenuación de nutrientes por este tipo de fuente (Ruíz Castro, 2018; Jayme-Torres y Hansen, 2018), el porcentaje de atenuación de carbono obtenido en la cuenca de la presa Valle de Bravo puede asociarse a que los procesos de atenuación que se desarrollan en el suelo, son limitados por la constante aportación de excretas animales, a la cantidad de lluvia que se presenta en la cuenca y a los escurrimientos derivados de ella.

Derivado de lo anterior, los escenarios de reducción y de control de cargas fueron propuestos y evaluados de tal manera de conseguir una disminución tanto en la emisión como en la CE.

### 5.3.1 Verificación del modelo

En la Tabla 31, se presentan los resultados obtenidos de los estadísticos aplicados, con los cuales se relacionaron las concentraciones de C simuladas y observadas.

**Tabla 31. Resultados de los estadísticos aplicados para evaluar la simulación**

Subcuenca	C promedio simulado	C promedio observado	EM	EMA	RMSE	RE (%)
Amanalco	1.5	1.9	0.1	0.6	0.7	37
Molino	1	1.5	-0.3	0.5	0.6	41
San Diego	1.7	1.3	0.3	0.4	0.5	35

Se observó que existe una variación entre los valores simulados y observados, esto puede relacionarse a que los datos obtenidos en campo presentan poca variación, repitiéndose en ocasiones el valor medido, y también a la cantidad de información disponible para cada subcuenca influyendo en los resultados.

Considerando que el error relativo resultó menor al 40% se consideró que el modelo tiene un desempeño aceptable para los fines expuestos a este trabajo.

### 5.4 Evaluación de escenarios de reducción de carga externa.

A continuación, se presentan los resultados de los escenarios propuestos para la disminución de la carga externa mediante la reducción del 50% de la emisión (Tabla 32).

**Tabla 32. Reducción de la CE de carbono por diferentes escenarios.**

Situación de CE	CE (t/año)	Porcentaje de emisión actual (%)
Actual	360	40
Escenario <i>i</i> )	340	38
Escenario <i>ii</i> )	357	40
Escenario <i>iii</i> )	337	38
Escenario <i>iv</i> )	348	39
Escenario <i>v</i> )	296	33

El análisis de cada uno de ellos se realizó con respecto a la emisión actual (891 t/año), observándose una mejor eficiencia en la reducción de la CE en el escenario 5 (33%), en el cual se reduce el 50% de la emisión por ganado bovino en toda la cuenca hidrológica. Por el contrario, el escenario 2 correspondiente al tratamiento del agua residual rural, no representó una disminución importante en la carga pues es compensada con el aporte

asociado al tratamiento en sí, obteniendo una disminución de 3 t/año con respecto a la actual, correspondiente al 40%.

Para lograr la implementación del escenario *i)* se sugiere la separación del drenaje pluvial del drenaje sanitario (Villanueva-Beltrán, 2011) permitiendo la conducción del agua residual de la zona urbana de Valle de Bravo a la PTAR Valle de Bravo y considerando la eficiencia de remoción actual (CONAGUA-IMTA, 2015). El escenario *ii)* requiere de construcción de humedales artificiales, así como de infraestructura que permita la conducción del agua residual a estos sistemas.

Los escenarios propuestos para el control de la emisión por actividad pecuaria se pueden lograr con la implementación de estrategias como uso de excretas como fertilizante, cambio del alimento del animal, composteo, generación de energía y tratamiento del agua y de los sólidos generados (Petersen *et al.*, 2007; Pedizzi *et al.*, 2018; USEPA, 2020). Sin embargo, la estrategia que se utilice y la eficiencia de cada una de estas estará en función del tipo de ganado, las regulaciones ambientales del sector y los costos. Por ello, se recomienda visualizar la implementación de estrategias para el control de excreta de manera integral, sin modificar las necesidades de los propios animales y cumplir con los requerimientos ambientales. Asimismo, se ha recomendado el uso de excretas como fertilizantes de cultivos, siempre y cuando se apliquen en la cantidad y tiempo adecuados, para evitar una saturación de nutrientes en el suelo y su posterior arrastre a los cuerpos de agua (USEPA, 2020).



## 6 Conclusiones

La emisión total de carbono en la cuenca hidrológica de la presa Valle de Bravo resultó de 891 t/año, obteniendo la mayor emisión por los diferentes usos de suelo (33%), seguida por la actividad pecuaria (31%) y el agua residual no tratada (26%). Las emisiones asociadas a la actividad trutícola (8%) y al agua residual tratada (2%) (fuentes puntuales), son las fuentes con menor emisión, por lo que se determina que la mayor emisión de C para la cuenca de la presa de Valle de Bravo es por fuentes difusas.

La CE-C al cuerpo de agua corresponde al 40% de la emisión total, es decir 360 t/año de carbono, indicando que existe una atenuación del 60% de la emisión en la cuenca hidrológica durante su transporte al cuerpo de agua.

Se afirma que las cargas de carbono provienen de diferentes fuentes de emisión, por lo que la cantidad y la forma de emisión difieren entre sí. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (fuentes puntuales), reducen en un 90% la carga de carbono de las aguas residuales que ingresan a la planta debido a la eficiencia de los procesos de tratamiento con los que operan, aportando menor carga de emisión a los ríos que desembocan al cuerpo de agua.

Los usos de suelo, el agua residual no tratada y la actividad pecuaria (fuente difusa) generan un mayor aporte de C con respecto a las puntuales ya que los desechos son descargados directamente al suelo, a los ríos o al cuerpo de agua, y dependiendo de su ubicación, pueden tener menor atenuación. Asimismo, el transporte de carbono está influenciado por las características de la cuenca hidrológica, tales como la precipitación, las propiedades del suelo y la hidrología, controlando los procesos que dan lugar a la atenuación de carbono.

De los cinco escenarios evaluados para la reducción de la CE-C, se obtuvo una disminución del 7% con respecto a la emisión total de C con el escenario *v*), en el que se propone el control del 50% de la emisión de la actividad pecuaria por ganado bovino. Este mismo escenario permite reducir la CE-C en un 33%, siendo la mayor reducción obtenida de los escenarios evaluados.

Con los escenarios *i*) tratamiento del agua residual de poblaciones urbanas mediante la reducción del 68% de la emisión, y *iii*) control del 50% de la emisión por actividad trutícola, se logra una disminución de la emisión total en un 5 y 4%, respectivamente, alcanzando una reducción de la CE-C del 38% en ambos casos.

Los escenarios *ii*) tratamiento del agua residual rural reduciendo 50% de la emisión y *iv*) control del 50% de las emisiones por ganado porcino, demostraron una disminución en la emisión del 5 y 2%, pero no demostraron cambios significativos en la carga final, manteniéndose en 40%.



## 7 Referencias

- Acuagranjas-CNA. (2002). Muestreos biológicos en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final del convenio No. GAVM-GT-MEX-02-112-RF-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Acuagranjas-CNA. (2003). Monitoreo biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala, 2003. Informe final del convenio No. GAVM-GT-MEX-03-059-RF-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Acuagranjas-CNA. (2004). Modelación matemática de la calidad del agua y monitoreo biológico de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final del convenio No. GAVM-GT-MEX-04-083-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Acuagranjas-CONAGUA. (2005). Monitoreo biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala en el año 2005, y adecuación del modelo matemático para la presa Villa Victoria, segunda etapa. Informe final del convenio No. GAVM-GT-MEX-05-410-RF-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Acuagranjas-CONAGUA. (2006). Actualización del monitoreo biológico de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala para el año 2006 y actualización del modelo matemático para la presa El Bosque. Informe final del convenio No. GAVM-GT-MEX-06-415-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Acuagranjas-CONAGUA. (2007). Monitoreo biológico de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala para el año 2007. Informe final del convenio No. OAVM-GT-MEX-07-412-RF-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Acuagranjas-CONAGUA. (2009). Seguimiento de la calidad del agua de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala, 2009. Informe final del convenio No. OAVM-DT-MEX-09-430-RF-LP. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- Ajani J.I., Keith H., Blakers M., Mackey B. y King H. P. (2013). Comprehensive carbon stock and flow accounting: A national framework to support climate change mitigation policy. *Ecological Economics*, 89, 61-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.01.010>.
- Arabi M. (2015). Nutrient Modeling Overview. Colorado, USA: Colorado State University. Disponible en: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/day2\\_arabi.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/day2_arabi.pdf)



- Arredondo Figueroa J.L., Díaz Zavaleta G. y Ponce Palafox J.T. (2007). Limnología de presas mexicanas: aspectos teóricos y prácticos. Distrito Federal, México: Editorial AGT.
- Ashley K. I. (1976). Effects of hypolimnetic aeration on functional components of the lake ecosystem. Tesis de maestría en Ciencias. Vancouver, Canadá: Universidad de British Columbia.
- Ashley K. I. (1983). Hypolimnetic aeration of a naturally eutrophic lake: physical and chemical effects. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40 (9), 1343-1359. DOI: <https://doi.org/10.1139/f83-157>.
- Benedini M. y Tsakiris G. (2013). Water quality modelling for rivers and streams. Dordrecht, Netherlands: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5509-3>.
- Beutel M. W. y Horne A. J. (1999). A review of the effects of hypolimnetic oxygenation on lake and reservoir water quality. *Lake and Reservoir Management*, 15 (4), 285-297. DOI: <https://doi.org/10.1080/07438149909354124>.
- Bierlein K. A., Rezvani M., Socolofsky S. A. Bryant L. D., Wüest A. y Little J.C. (2017). Increased sediment oxygen flux in lakes and reservoirs: The impact of hypolimnetic oxygenation. *Water Resources Research*, 53, 4876-4890. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016WR019850>.
- Butman D., Stackpoole S., Stets E., McDonald C. P, Clow D. W. y Striegl R. G. (2016). Aquatic carbon cycling in the conterminous United States and implications for terrestrial carbon accounting. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (1), 58-63. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1512651112>.
- Carnero-Bravo V., Merino-Ibarra M., Ruiz-Fernández A.C., Sanchez-Cabeza J.A. y Ghaleb B. (2015). Sedimentary record of water column trophic conditions and sediment carbon fluxes in a tropical water reservoir (Valle de Bravo, Mexico). *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4680-4694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3703-0>.
- Chu T. W., Shirmohammadi A., Montas H. y Sadeghi A. (2004). Evaluation of the SWAT Model's sediment and nutrient components in the piedmont physiographic region of Maryland. *American Society of Agricultural Engineers*, 47 (5), 1523-1538. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.17632>.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). Muestreo de la calidad del agua de los afluentes de la presa Valle de Bravo para el año 2011. Comunicación personal.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- CONAGUA-BM (Comisión Nacional del Agua- Banco Mundial). (2015). Cutzamala: Diagnóstico integral. Ciudad de México, México. Disponible en:

<http://documents.banquemondiale.org/curated/fr/309801468189248037/pdf/99219-P150092-SPANISH-WP-PUBLIC-Box393194B.pdf>

- CONAGUA-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2015). Estudio de ingeniería básica para determinar el método óptimo de oxigenación del agua en la presa Valle de Bravo, Estado de México. Informe final del convenio No. SGT-OCAVM-MEX-15-571-RF-AD-CC. Jiutepec, Morelos: Comisión Nacional del Agua.
- Cooke D. G., Welch E. B., Peterson S. A. y Nichols S. A. (2005). Restoration and management of lakes and reservoirs (3rd edition). Florida, USA: CRC Press.
- Corzo Juárez C.E. (2009). Contaminación de la cuenca del Arcediano y propuesta de saneamiento. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cubillos J., García J.D, Giraldo M.F. y Paredes D. (2014). Efecto de la carga hidráulica y medio filtrante sobre la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales construidos sembrados con *Guadua angustifolia kunth*. Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua, -Michoacán, México. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, p. 48-51.
- Dodds W. y Whiles M. (2002). Freshwater ecology: concepts and environmental applications of limnology (2nd edition). New York, USA: Academic Press of Elsevier.
- ECO Oxygen Technologies. (2003). Project description: Dallas TX, primary clarifier odor control. Disponible en: <http://www.eco2tech.com/installation/dallas-tx/>
- Elias X. (2009). Reciclaje de residuos industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora (2a edición). Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.fao.org/3/T0551E/t0551e03.htm>
- Fox, D.G. (1981). Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 62 (5), 599-609. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1981\)062<0599:JAQMP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1981)062<0599:JAQMP>2.0.CO;2).
- Futter M. N., Butterfield D., Cosby B. J., Dillon P. J., Wade A. J. y Whitehead P. G. (2007). Modeling the mechanisms that control in-stream dissolved organic carbon dynamics in upland and forested catchments. *Water Resources Research*, 43, W02424. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006WR004960>.

- Futter M. N., Erlandsson M. A., Butterfield D., Whitehead P. G., Oni S.K. y Wade A. J. (2014). PERSiST: a flexible rainfall-runoff modelling toolkit for use with the INCA family of models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 855-873. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-18-855-2014>.
- Futter M. N. y Ledesma J.L.J. (2017). Manual for Integrated Catchments model for Carbon (INCA-C): Parameter description and calibration strategy. Disponible con el paquete de instalación del modelo INCA-C. Comunicación personal.
- Guerrero Muñoz J. (2012). Capacidad de carga vs calidad de agua en acuicultura. Antioquía, Colombia: Agrinal Colombia S.A.S. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/0047829542cfb61bd564f>
- Hansen A. M., Hernández-Martínez C. y Falcón-Rojas A. (2017). Evaluation of eutrophication control through hypolimnetic oxygenation. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 598-601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.159>.
- IMTA-Fundación Gonzalo Río Arronte (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Fundación Gonzalo Río Arronte). (2012). Plan estratégico para la recuperación ambiental de la cuenca Amanalco-Valle de Bravo: Actualización. Jiutepec, Morelos. Disponible en: [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/05/Plan\\_cuenca\\_Amanalco\\_Valle\\_de\\_Bravo.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/05/Plan_cuenca_Amanalco_Valle_de_Bravo.pdf)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1998). Modelo digital de elevación Valle de Bravo, escala 1:50000. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2005). Guía para la interpretación de cartografía climatológica. Ciudad de México, México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Metadatos>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2007). Carta edafológica serie II del Continuo Nacional Morelia y México, escala 1:250000. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). Red hidrográfica de la subcuenca hidrográfica RH18Gg-R. Tilostoc, escala 1:50000 (edición 2.0). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/default.html#Descargas>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). Uso de suelo y vegetación Serie V, escala 1:250000. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0150>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). Marco geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2014 versión 6.2 (DENUE). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004386>

- Jae-Ho J., Kwang-Wook J. y Chun-Gyeong Y. (2012). Modification of SWAT model for simulation of organic matter in Korean watersheds. *Water Science & Technology*, 66, 2355-2362. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2012.465>.
- Jayne-Torres G. y Hansen A.M. (2018). Nutrient loads in the river mouth of the Río Verde basin in Jalisco, Mexico: how to prevent eutrophication in the future reservoir? *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 20497-20509. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0334-2>.
- Jayne Torres G. (2014). Movilización de nitrógeno y fósforo en la cuenca hidrológica del Río Verde. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kon-Kee L., Atkinson L., Quiñones R. y Talaue-McManus L. (2010). Carbon and nutrient fluxes in continental margins, a global synthesis. Global Change- The International Geosphere-Biosphere Programme Series. Berlín, Alemania: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92735-8>.
- Manahan S.E. (2007). Introducción a la química ambiental. Distrito Federal, México: Reverté Ediciones.
- Márquez Pacheco H. (2015). Evaluación de la carga interna de fósforo en un cuerpo de agua y propuesta de su regulación mediante inmovilización en sedimento. Tesis de doctorado en Ingeniería Ambiental. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mayorga E., Seitzinger S. P., Harrison J. A., Dumont E., Beusen A. H. W., Bouwman A.F., Fekete B.M., Kroeze C. y Van Drecht G. (2010). Global Nutrient Export from WaterSheds 2 (NEWS2): Model development and implementation. *Environmental Modelling & Software*, 25, 837-853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.01.007>.
- Mei-Yan J., Jong-Jun L., Hye-Ji O., Gui-Sook N., Kwang-Seuk J., Jong-Min O. y Kwang-Hyeon C. (2019). The response of catchment ecosystems in eutrophic agricultural reservoirs to water quality management using DOM fluorescence. *Sustainability*, 11 (24), 7207. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11247207>.
- Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R. y Williams J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical documentation version 2009. Texas, USA: Texas A&M University.
- Niemistö J., Silvonen S. y Horppila J. (2019). Effects of hypolimnetic aeration on the quantity and quality of settling material in a eutrophied dimictic lake. *Hydrobiologia*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04160-6>.
- Nivala J., Headley T., Wallace S., Bernhard K., Brix H., van Afferden M., y Muller R.A. (2013). Comparative analysis of constructed wetlands: The design and construction of the

- ecotechnology research facility in Langenreichenbach, Germany. *Ecological Engineering*, 61, 527-543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.035>.
- NRC-US (National Research Council of the United States). (1991). Restoration of aquatic ecosystems: science, technology and public policy. Washington DC, USA: National Academy Press.
- Olvera Viascán V. (1992). Estudio de eutroficación de la presa Valle de Bravo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 2 (3), 148-161.
- Pacheco F.S., Roland F. y Downing J.A. (2013). Eutrophication reverses whole-lake carbon budgets. *Inland waters*, 4, 41-48. DOI: <https://doi.org/10.5268/IW-4.1.614>.
- Palau A., Alonso M. y Corregidor D. (2010). Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (Río Ter, NE España). *Ingeniería del Agua*, 17 (3), 247-255. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2978>.
- Pedizzi C., Noya I., Sarli J., González-García S., Lema J.M., Moreira M.T. y Carballa M. (2018). Environmental assessment of alternative treatment schemes for energy and nutrient recovery from livestock manure. *Waste management*, 17, 276-286. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.007.
- Pennino M.J., Kaushal S.S, Mayer P.M., Utz R.M. y Cooper C.A. (2016). Stream restoration and sewers impact sources and fluxes of water, carbon, and nutrients in urban watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 3419-3439. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-20-3419-2016>.
- Polprasert C. (2007). Organic waste recycling: Technology and management (3rd edition). London, UK: IWA Publishing. Disponible en: <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402024.pdf>
- QGIS.org. (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponible en: <http://qgis.org>.
- Ramírez-Zierold J. A., Merino-Ibarra M., Monroy-Ríos E., Olson M., Castillo F.S., Gallegos M.E. y 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/07438140903539790>.
- Raupach M. R., Kirby D. J., Barret D. J., Briggs P. R., Lu H. y Zhang L. (2001). Balances of water, carbon, nitrogen and phosphorus in Australian landscapes: (2) model formulation and testing. CSIRO Land and Water Technical report 41/01. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water. Disponible en: <http://www.clw.csiro.au/publications/technical2001/tr41-01.pdf>

- Roldán Pérez G. y Ramírez Restrepo J.J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical (2a edición). Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Ruíz Castro A. A. (2018). Evaluación de cargas de fósforo y nitrógeno en el sitio de la presa El Arcediano y propuesta para su control. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sargent R. G. (2014). Verifying and validating simulation models. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Georgia, USA: IEEE Press, p. 118-131.
- Seitzinger S.P. y Harrison J. A. (2005). Sources of delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB4S01. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GB002606>.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2015). Anuario estadístico de la producción ganadera del año 2015. Disponible en: [https://nube.siap.gob.mx/cierre\\_pecuario/](https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/)
- Singleton V. L. y Little J. C. (2006). Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems- A review. *Environmental Science & Technology*, 40 (24), 7512-7520. DOI: <https://doi.org/10.1021/es060069s>.
- Smith T.M. y Smith R.L. (2007). Ecología (6a edición). Madrid, España: Pearson Education S.A.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2019). Información estadística climatológica. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Taiganides E. P., Pérez Espejo R. y Girón Sánchez E. (1996). Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. Distrito Federal, México: Consejo Mexicano de Porcicultura.
- Tortora G.J., Funke B.R. y Case C.L. (2007). Introducción a la microbiología (9a edición). Buenos Aires, Argentina: Medica Panamericana.
- Tranvik L. J., Downing J. A., Cotner J. B., Loiselle S. A., Striegl R. G., Ballatore T. J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L, Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D. M., McCallister S.L., McKnight D. M., Melack J. M., Overholt E., Porter J. A., Prairie Y., Renwick W. H., Roland F., Sherman B. S., Schindler D. W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M. J., Verschoor A. M., von Wachenfeldt E. y Werhenmeyer G. A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54 (6 part 2), 2298-2314. DOI: [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2298](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298).

- UNEP-IETC (United Nations Environment Programme- International Environmental Technology Centre). (1989). Directrices para la gestión de lagos. Shiga, Japón: International Lake Environment Committee Foundation.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2019). Water data and tools: Water quality models. Disponible en: <https://www.epa.gov/waterdata>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2020). The source and solutions: Agriculture. Disponible en: <https://www.epa.gov/nutrientpollution/sources-and-solutions-agriculture>
- Villanueva Beltrán J.T. (2011). Evaluación de la carga externa de fósforo y nitrógeno en la presa Valle de Bravo y propuesta de solución. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Wade A.J., Whitehead P.G. y Butterfield D. (2002a). The Integrated Catchments model of Phosphorus dynamics (INCA-P), a new approach for multiple source assessment in heterogeneous river systems: model structure and equations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6 (3), 583-606. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-6-583-2002>.
- Wade A.J., Durand P., Beaujouan V., Wessel W.W., Raat K.J., Whitehead P.G., Butterfield D., Rankinen K. y Lepisto A. (2002b). A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6 (3), 559-582. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-6-559-2002>.
- Whitehead P. G., Wilson E.J. y Butterfield D. (1998). A semi-distributed Integrated Nitrogen model for multiple source assessment in Catchments (INCA): Part I- model structure and process equations. *The Science of the Total Environment*, 210/211: 547-558. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00037-0).

## Anexos

### Anexo A. Promedio diario de temperatura y precipitación con datos de cuatro estaciones del periodo de 1983 a 2010.

**Tabla 33. Estación climatológica 15374 Agua Bendita**

Temperatura (°C)												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	10.6	10.6	12.5	14.2	15.6	15.9	15.8	15.4	15.1	14.6	13.2	12.3
2	11.0	11.1	12.5	14.7	15.6	16.0	16.1	15.6	15.2	14.8	12.5	12.0
3	10.9	11.3	12.4	14.5	15.8	16.1	16.3	15.3	15.1	14.8	12.4	11.8
4	10.9	11.3	12.6	14.6	15.7	16.0	16.3	15.3	15.1	14.6	12.1	11.7
5	10.9	11.2	12.6	14.7	16.0	16.2	16.3	15.3	15.3	14.7	12.3	11.8
6	10.7	10.9	12.7	14.8	16.1	16.5	16.3	15.1	15.2	14.6	12.4	11.8
7	10.8	10.8	12.3	14.6	16.1	16.5	16.2	15.1	15.2	14.7	12.5	11.8
8	11.1	10.7	12.3	14.5	16.1	16.5	16.3	15.4	15.1	14.5	12.4	12.1
9	10.4	10.8	12.6	14.4	16.2	16.3	15.9	15.5	15.1	14.6	12.2	11.8
10	10.5	11.1	12.6	14.4	16.1	16.2	15.8	15.6	15.1	14.6	12.4	11.8
11	10.5	11.4	12.9	14.7	15.9	16.2	16.1	15.4	15.0	14.3	12.4	11.9
12	10.6	11.5	13.3	14.8	16.0	16.2	15.9	15.5	15.3	14.1	12.6	11.5
13	10.6	11.3	13.3	15.1	16.2	16.0	15.8	15.1	15.2	14.1	12.8	11.5
14	10.6	11.1	12.9	15.1	16.1	16.5	15.4	15.5	15.1	14.0	12.5	11.2
15	10.6	11.0	13.1	14.8	16.2	16.3	15.5	15.4	15.1	14.2	12.2	11.4
16	10.6	11.1	13.1	15.1	16.1	16.2	15.2	15.2	15.2	13.8	12.3	11.4
17	10.5	11.4	13.3	15.2	16.0	15.9	15.4	15.4	15.1	13.6	12.0	11.4
18	10.6	11.7	13.5	15.2	16.0	15.9	15.9	15.6	15.1	13.8	11.9	11.3
19	10.3	11.6	13.6	15.3	16.2	15.7	16.1	15.1	15.1	14.0	12.2	11.1
20	10.4	11.8	13.3	15.3	16.0	15.7	15.8	15.5	14.9	13.7	12.2	11.2
21	10.6	11.5	13.4	14.8	16.3	16.1	15.5	15.2	14.8	13.9	12.3	10.8
22	10.8	11.4	13.7	15.2	15.9	16.1	15.4	15.4	14.7	13.5	12.7	11.1
23	10.4	11.3	13.7	15.4	15.8	16.0	15.3	15.5	14.7	13.2	12.3	11.2
24	10.8	11.6	13.8	15.1	15.7	16.0	15.4	15.6	14.7	13.3	12.1	10.8
25	11.4	11.5	14.0	15.3	15.9	16.4	15.2	14.9	15.0	13.2	12.0	10.9
26	10.5	12.0	13.7	15.2	16.1	16.3	15.3	15.1	14.8	13.0	12.2	10.7
27	10.9	12.0	14.4	15.1	16.0	16.2	15.7	15.2	14.8	13.2	12.4	10.8
28	11.0	12.1	14.2	15.5	16.0	16.0	15.4	15.4	14.9	13.2	12.0	10.8
29	11.2		13.9	15.3	15.6	15.9	15.5	15.4	15.0	13.6	11.4	10.4
30	11.3		13.9	15.4	15.8	15.6	14.8	15.4	14.8	13.3	11.4	10.7



<b>31</b>	11.3		14.0		15.6		15.3	15.3		13.1		11.0
<b>Precipitación (mm)</b>												
<b>Día</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>1</b>	0.0	2.8	0.0	0.0	0.8	3.6	10.4	7.1	7.1	5.2	1.0	0.2
<b>2</b>	0.0	1.0	2.6	0.0	0.5	4.4	7.9	4.4	6.2	2.0	1.4	0.9
<b>3</b>	0.5	2.3	0.2	0.0	0.9	3.2	4.8	8.2	4.3	1.9	1.2	0.8
<b>4</b>	0.0	7.0	0.0	1.0	1.3	4.0	7.5	3.2	8.6	5.0	1.4	0.4
<b>5</b>	0.1	2.5	0.0	0.1	1.5	4.0	6.7	7.4	7.0	5.1	0.7	0.3
<b>6</b>	0.3	0.0	0.0	0.1	2.4	6.8	7.3	5.8	8.9	4.0	1.2	0.4
<b>7</b>	0.1	0.0	0.0	0.0	1.0	5.7	6.9	4.2	6.4	2.5	2.4	1.3
<b>8</b>	0.0	0.1	0.0	0.0	2.5	2.8	4.4	7.7	7.7	3.8	3.3	0.1
<b>9</b>	0.5	0.1	0.0	0.0	1.3	4.8	4.3	5.4	6.2	4.3	0.9	0.5
<b>10</b>	2.0	0.0	0.1	1.0	0.8	5.6	4.9	1.9	6.9	4.4	1.8	0.2
<b>11</b>	0.3	0.0	0.0	0.1	1.1	8.6	6.4	7.5	6.8	4.3	1.6	0.0
<b>12</b>	0.7	1.0	0.1	0.2	1.5	6.5	6.4	5.2	5.0	4.4	0.2	0.0
<b>13</b>	1.0	0.2	0.1	0.3	2.3	8.9	5.9	3.9	4.8	2.1	0.7	0.0
<b>14</b>	1.5	0.0	0.0	1.7	0.4	6.6	4.5	6.3	6.7	3.4	1.1	0.0
<b>15</b>	0.4	0.1	0.0	0.1	0.5	8.8	2.8	6.8	5.2	1.8	0.6	0.4
<b>16</b>	1.0	0.0	0.0	0.7	1.1	5.0	5.5	7.8	9.2	2.7	0.4	0.1
<b>17</b>	1.2	0.2	0.7	1.7	2.3	5.8	6.7	9.3	6.0	2.0	0.9	0.5
<b>18</b>	1.9	1.5	0.0	0.4	1.6	5.3	4.7	6.8	8.2	1.0	0.7	0.0
<b>19</b>	0.2	0.1	0.4	0.4	1.4	9.3	7.4	5.0	5.4	2.5	1.6	0.2
<b>20</b>	0.0	0.3	0.0	0.2	1.4	8.6	6.9	4.3	4.3	3.6	0.3	0.2
<b>21</b>	0.1	0.0	0.1	0.8	2.7	6.1	6.2	5.4	6.8	3.7	1.7	0.0
<b>22</b>	0.0	0.9	0.2	1.6	3.7	10.4	5.8	5.5	4.1	2.9	0.4	0.2
<b>23</b>	0.2	0.3	1.2	1.0	1.8	6.1	7.3	5.8	4.9	1.4	0.3	0.8
<b>24</b>	0.5	0.0	0.0	1.2	0.7	4.2	6.4	6.1	3.1	3.2	1.2	0.0
<b>25</b>	1.7	0.3	0.3	1.3	4.0	6.6	8.9	3.1	5.8	1.5	0.3	0.0
<b>26</b>	1.6	0.1	0.2	0.5	4.3	5.8	5.1	6.6	2.9	1.9	0.0	0.7
<b>27</b>	0.0	0.7	0.0	0.8	5.0	4.7	5.8	5.0	3.0	1.3	0.9	0.2
<b>28</b>	0.4	0.0	0.0	1.3	3.8	5.4	5.7	7.8	4.6	1.3	0.2	0.0
<b>29</b>	2.7		0.0	0.2	3.0	9.5	5.3	6.2	2.6	2.2	0.5	0.0
<b>30</b>	0.1		0.0	0.8	1.1	9.3	4.0	5.9	3.1	0.5	1.2	0.7
<b>31</b>	0.6		0.3		1.7		7.2	8.3		2.0		0.7

**Tabla 34. Estación climatológica 15368 El Fresno**

Temperatura (°C)												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	11.5	12.0	13.2	14.9	16.6	17.4	16.9	16.8	16.7	15.5	14.8	12.1
2	12.0	12.3	13.1	15.0	16.5	17.2	16.8	16.4	16.7	15.9	14.8	12.5
3	12.0	11.9	13.2	15.3	17.4	17.5	16.7	16.4	16.5	16.2	14.6	12.7
4	11.4	12.2	13.0	15.5	17.3	17.4	17.1	16.6	16.8	15.5	14.4	12.2
5	11.7	12.1	13.1	15.0	17.1	17.7	17.1	16.9	16.5	15.9	14.4	12.7
6	11.9	12.4	13.4	15.1	17.4	18.0	16.7	17.0	17.1	16.0	14.6	12.8
7	11.5	12.2	13.2	15.5	17.2	18.2	16.7	16.6	16.5	15.9	14.5	12.7
8	11.8	12.5	13.7	15.6	17.0	17.8	16.6	16.8	16.7	15.6	14.6	12.8
9	11.8	12.7	14.0	15.4	17.1	17.0	16.3	16.4	16.5	15.8	14.2	12.7
10	12.1	12.6	13.5	15.7	17.4	17.9	17.1	16.6	16.5	15.8	14.4	12.2
11	12.0	12.8	13.7	15.4	17.3	17.5	16.9	16.7	16.3	16.1	14.3	12.3
12	12.3	12.7	14.1	15.4	17.5	17.4	16.8	16.3	16.6	15.8	14.4	12.1
13	11.4	12.7	13.5	15.9	18.2	17.6	16.6	16.9	16.4	15.5	14.4	12.1
14	11.4	12.5	14.1	15.7	17.6	17.2	16.7	16.6	16.3	15.6	13.9	11.8
15	11.6	12.2	13.4	15.7	17.6	17.6	16.7	16.9	16.8	15.4	13.3	11.8
16	11.5	12.9	13.4	15.9	17.7	17.2	16.4	16.9	16.3	15.6	13.8	11.9
17	11.3	12.8	13.4	16.1	17.7	16.9	16.7	16.5	17.1	15.8	13.9	11.4
18	11.1	12.5	13.4	16.1	17.6	17.2	16.7	17.0	16.7	15.6	13.7	12.0
19	11.8	12.4	13.9	15.8	17.3	16.8	16.3	17.0	16.1	16.0	13.8	12.3
20	11.5	12.7	13.9	16.2	18.0	16.5	16.3	16.0	16.7	15.5	13.7	11.6
21	11.5	12.5	14.2	16.4	17.7	16.9	16.6	16.8	16.3	15.5	13.5	11.8
22	11.5	12.9	14.0	16.0	17.2	17.1	16.5	16.7	16.6	15.5	13.4	11.9
23	11.6	12.7	13.8	16.7	17.1	17.0	16.9	16.9	16.2	15.0	14.1	12.1
24	11.8	12.7	14.2	16.6	17.4	16.9	17.1	16.6	16.1	15.2	13.2	12.0
25	11.8	13.0	14.5	16.6	17.6	16.9	16.5	16.8	16.0	14.6	13.0	11.5
26	11.9	13.0	14.8	16.4	17.0	16.2	16.7	17.0	16.4	14.5	13.0	11.1
27	12.2	12.5	14.7	16.0	17.8	16.8	16.9	16.6	16.4	14.7	13.3	11.1
28	12.2	12.7	14.3	16.5	17.2	16.3	16.4	16.9	15.9	14.5	13.0	10.8
29	11.8		14.3	16.8	17.7	16.9	17.0	16.8	16.1	14.7	12.6	11.1
30	12.0		14.4	16.7	17.6	17.1	16.7	16.6	15.9	14.6	12.2	10.9
31	12.1		14.5		17.9		16.9	16.7		14.1		11.3
Precipitación (mm)												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.1	0.2	0.0	0.0	1.0	5.6	15.7	14.7	15.5	10.1	3.2	0.0

2	0.5	2.8	2.3	0.0	0.5	6.1	14.8	14.2	13.0	11.1	4.5	0.2
3	0.3	1.7	0.0	0.0	0.5	8.2	16.3	16.5	13.4	11.4	4.9	0.3
4	0.5	1.3	0.0	0.3	0.4	5.2	9.0	14.4	16.5	13.3	1.7	2.9
5	0.4	1.3	0.0	0.0	2.9	9.3	14.0	11.2	14.9	11.3	2.4	1.4
6	0.5	1.0	0.0	0.0	2.9	10.3	13.4	12.2	17.4	11.2	3.4	0.0
7	0.7	0.0	0.0	0.0	1.4	10.6	17.5	14.3	9.9	8.5	1.6	0.9
8	0.9	0.7	1.0	0.9	3.3	14.1	11.8	11.9	11.4	10.4	0.7	0.1
9	1.5	0.6	0.5	1.1	1.1	9.3	11.2	14.4	16.5	7.5	1.8	0.2
10	0.5	0.9	0.1	0.1	2.1	7.6	12.5	10.5	12.9	10.0	3.9	0.0
11	0.4	2.1	0.0	0.9	1.3	9.3	14.2	10.8	11.9	11.3	2.4	0.0
12	1.6	1.5	0.4	0.3	2.5	9.9	10.4	14.3	11.3	8.8	0.7	0.0
13	0.0	0.4	1.4	0.0	2.8	13.3	12.2	18.4	15.5	5.5	0.8	0.0
14	1.4	0.5	0.3	0.3	2.0	14.7	11.0	12.9	16.2	7.1	1.4	0.0
15	1.0	0.4	0.8	0.4	2.6	8.5	11.3	15.7	13.1	5.1	1.5	0.4
16	2.4	0.1	0.0	1.5	2.6	10.6	9.7	17.1	16.5	6.0	3.0	0.0
17	2.6	0.0	0.0	0.6	1.3	12.9	16.6	14.8	12.4	5.4	0.7	0.2
18	2.1	0.6	1.2	1.9	1.7	11.2	9.3	19.4	12.8	11.0	1.0	0.4
19	0.3	1.1	0.3	0.6	3.4	8.4	11.4	15.0	11.1	10.6	0.8	1.2
20	0.0	1.0	0.1	0.6	3.9	9.6	11.4	16.7	12.7	3.9	1.7	0.0
21	0.0	0.8	1.3	0.4	4.0	12.9	13.6	16.5	12.0	7.8	2.0	0.5
22	0.0	1.0	0.0	1.5	5.3	12.0	12.6	12.0	11.8	6.0	1.3	0.1
23	0.2	0.6	0.4	0.3	2.7	14.7	16.7	12.7	10.9	7.4	3.0	0.0
24	0.2	0.7	0.0	1.0	3.2	15.4	17.6	10.7	8.7	6.0	1.0	0.2
25	3.8	1.5	0.7	2.6	5.0	7.2	9.7	21.1	13.0	4.3	1.7	0.4
26	3.3	0.9	0.3	1.1	4.0	10.6	14.1	17.2	10.1	4.5	1.2	0.3
27	3.1	0.0	0.7	0.7	2.9	14.2	18.4	14.3	10.4	5.0	1.2	0.1
28	1.8	0.0	0.1	0.5	5.0	10.5	10.0	19.9	10.9	1.6	0.4	0.0
29	1.7		0.1	0.9	4.9	17.7	14.9	14.7	8.8	3.9	0.0	2.0
30	2.4		1.1	2.8	7.9	15.8	16.6	15.4	7.7	2.4	0.1	0.6
31	1.2		0.1		9.2		12.8	14.7		4.2		1.0

**Tabla 35. Estación climatológica 15241 San Pedro Tenayac**

Temperatura (°C)												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	11.5	12.0	13.2	14.9	16.6	17.4	16.9	16.8	16.7	15.5	14.8	12.1
2	12.0	12.3	13.1	15.0	16.5	17.2	16.8	16.4	16.7	15.9	14.8	12.5
3	12.0	11.9	13.2	15.3	17.4	17.5	16.7	16.4	16.5	16.2	14.6	12.7

<b>4</b>	11.4	12.2	13.0	15.5	17.3	17.4	17.1	16.6	16.8	15.5	14.4	12.2
<b>5</b>	11.7	12.1	13.1	15.0	17.1	17.7	17.1	16.9	16.5	15.9	14.4	12.7
<b>6</b>	11.9	12.4	13.4	15.1	17.4	18.0	16.7	17.0	17.1	16.0	14.6	12.8
<b>7</b>	11.5	12.2	13.2	15.5	17.2	18.2	16.7	16.6	16.5	15.9	14.5	12.7
<b>8</b>	11.8	12.5	13.7	15.6	17.0	17.8	16.6	16.8	16.7	15.6	14.6	12.8
<b>9</b>	11.8	12.7	14.0	15.4	17.1	17.0	16.3	16.4	16.5	15.8	14.2	12.7
<b>10</b>	12.1	12.6	13.5	15.7	17.4	17.9	17.1	16.6	16.5	15.8	14.4	12.2
<b>11</b>	12.0	12.8	13.7	15.4	17.3	17.5	16.9	16.7	16.3	16.1	14.3	12.3
<b>12</b>	12.3	12.7	14.1	15.4	17.5	17.4	16.8	16.3	16.6	15.8	14.4	12.1
<b>13</b>	11.4	12.7	13.5	15.9	18.2	17.6	16.6	16.9	16.4	15.5	14.4	12.1
<b>14</b>	11.4	12.5	14.1	15.7	17.6	17.2	16.7	16.6	16.3	15.6	13.9	11.8
<b>15</b>	11.6	12.2	13.4	15.7	17.6	17.6	16.7	16.9	16.8	15.4	13.3	11.8
<b>16</b>	11.5	12.9	13.4	15.9	17.7	17.2	16.4	16.9	16.3	15.6	13.8	11.9
<b>17</b>	11.3	12.8	13.4	16.1	17.7	16.9	16.7	16.5	17.1	15.8	13.9	11.4
<b>18</b>	11.1	12.5	13.4	16.1	17.6	17.2	16.7	17.0	16.7	15.6	13.7	12.0
<b>19</b>	11.8	12.4	13.9	15.8	17.3	16.8	16.3	17.0	16.1	16.0	13.8	12.3
<b>20</b>	11.5	12.7	13.9	16.2	18.0	16.5	16.3	16.0	16.7	15.5	13.7	11.6
<b>21</b>	11.5	12.5	14.2	16.4	17.7	16.9	16.6	16.8	16.3	15.5	13.5	11.8
<b>22</b>	11.5	12.9	14.0	16.0	17.2	17.1	16.5	16.7	16.6	15.5	13.4	11.9
<b>23</b>	11.6	12.7	13.8	16.7	17.1	17.0	16.9	16.9	16.2	15.0	14.1	12.1
<b>24</b>	11.8	12.7	14.2	16.6	17.4	16.9	17.1	16.6	16.1	15.2	13.2	12.0
<b>25</b>	11.8	13.0	14.5	16.6	17.6	16.9	16.5	16.8	16.0	14.6	13.0	11.5
<b>26</b>	11.9	13.0	14.8	16.4	17.0	16.2	16.7	17.0	16.4	14.5	13.0	11.1
<b>27</b>	12.2	12.5	14.7	16.0	17.8	16.8	16.9	16.6	16.4	14.7	13.3	11.1
<b>28</b>	12.2	12.7	14.3	16.5	17.2	16.3	16.4	16.9	15.9	14.5	13.0	10.8
<b>29</b>	11.8		14.3	16.8	17.7	16.9	17.0	16.8	16.1	14.7	12.6	11.1
<b>30</b>	12.0		14.4	16.7	17.6	17.1	16.7	16.6	15.9	14.6	12.2	10.9
<b>31</b>	12.1		14.5		17.9		16.9	16.7		14.1		11.3
<b>Precipitación (mm)</b>												
<b>Día</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>1</b>	0.1	0.2	0.0	0.0	1.0	5.6	15.7	14.7	15.5	10.1	3.2	0.0
<b>2</b>	0.5	2.8	2.3	0.0	0.5	6.1	14.8	14.2	13.0	11.1	4.5	0.2
<b>3</b>	0.3	1.7	0.0	0.0	0.5	8.2	16.3	16.5	13.4	11.4	4.9	0.3
<b>4</b>	0.5	1.3	0.0	0.3	0.4	5.2	9.0	14.4	16.5	13.3	1.7	2.9
<b>5</b>	0.4	1.3	0.0	0.0	2.9	9.3	14.0	11.2	14.9	11.3	2.4	1.4
<b>6</b>	0.5	1.0	0.0	0.0	2.9	10.3	13.4	12.2	17.4	11.2	3.4	0.0
<b>7</b>	0.7	0.0	0.0	0.0	1.4	10.6	17.5	14.3	9.9	8.5	1.6	0.9

8	0.9	0.7	1.0	0.9	3.3	14.1	11.8	11.9	11.4	10.4	0.7	0.1
9	1.5	0.6	0.5	1.1	1.1	9.3	11.2	14.4	16.5	7.5	1.8	0.2
10	0.5	0.9	0.1	0.1	2.1	7.6	12.5	10.5	12.9	10.0	3.9	0.0
11	0.4	2.1	0.0	0.9	1.3	9.3	14.2	10.8	11.9	11.3	2.4	0.0
12	1.6	1.5	0.4	0.3	2.5	9.9	10.4	14.3	11.3	8.8	0.7	0.0
13	0.0	0.4	1.4	0.0	2.8	13.3	12.2	18.4	15.5	5.5	0.8	0.0
14	1.4	0.5	0.3	0.3	2.0	14.7	11.0	12.9	16.2	7.1	1.4	0.0
15	1.0	0.4	0.8	0.4	2.6	8.5	11.3	15.7	13.1	5.1	1.5	0.4
16	2.4	0.1	0.0	1.5	2.6	10.6	9.7	17.1	16.5	6.0	3.0	0.0
17	2.6	0.0	0.0	0.6	1.3	12.9	16.6	14.8	12.4	5.4	0.7	0.2
18	2.1	0.6	1.2	1.9	1.7	11.2	9.3	19.4	12.8	11.0	1.0	0.4
19	0.3	1.1	0.3	0.6	3.4	8.4	11.4	15.0	11.1	10.6	0.8	1.2
20	0.0	1.0	0.1	0.6	3.9	9.6	11.4	16.7	12.7	3.9	1.7	0.0
21	0.0	0.8	1.3	0.4	4.0	12.9	13.6	16.5	12.0	7.8	2.0	0.5
22	0.0	1.0	0.0	1.5	5.3	12.0	12.6	12.0	11.8	6.0	1.3	0.1
23	0.2	0.6	0.4	0.3	2.7	14.7	16.7	12.7	10.9	7.4	3.0	0.0
24	0.2	0.7	0.0	1.0	3.2	15.4	17.6	10.7	8.7	6.0	1.0	0.2
25	3.8	1.5	0.7	2.6	5.0	7.2	9.7	21.1	13.0	4.3	1.7	0.4
26	3.3	0.9	0.3	1.1	4.0	10.6	14.1	17.2	10.1	4.5	1.2	0.3
27	3.1	0.0	0.7	0.7	2.9	14.2	18.4	14.3	10.4	5.0	1.2	0.1
28	1.8	0.0	0.1	0.5	5.0	10.5	10.0	19.9	10.9	1.6	0.4	0.0
29	1.7		0.1	0.9	4.9	17.7	14.9	14.7	8.8	3.9	0.0	2.0
30	2.4		1.1	2.8	7.9	15.8	16.6	15.4	7.7	2.4	0.1	0.6
31	1.2		0.1		9.2		12.8	14.7		4.2		1.0

**Tabla 36. Estación climatológica 15130 Presa Valle de Bravo (CFE)**

Temperatura (°C)												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	16.3	16.6	18.3	20.7	21.7	21.6	19.0	18.9	18.8	18.5	18.3	17.5
2	16.4	17.0	18.3	20.7	21.8	21.3	18.9	18.9	18.7	18.7	18.1	17.3
3	16.0	16.8	18.3	20.3	21.6	21.1	19.0	18.9	18.7	18.8	17.9	17.1
4	16.1	17.0	18.0	20.7	21.6	21.1	19.2	18.9	18.8	18.4	17.8	16.8
5	16.5	16.8	17.8	20.6	21.5	21.2	19.0	18.8	18.9	18.5	17.8	16.8
6	16.7	16.8	17.9	20.7	21.6	21.5	19.1	18.9	19.0	18.5	17.9	16.7
7	16.7	16.7	17.9	20.6	22.0	21.2	18.8	18.9	18.7	18.6	18.1	16.6
8	16.8	16.8	18.1	20.6	22.2	21.0	19.2	18.6	18.8	18.4	17.9	16.8
9	16.5	17.2	18.5	20.9	22.3	21.0	18.8	18.8	18.8	18.7	17.8	17.1

<b>10</b>	16.2	17.0	18.2	20.7	22.3	20.8	18.8	19.0	18.5	18.7	17.8	17.0
<b>11</b>	16.4	16.7	18.6	20.6	22.0	20.8	18.8	18.9	18.6	18.6	17.9	16.9
<b>12</b>	16.3	17.0	18.6	20.6	22.2	20.8	19.0	18.6	18.9	18.6	17.7	16.9
<b>13</b>	16.2	17.1	18.6	20.9	22.3	20.5	18.9	19.0	18.6	18.6	17.4	17.0
<b>14</b>	16.2	17.2	18.9	21.2	22.0	20.5	18.9	18.8	18.9	18.6	17.4	16.9
<b>15</b>	16.2	17.1	19.2	21.2	22.0	20.1	18.8	18.7	18.8	18.5	17.5	16.9
<b>16</b>	16.2	17.1	19.2	21.0	22.2	20.1	18.9	18.8	18.7	18.5	17.6	17.2
<b>17</b>	15.4	17.3	19.2	20.9	22.2	20.2	18.7	18.7	18.9	18.6	17.4	16.8
<b>18</b>	15.8	17.4	19.1	21.1	21.8	19.8	18.8	18.9	18.7	18.6	17.4	16.4
<b>19</b>	15.9	17.4	19.2	21.3	22.1	19.7	19.0	18.7	18.7	18.7	17.7	16.4
<b>20</b>	15.7	17.5	19.5	21.4	21.9	19.6	18.7	18.8	18.5	18.6	17.8	16.4
<b>21</b>	15.6	17.4	19.8	21.5	22.2	19.6	18.9	18.9	18.9	18.6	17.5	16.6
<b>22</b>	15.5	17.5	19.7	21.6	22.2	19.7	19.1	18.8	18.8	18.6	17.9	16.6
<b>23</b>	15.8	17.4	19.8	21.6	21.9	19.5	18.9	18.9	18.6	18.8	17.5	16.4
<b>24</b>	15.9	17.3	19.7	21.6	22.1	19.7	18.8	18.7	18.7	18.5	17.4	16.1
<b>25</b>	16.1	17.5	19.8	21.3	21.5	19.7	18.8	18.8	18.7	18.3	17.3	16.0
<b>26</b>	16.5	17.7	19.7	21.2	21.6	19.2	19.1	18.8	18.4	18.5	17.3	16.2
<b>27</b>	16.5	17.7	19.5	21.4	21.8	19.3	18.7	19.1	18.7	18.2	17.3	16.0
<b>28</b>	16.6	18.4	19.8	21.5	21.4	19.8	18.9	19.1	18.4	18.3	17.2	16.3
<b>29</b>	16.8		20.2	21.7	21.5	19.6	18.8	19.0	18.4	18.4	17.3	16.4
<b>30</b>	17.1		20.2	21.7	21.4	19.4	18.6	18.9	18.4	18.1	17.1	16.4
<b>31</b>	17.1		20.5		21.6		18.9	18.9		17.9		16.4

**Precipitación (mm)**

<b>Día</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>1</b>	0.1	0.5	0.0	0.5	0.0	3.5	11.0	7.6	5.3	2.1	1.9	0.0
<b>2</b>	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	2.1	7.1	2.8	5.4	2.7	1.1	1.0
<b>3</b>	0.1	0.0	0.3	0.0	0.8	1.7	6.2	4.5	5.7	3.1	1.3	0.9
<b>4</b>	0.0	0.4	2.1	0.0	0.2	4.8	8.1	6.3	9.2	9.3	0.6	2.7
<b>5</b>	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	3.1	9.1	3.6	7.1	4.8	0.5	0.5
<b>6</b>	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	3.1	6.5	4.5	3.1	3.1	0.2	0.0
<b>7</b>	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	4.3	6.1	3.8	5.5	1.8	0.0	0.8
<b>8</b>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	7.9	5.7	4.4	2.7	1.6	0.6
<b>9</b>	0.2	0.6	0.0	0.0	0.1	5.8	2.8	11.1	6.7	5.1	0.1	1.3
<b>10</b>	0.1	0.0	0.0	0.9	2.2	2.7	6.4	6.7	8.2	4.4	1.3	0.5
<b>11</b>	0.1	0.5	0.0	0.0	1.3	3.6	7.8	6.0	7.3	1.3	1.7	0.0
<b>12</b>	0.0	0.4	0.2	0.0	1.7	8.6	6.9	8.1	4.6	7.0	1.1	0.0
<b>13</b>	0.1	0.1	0.6	0.1	1.2	4.4	7.6	7.7	6.2	3.7	0.0	0.2

<b>14</b>	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2	5.2	5.5	6.3	4.4	3.4	0.0	0.0
<b>15</b>	0.5	0.0	0.0	0.4	0.6	5.4	5.2	7.2	5.2	0.8	0.0	0.1
<b>16</b>	0.4	0.0	0.3	0.5	0.5	6.9	5.3	8.7	5.3	0.7	0.2	0.1
<b>17</b>	1.2	0.0	0.3	0.4	1.3	6.3	6.1	4.6	3.2	0.9	0.6	0.7
<b>18</b>	1.9	0.0	0.1	1.0	3.6	8.1	5.8	5.2	6.6	1.4	0.1	0.0
<b>19</b>	0.3	0.1	0.0	0.1	0.8	6.5	4.1	5.4	3.3	2.0	0.4	0.0
<b>20</b>	1.9	0.0	0.8	0.7	0.5	8.4	4.9	6.6	4.4	0.8	0.7	0.1
<b>21</b>	3.3	0.0	0.0	0.8	2.8	7.5	3.0	5.1	3.7	4.0	0.1	1.1
<b>22</b>	0.6	0.8	0.2	0.2	1.1	6.1	4.8	2.4	5.9	1.0	0.1	0.0
<b>23</b>	2.0	0.4	0.0	0.3	1.4	8.4	7.4	5.4	7.0	1.6	0.2	0.0
<b>24</b>	3.6	0.4	0.0	0.1	3.1	4.7	7.2	4.3	4.7	1.2	0.7	0.0
<b>25</b>	2.6	0.4	0.0	0.1	4.5	8.6	6.7	6.3	2.8	1.6	0.0	0.0
<b>26</b>	0.1	1.0	0.0	0.2	3.2	7.1	7.4	2.6	4.6	1.5	0.8	0.1
<b>27</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	5.7	3.4	7.0	2.8	1.0	1.5	0.0
<b>28</b>	0.0	0.0	0.0	0.1	3.2	2.6	4.7	4.7	5.3	3.1	0.2	0.0
<b>29</b>	0.0		0.1	0.0	3.5	8.4	3.9	4.8	3.8	1.2	0.0	0.0
<b>30</b>	0.0		0.0	0.0	3.1	8.9	4.0	5.6	4.7	1.1	1.1	0.0
<b>31</b>	0.0		0.1		2.1		5.8	5.3		3.1		0.4

**Anexo B. Promedio diario del gasto de los ríos de cinco estaciones hidrométricas localizadas en la cuenca de la presa Valle de Bravo.**

**Tabla 37. Estación hidrométrica 18489 El Salto (Amanalco)**

Gasto ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	5.6	5.8	4.5	3.3	3.5	5.0	6.7	7.1	10.7	9.8	8.8	7.3
2	6.4	5.7	4.3	3.4	3.5	5.0	7.5	7.1	10.6	10.0	8.1	7.5
3	6.1	5.5	4.1	3.6	3.6	5.5	7.7	7.2	10.9	9.9	8.6	7.3
4	5.8	5.0	4.2	3.6	3.6	5.3	7.9	7.2	11.5	9.7	8.0	6.9
5	6.1	4.8	4.0	3.7	3.2	5.9	8.1	7.1	11.6	10.2	7.8	7.4
6	5.8	5.2	4.0	3.5	3.5	5.5	7.9	7.2	10.8	9.9	8.2	7.5
7	5.7	4.7	4.0	3.6	3.6	5.5	8.2	6.9	10.2	10.1	9.0	7.4
8	6.1	4.9	4.2	3.6	3.6	5.5	8.3	6.8	9.9	9.4	8.1	6.6
9	6.1	4.9	4.2	3.7	3.7	5.4	7.8	7.0	9.5	9.2	7.9	6.5
10	5.8	4.6	4.1	3.7	3.9	5.5	7.7	6.5	8.8	8.6	7.9	6.3
11	5.7	4.5	4.2	3.8	4.2	4.9	7.5	6.7	9.9	9.0	7.8	6.2
12	5.7	4.2	4.2	3.5	4.5	5.2	7.0	6.7	11.1	9.3	7.3	6.4
13	5.4	4.4	4.0	3.6	4.7	5.0	10.8	6.7	12.2	9.7	7.2	6.4
14	5.4	4.4	3.8	3.6	4.6	5.1	11.8	6.6	15.9	9.4	7.6	6.7
15	4.9	4.5	3.6	3.4	4.6	5.0	10.6	6.6	19.7	9.3	7.6	6.4
16	5.8	4.5	3.5	3.6	4.6	5.0	8.9	6.6	15.2	9.1	7.5	6.5
17	5.5	4.6	3.7	3.6	4.5	4.8	8.0	7.4	12.8	9.4	7.8	6.4
18	5.7	4.6	3.8	3.9	4.6	4.9	7.8	7.3	12.2	9.1	7.3	6.6
19	5.6	4.6	3.8	3.9	4.6	5.1	7.7	9.0	11.6	9.4	7.1	6.5
20	5.3	4.7	3.9	3.9	4.6	5.1	7.3	10.7	10.8	9.7	6.2	6.6
21	5.0	4.9	3.7	4.3	4.6	5.4	7.4	6.5	10.2	8.8	7.2	6.6
22	5.2	5.0	3.7	4.2	4.3	5.2	7.4	7.0	11.1	8.7	7.4	6.5
23	5.3	4.6	3.7	4.1	4.7	5.1	7.4	6.6	13.2	8.2	7.3	6.4
24	5.5	4.4	3.6	4.1	4.8	5.4	7.2	6.6	12.5	8.6	7.5	5.9
25	5.5	4.3	3.7	4.3	5.0	5.5	7.4	6.8	11.7	9.0	7.3	5.4
26	5.5	4.1	3.5	4.4	4.9	9.5	7.3	6.7	11.4	8.9	7.3	6.0
27	5.2	4.4	3.6	4.1	5.2	11.9	7.0	6.5	10.6	8.8	7.2	5.9
28	5.1	4.7	3.6	3.8	4.9	8.3	7.1	6.7	10.8	8.4	7.4	6.4
29	5.3		3.7	3.8	4.9	7.1	6.8	6.6	11.0	8.4	7.2	6.4
30	5.6		3.5	3.9	5.0	6.6	6.5	6.6	10.6	8.7	7.1	6.3
31	6.0		3.4		5.0		7.0	6.4		8.7		6.1



**Tabla 38. Estación hidrométrica 18169 El Molino**

Gasto (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	2.3	1.9	1.7	1.5	1.3	1.6	2.3	3.2	4.0	4.4	3.7	2.9
2	2.2	1.9	1.7	1.5	1.3	1.6	2.3	3.0	4.3	4.5	3.7	2.9
3	2.3	1.9	1.7	1.5	1.3	1.7	2.4	3.1	4.2	4.5	3.6	2.8
4	2.3	1.9	1.7	1.4	1.4	1.6	2.5	3.4	4.2	4.5	3.6	2.8
5	2.2	1.9	1.7	1.4	1.4	1.6	2.5	3.7	4.0	4.6	3.6	2.8
6	2.2	1.9	1.7	1.4	1.4	1.7	2.5	3.5	4.8	4.9	3.6	2.8
7	2.2	1.9	1.7	1.4	1.4	1.6	2.5	3.5	4.4	4.6	3.6	2.8
8	2.2	1.8	1.7	1.4	1.4	1.7	2.6	3.3	4.6	4.6	3.6	2.8
9	2.2	1.8	1.7	1.4	1.4	1.8	2.6	3.4	4.7	4.4	3.5	2.8
10	2.2	1.8	1.7	1.4	1.4	1.7	2.8	3.6	4.2	4.2	3.5	2.7
11	2.2	1.8	1.7	1.4	1.4	1.7	2.9	3.7	4.3	4.1	3.4	2.7
12	2.2	1.8	1.7	1.4	1.4	1.7	2.7	3.9	4.7	4.4	3.4	2.8
13	2.1	1.8	1.7	1.4	1.4	1.9	2.8	3.5	4.6	4.4	3.4	2.7
14	2.1	1.8	1.7	1.4	1.4	2.0	3.0	3.3	4.8	4.3	3.4	2.7
15	2.1	1.8	1.7	1.4	1.4	1.8	2.8	3.7	4.9	4.2	3.4	2.7
16	2.1	1.8	1.7	1.4	1.4	1.8	3.2	3.8	5.0	4.3	3.3	2.7
17	2.1	1.8	1.7	1.4	1.4	1.9	3.0	4.0	4.8	4.4	3.2	2.6
18	2.2	1.8	1.7	1.4	1.4	1.9	3.2	3.4	4.8	4.3	3.2	2.6
19	2.2	1.8	1.6	1.4	1.4	1.9	3.3	3.5	5.2	4.4	3.2	2.6
20	2.1	1.7	1.6	1.4	1.4	1.9	3.0	4.0	4.9	4.5	3.2	2.6
21	2.1	1.8	1.6	1.4	1.5	1.9	2.8	3.6	4.7	4.2	3.2	2.5
22	2.0	1.7	1.5	1.4	1.5	2.2	2.9	3.5	4.8	4.1	3.1	2.5
23	2.1	1.7	1.5	1.4	1.5	2.2	3.2	3.5	4.8	4.4	3.1	2.4
24	2.0	1.8	1.5	1.4	1.7	2.2	3.3	3.6	4.7	4.0	3.1	2.4
25	2.0	1.8	1.5	1.4	1.5	2.2	3.3	4.1	4.7	3.9	3.1	2.4
26	2.0	1.7	1.5	1.4	1.6	2.2	3.2	3.8	4.7	3.9	3.0	2.4
27	2.0	1.7	1.5	1.4	1.6	2.4	3.1	3.9	4.5	3.8	3.0	2.4
28	2.0	1.7	1.5	1.4	1.6	2.3	3.0	4.3	4.5	3.8	3.0	2.4
29	2.0		1.5	1.4	1.5	2.3	3.1	4.4	4.3	3.8	3.0	2.3
30	1.9		1.5	1.4	1.5	2.5	2.9	4.3	4.7	3.8	2.9	2.3
31	1.9		1.5		1.6		3.1	4.3		3.8		2.2

**Tabla 39. Estación hidrométrica 18226 San Diego**

Gasto ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.5	1.0	2.4	1.9	1.1	0.4
2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.6	1.1	2.1	2.2	1.4	0.4
3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5	1.4	1.8	2.8	2.0	0.4
4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.8	1.1	1.8	2.5	2.2	0.4
5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.6	1.2	2.4	2.3	2.0	0.4
6	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.5	2.1	1.6	2.2	2.0	0.4
7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.8	1.5	2.1	2.3	1.4	0.4
8	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.7	1.2	1.8	2.2	1.2	0.4
9	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.6	1.6	2.7	2.3	1.1	0.4
10	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	1.7	2.2	1.8	1.0	0.4
11	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.8	1.4	1.8	1.5	0.9	0.4
12	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.9	1.5	1.7	1.6	0.9	0.3
13	0.5	0.2	0.2	0.1	0.2	1.2	1.0	1.7	1.8	1.5	0.8	0.4
14	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.6	0.9	1.4	2.0	1.4	0.7	0.4
15	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	1.6	1.3	0.7	0.4
16	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.8	1.0	1.5	1.3	0.7	0.5
17	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	1.3	1.8	1.5	0.6	0.4
18	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	1.1	1.5	2.0	1.4	0.7	0.4
19	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	1.2	2.1	2.2	1.5	0.6	0.3
20	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	1.1	1.2	2.3	1.4	0.6	0.3
21	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.9	1.4	2.4	1.3	0.6	0.3
22	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.7	1.2	2.5	1.1	0.5	0.3
23	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.9	1.1	2.4	1.0	0.5	0.3
24	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.8	1.2	3.4	1.0	0.5	0.3
25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.9	1.5	2.6	1.0	0.5	0.3
26	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.5	0.9	1.8	1.9	1.0	0.5	0.3
27	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	1.1	2.3	2.1	2.5	0.4	0.3
28	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.5	0.9	2.3	2.4	3.0	0.4	0.3
29	0.2		0.1	0.2	0.2	0.6	1.1	1.9	2.3	1.8	0.4	0.3
30	0.2		0.1	0.1	0.2	0.5	1.1	1.5	1.9	1.5	0.5	0.3
31	0.2		0.1		0.2		1.2	1.8		1.3		0.3

**Tabla 40. Estación hidrométrica 18275 Santa Mónica (Yerbabuena)**

Gasto (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.4	0.3
7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
9	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
10	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
11	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
12	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
13	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
14	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
15	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
16	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
17	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
18	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
19	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
20	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
21	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2
22	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2
23	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2
24	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2
25	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2
26	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2
27	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2
28	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2
29	0.1		0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.4	0.3	0.2
30	0.1		0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2
31	0.1		0.1		0.0		0.2	0.3		0.4		0.2

**Tabla 41. Estación hidrométrica 18279 Carrizal**

Gasto (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.7	0.3
2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.7	0.3
3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.9	1.0	0.8	0.3
4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	0.7	0.3
5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	0.9	1.0	0.7	0.3
6	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.5	0.9	1.0	0.6	0.3
7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.4	0.5	0.9	0.9	0.6	0.3
8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	0.9	0.6	0.3
9	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.0	0.6	0.3
10	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	0.9	0.6	0.3
11	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.4	0.6	0.9	0.9	0.5	0.3
12	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.4	0.6	0.9	0.9	0.5	0.3
13	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	0.9	0.5	0.3
14	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	0.9	0.5	0.3
15	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	0.9	0.5	0.3
16	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	0.8	0.5	0.3
17	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	0.8	0.5	0.3
18	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	0.8	0.4	0.3
19	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0	0.8	0.4	0.2
20	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.5	0.6	1.1	0.8	0.4	0.2
21	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	1.1	0.8	0.4	0.2
22	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.7	1.1	0.8	0.4	0.2
23	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.7	1.1	0.8	0.4	0.2
24	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.7	1.1	0.8	0.4	0.2
25	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	0.8	0.4	0.2
26	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.8	0.4	0.2
27	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.9	0.4	0.2
28	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.8	0.4	0.2
29	0.2		0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.8	0.4	0.2
30	0.2		0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	0.8	0.4	0.2
31	0.1		0.1		0.1		0.5	0.8		0.8		0.2