



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CARGA EXTERNA
DE FÓSFORO Y NITRÓGENO EN LA
PRESA VALLE DE BRAVO Y
PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(AMBIENTAL)

PRESENTA:

VILLANUEVA BELTRÁN JOSÉ TRINIDAD

TUTOR

DRA. HANSEN HANSEN ANNE M.

2011



JURADO ASIGNADO

Presidente: DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA
Secretario: DR. JORGE L. DE VICTORICA ALMEIDA
Vocal: DRA. ANNE M. HANSEN HANSEN
1er Suplemente: DR. CESAR VÁLDEZ ENRIQUE
2do Suplente: DR. OSCAR FUENTES MARILES

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA-CM

TUTOR DE TESIS:

DRA. ANNE M. HANSEN HANSEN

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a la Facultad de Ingeniería, al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt).

Al personal de la Gerencia Técnica del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), en especial al Ing. Juan Manuel Martínez Jiménez.

A mis sinodales, Dr. Pedro Martínez Pereda, Dr. Jorge L. de Victorica Almeida, Dra. Anne Hansen, Dr. Enrique César Váldez y Dr. Oscar Fuentes Mariles, cuyos comentarios y sugerencias sirvieron para enriquecer éste trabajo.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problemática.....	1
1.2 Justificación	2
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Objetivo general	3
1.5 Objetivos específicos.....	3
2. MARCO TEORICO.....	4
2.1. Eutroficación.....	4
2.1.1. Ciclo biogeoquímico del fósforo.....	7
2.1.2. Ciclo biogeoquímico del nitrógeno	11
2.2. Cargas externas e internas de nutrientes en cuerpos de agua	17
2.3. Fuentes externas de nutrientes.....	18
2.3.1. Fuentes puntuales de contaminación	19
2.3.2. Fuentes difusas de contaminación.....	20
2.4. Métodos de evaluación de las cargas externas	20
2.4.1. Evaluación directa de carga externa de contaminantes por monitoreo	20
2.4.2. Estimación indirecta de carga externa de contaminantes por modelación ..	21
2.5. Métodos para disminuir la carga externa de contaminantes	25
2.6. Antecedentes de la zona de estudio	28
2.6.1. Descripción del área de estudio.....	28
2.6.2. Estudios de calidad de agua en la presa Valle de Bravo	33
3. METODOLOGÍA	37
3.1. Delimitación de la zona de estudio	37
3.2. Inventario de fuentes puntuales de nutrientes.....	38
3.2.1. Fuentes puntuales de nutrientes.....	38
3.2.2. Concentraciones de contaminantes.....	41
3.2.3. Volumen de descarga.....	41
3.3. Inventario de fuentes difusas de nutrientes.....	43
3.3.1. Fuentes difusas de nutrientes.....	43

3.3.2.	Concentraciones de contaminantes.....	45
3.3.3.	Volúmenes de descarga.....	47
3.3.4.	Determinación del coeficiente de escurrimiento.....	54
4.	RESULTADOS.....	59
4.1.	Aportes de nutrientes por fuentes puntuales.....	59
4.2.	Aportes de nutrientes por fuentes difusas.....	60
4.3.	Comparación con otros reportes de carga externa.....	70
4.4.	Comparación con estimaciones de carga interna.....	71
4.5.	Escenarios de control de la carga externa y reducción de nutrientes.....	73
4.5.1.	Reforestación de pastizales/Deforestación de bosques.....	73
4.5.2.	Aumento/Reducción de las actividades porcícolas y trutícolas.....	74
4.5.3.	Separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo.....	76
4.5.4.	Ampliación de coberturas de agua y alcantarillado e incremento de eficiencia de tratamiento.....	77
4.5.5.	Tratamiento descentralizado de agua residual en pequeñas localidades....	78
4.5.6.	Floculación/Sedimentación de sólidos suspendidos en río Amanalco.....	79
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
6.	REFERENCIAS.....	84
7.	ANEXOS.....	90
Anexo I.	Modelos hidrológicos y de simulación de carga externa de contaminantes.....	90
Anexo II.	Población 2010 por localidad y subcuenca en la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	96
Anexo III.	Muestreo en la planta de tratamiento de aguas residuales en operación de la cabecera municipal de Valle de Bravo y sobre río Amanalco.....	98
Anexo IV.	Precipitación en la cuenca de la Presa Valle de Bravo de 14 estaciones climatológicas e Isoyetas por mes.....	103
Anexo V.	Proyección de la carga externa en la presa Valle de Bravo año 2020.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formas de fosfatos inorgánicos (modificado de Tsai y Rosetto, 1992)	8
Tabla 2. Formas del N en el medio ambiente (modificado de Rosswall, 1979).	12
Tabla 3. Pendiente media de la cuenca de la presa Valle de Bravo	31
Tabla 4. Pendiente media en las subcuencas de la cuenca de la presa Valle de Bravo	32
Tabla 5. Estudios de calidad del agua realizados en Valle de Bravo.	35
Tabla 6. Áreas de aportación en la cuenca de la presa Valle de Bravo	38
Tabla 7. Inventario de localidades en la cuenca de la presa Valle de Bravo	40
Tabla 8. PTAR's en operación en la cuenca de la presa VB.....	40
Tabla 9. Composición de influentes y efluentes de las PTAR's en operación	41
Tabla 10. Volumen de descarga de agua residual sin tratamiento y de PTAR Amanalco ..	42
Tabla 11. Producción porcina en la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	43
Tabla 12. Uso de suelo por subcuenca en la cuenca de la presa Valle de Bravo (m ²).....	45
Tabla 13. Concentración de contaminantes por ganado porcino	46
Tabla 14. Concentración de contaminantes por trucha arcoiris	46
Tabla 15. Concentración de contaminantes por uso de suelo (mg/L)	47
Tabla 16. Estaciones climatológicas en el área de estudio	48
Tabla 17. Número de escurrimiento para diferentes tipos de suelos y uso de suelo.....	55
Tabla 18. Correcciones del número de escurrimiento (<i>N</i>)	56
Tabla 19. Estimación del numero <i>N</i> ponderado por grupo de suelo.....	56
Tabla 20. Ponderado de <i>N</i> por extensión de uso de suelo y por subcuenca.....	57
Tabla 21. Coeficiente de escurrimiento (<i>C_e</i>) por subcuenca y por mes	57
Tabla 22. Volumen de escurrimiento por subcuenca y uso de suelo	58
Tabla 23. Aporte de contaminantes por fuentes puntuales (t/mes)	62
Tabla 24. Aporte de contaminantes por descargas del sector pecuario (fuentes difusas) ..	63
Tabla 25. Aporte de contaminantes por descargas del sector trutícola (fuentes difusas) ...	64
Tabla 26. Aporte de contaminantes por escurrimientos de suelos con diferentes usos	65
Tabla 27. Aporte de contaminantes por fuentes difusas (t/mes)	66
Tabla 28. Aporte de contaminantes por fuentes externas	69
Tabla 29. Comparación de metodologías de la carga externa en Valle de Bravo	71
Tabla 30. Evaluación de la carga externa e interna en la presa Valle de Bravo.....	72
Tabla 31. Escenario reforestación de pastizales y deforestación de bosques	74
Tabla 32. Escenario aumento y reducción de las actividades trutícolas	75

Tabla 33. Escenario de aumento y reducción de actividades porcícolas	75
Tabla 34. Concentraciones de contaminantes en agua residual diluida con agua de escurrimiento urbano.....	76
Tabla 35. Escenario separación de agua residual y pluvial en Valle de Bravo.....	76
Tabla 36. Coberturas de servicios de Amanalco y Valle de Bravo	77
Tabla 37. Escenario ampliación de la red de alcantarillado e incremento en la eficiencia de tratamiento	78
Tabla 38. Escenario tratamiento descentralizado de agua residual en pequeñas localidades	78
Tabla 39. Escenario floculación/sedimentación sobre río Amanalco.....	80
Tabla 40. Estimación de escenarios de control de la carga externa de contaminantes.....	81
Tabla 41. Población 2010 en la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	96
Tabla 42. Resultados del muestreo del agua residual de la PTAR-Valle de Bravo	101
Tabla 43. Concentraciones promedio agua residual de PTAR-Valle de Bravo	101
Tabla 44. Concentraciones de P-PO ₄ y P _T en río Amanalco y en descargas directas.....	102
Tabla 45. Estación climatológica 15005 Amanalco de Becerra A.	103
Tabla 46. Estación climatológica 15046 Presa Colorines, (CFE)	103
Tabla 47. Estación climatológica 15079 Puente Andaro	104
Tabla 48. Estación climatológica 15088 San Francisco Oxtotilpan	104
Tabla 49. Estación climatológica 15108 Santa María del Monte	105
Tabla 50. Estación climatológica 15130 Presa Valle de Bravo	106
Tabla 51. Estación climatológica 15131 Villa de Allende	106
Tabla 52. Estación climatológica 15160 Santiago del Monte	107
Tabla 53. Estación climatológica 15165 Valle de Bravo.....	107
Tabla 54. Estación climatológica 15174 Palos Mancornados	108
Tabla 55. Estación climatológica 15201 Trojes.....	108
Tabla 56. Estación climatológica 15241 San Pedro Tenayac	109
Tabla 57. Estación climatológica 15244 Muyteje	109
Tabla 58. Estación climatológica 15276 San José del Contadero.....	110
Tabla 59. Aporte de contaminantes 2020 por fuentes puntuales a la presa Valle de Bravo	118
Tabla 60. Aporte de contaminantes 2020 por fuentes difusas a la presa Valle de Bravo ..	118
Tabla 61. Evaluación de cargas de contaminantes para los años 2010 y 2020	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo externo de nutrientes en una cuenca hidrológica (Bosco et al., 2004)	7
Figura 2. Ciclo simplificado del fósforo en la naturaleza (modificado de Holford, 1997)	9
Figura 3. Distribución de nitrógeno (N) en la Tierra, expresada en millones de t.....	12
Figura 4. Ciclo simplificado del N en la naturaleza (modificado de Postgate, 1982).	14
Figura 5. Procesos en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Rodríguez <i>et al.</i> , 1984).....	16
Figura 6. Ubicación de la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	30
Figura 7. Subcuencas y municipios que abarca la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	38
Figura 8. Ubicación de localidades en la cuenca de la presa VB.....	39
Figura 9. Ubicación de granjas trutícolas en la cuenca de la presa VB	44
Figura 10. Uso de suelo en la cuenca de la presa Valle de Bravo.....	45
Figura 11. Ubicación de estaciones climatológicas en el área de estudio	48
Figura 12. Pantalla para la asignación del sistema de coordenadas geográficas	50
Figura 13. Pantalla de carga de puntos de estaciones climatológicas.....	50
Figura 14. Pantalla de exportación como shape.....	51
Figura 15. Pantalla de carga de la extensión Spatial Analyst	52
Figura 16. Pantalla de selección de método de interpolación.....	52
Figura 17. Pantalla con información para interpolación de datos de precipitación.....	53
Figura 18. Aporte de contaminantes por fuentes puntuales a la presa Valle de Bravo	59
Figura 19. Aporte de contaminantes por fuentes difusas a la presa Valle de Bravo	61
Figura 20. Aporte de nutrientes por fuentes puntuales (FP) y difusas (FD)	67
Figura 21. Proceso de tratamiento y ubicación de sitios de muestreo	98
Figura 22. Toma de muestras en pretratamiento y sedimentador secundario	99
Figura 23. Espectrofotómetro Merck y termorreactor (para la digestión de las muestras).....	100
Figura 24. Isoyetas del mes de enero	111
Figura 25. Isoyetas del mes de febrero	111
Figura 26. Isoyetas del mes de marzo	112
Figura 27. Isoyetas del mes de abril.....	112
Figura 28. Isoyetas del mes de mayo.....	113
Figura 29. Isoyetas del mes de junio.....	113
Figura 30. Isoyetas del mes de julio	114
Figura 31. Isoyetas del mes de agosto.....	114
Figura 32. Isoyetas del mes de septiembre.....	115

Figura 33. Isoyetas del mes de octubre.....	115
Figura 34. Isoyetas del mes de noviembre.....	116
Figura 35. Isoyetas del mes de diciembre	116

RESUMEN

La presa Valle de Bravo actualmente es un cuerpo de agua destinado como fuente de abastecimiento de agua para consumo de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Sin embargo, debido a elevadas concentraciones de nutrientes ocasionadas tanto por descargas de aguas residuales (crudas y tratadas) como de escurrimientos de suelos con diferentes usos, el embalse se clasifica como un cuerpo de agua eutrófico. El objetivo de esta tesis fue evaluar la carga externa de fósforo y nitrógeno en la cuenca de la presa Valle de Bravo y proponer soluciones para su reducción.

Se estimaron las cargas externas mensuales de fósforo total (P_T), nitrógeno total (N_T), materia orgánica degradable, expresada como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos totales (SST) de las siete subcuencas que drenan hacia el embalse, con base en los inventarios de fuentes puntuales y fuentes difusas de contaminación y utilizando concentraciones de contaminantes de acuerdo al origen de la descarga.

Los resultados indican que en la cuenca de la presa Valle de Bravo se descargan 65.54 t/año de P_T , 245.31 t/año de N_T , 1 607.51 t/año de DBO y 14 116.68 t/año de SST. Las fuentes puntuales contribuyen con sólo 32% de P_T , 34% de N_T , 24% de DBO y 3% de SST, y las difusas, con el 68% de P_T , 66% de N_T , 76% de DBO y 97% de SST. La descarga de escurrimientos de suelos con diferentes usos, representa la mayor contribución (49%) de contaminación difusa hacia el embalse. Asimismo, las subcuencas con mayor carga externa de contaminantes fueron: río Amanalco (49%), río Molino (25%) y subcuenca Las Laderas (16%).

Para analizar la reducción del aporte de contaminantes hacia el embalse se propusieron seis escenarios de control de la carga externa, los cuales consideran medidas concretas para reducción de contaminantes por fuentes puntuales y difusas; entre ellas destacan la ampliación de coberturas de agua para consumo

humano y alcantarillado sanitario y eficiencias de tratamiento (50% de remoción de N_T y P_T), tratamiento descentralizado de pequeñas localidades, control de actividades pecuarias y reforestación de área de pastizales. Conjuntamente con los seis escenarios de control, se estima una reducción de 26.21 t/año (40%) para P_T , 65.24 t/año (27%) de N_T , 560.88 t/año (35%) de DBO y 4 959.70 t/año (37%) de SST.

ABSTRACT

The Valle de Bravo dam is a fresh water body that is currently used as drinking water supply for the Mexico City Metropolitan Area. However, due to the high concentration of nutrients coming from wastewater discharges (raw and treated) and runoff from land with various uses, the dam is classified as an eutrophic water body. The aim of the present thesis is the evaluation of the external loads of phosphorus and nitrogen in the Valle de Bravo watershed and to propose solutions for their reduction.

Based on the inventories of point and diffuse sources of pollution and using contaminants concentrations according to the origin of discharge, the total external loads of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), degradable organic matter, expressed as biochemical oxygen demand (BOD), and total suspended solids (TSS) were estimated for the seven sub-basins that drain into the reservoir.

The results indicate that the external loads in the basin of the Valle de Bravo dam are approximately 65.54 t/y of TP, 245.31 t/y of TN, 1 607.51 t/y of BOD and 14 116.68 t/y of TSS. The point sources contribute with 32% of TP, 34% of TN, 24% of BOD and 3% of TSS, while the diffuse sources contribute with remaining loads, corresponding to 68% of TP, 66% of TN, 76% of BOD; and 97% of TSS. Runoff due to different land uses represent the largest contribution (49%) of the diffuse pollution in the watershed. Likewise, the sub-basins with highest external loads were río Amanalco (49%), río Molino (25%) and Las Laderas (16%).

Six scenarios for control of external loads to reduce pollutants inputs to the reservoir, and particular measures for reduction of point and diffuse sources were proposed; these include expansion of drinking water supply and sewage system and wastewater treatment that removes 50% TN and TP, decentralized wastewater treatment in small communities, livestock control and reforestation in grassland areas. Implementing the six scenarios a reduction of 26.10 t/y (34%) for TP, 65.24 t/y (27%) for TN, 349.72t/y (22%) for BOD and 586.29 t/y (6%) for TSS were estimated.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

En México el acelerado proceso de industrialización ocurrido en las últimas cinco décadas, ha incrementado los problemas de contaminación en los sistemas acuáticos debido a la emisión y descarga de sustancias o elementos tóxicos (Arredondo *et al.*, 2007); situación que junto con el desarrollo constante de la agricultura y demás actividades humanas así como debido al crecimiento demográfico, han provocado que cuerpos de agua a lo largo de todo el territorio nacional presenten diferentes niveles de deterioro de su calidad por introducción de contaminantes (Conagua, 2001).

La eutroficación es uno de los efectos provocados por la contaminación de cuerpos de agua. Esta problemática se manifiesta en un enriquecimiento progresivo del contenido de nutrientes, y junto con ello, en una intensa proliferación y acumulación excesiva de algas y plantas acuáticas originando el deterioro de la calidad de agua, lo que limita, e incluso, impide sus usos (Mazzeo *et al.*, 2001). La causa principal de la eutroficación es el incremento de la carga de nutrientes, fundamentalmente de nitrógeno y fósforo (CEPIS, 2001).

En la cuenca de la presa Valle de Bravo se han realizado diversos estudios referentes a la calidad de agua. En general sus resultados sugieren que el embalse se ha deteriorado debido a los aportes de nutrientes por diversas fuentes de contaminación, clasificándola en estado de eutroficación (Olvera, 1990 y 1993; Olvera *et al.*, 1998; CNA/Acuagranjas, 2002, 2003, 2004, 2005 y 2006; Conagua-IMTA, 2009 y 2010; Ramírez-Zierold *et al.*, 2010). Estos estudios señalan de igual manera que la subcuenca del río Amanalco es la principal fuente de contaminación del embalse.

La presa Valle de Bravo se encuentra situada en la cuenca alta del río Cutzamala, en el Estado de México; pertenece al Sistema Cutzamala (SC), que representa el 22% del abastecimiento de agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México. La presa tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 394.4 Mm³ y aporta un gasto de 6 m³/s al SC, que forma una red de siete presas de almacenamiento y de derivación, un vaso de regulación, un acueducto de 162.2 km, una planta potabilizadora, seis plantas de bombeo para vencer desniveles topográficos de 1 366 m y 24 km de acueductos en el área metropolitana de la Ciudad de México (Conagua, 2001).

1.2 Justificación

El nitrógeno y el fósforo son nutrientes identificados como los principales contaminantes que impactan directamente la calidad del agua, dado que las descargas que los contienen pueden acelerar la eutroficación de lagos y embalses, provocando un rápido crecimiento de algas y plantas acuáticas en cuerpos de agua. Estos cuerpos de agua en muchas ocasiones pierden sus atractivos para recreación y su utilidad como fuentes de abastecimiento de agua potable, agrícola e industrial (Cooke *et al.*, 2005).

La presa Valle de Bravo recibe los aportes de nutrientes provenientes de diversas fuentes de contaminación, alcanzando concentraciones que la clasifican en estado de eutroficación. Estas fuentes incluyen descargas de aguas residuales crudas y tratadas y escurrimientos urbanos, agrícolas, pecuarios y de otros usos de suelo. Para garantizar la sustentabilidad de la presa como fuente de abastecimiento, es necesario identificar estas fuentes externas de contaminantes en la cuenca y estimar sus aportaciones para definir las acciones más adecuadas que reduzcan los contaminantes. Por otro lado y dado las diferencias en carga externa reportadas en la literatura, en este trabajo se propone analizar estas diferencias y estudiar la carga externa por un método indirecto para comparar con los resultados de medición directa.

1.3 Hipótesis

- Mediante estimaciones de volúmenes de descarga y la obtención de concentraciones de contaminantes en agua residual y en escurrimientos de suelos con diferentes usos, es posible estimar la carga externa de nutrientes a un cuerpo de agua.
- La carga externa representa la mayor aportación de nutrientes en comparación con la carga interna en la presa Valle de Bravo.

1.4 Objetivo general

Evaluar los aportes de fósforo y nitrógeno por fuentes puntuales y difusas en la cuenca de la presa Valle de Bravo y formular propuestas para disminuir el aporte de estos nutrientes al embalse.

1.5 Objetivos específicos

- Identificar y evaluar la carga mensual de fósforo y nitrógeno por fuentes puntuales y difusas en la cuenca de la presa Valle de Bravo.
- Estimar los efectos sobre la magnitud de la carga externa en la presa mediante la evaluación de escenarios de soluciones para disminuir el aporte de nutrientes.

2. MARCO TEORICO

En este capítulo se analiza el concepto de eutroficación. Se describen los principales efectos de las concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo que se encuentran en los cuerpos de agua, sus fuentes, cómo se cuantifican y cómo afectan a los cuerpos receptores, finalmente se describen diferentes alternativas de solución para disminuir los aportes de contaminantes.

2.1. Eutroficación

El término *eutrofia*, se originó a partir del adjetivo griego *eutrophe*, y se refiere a “rico en nutrientes.” La eutroficación se define como el enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por eliminación o mineralización total. Una de sus principales manifestaciones es la proliferación de algas y plantas acuáticas en función de la carga de nutrientes, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P) (CEPIS, 2001).

Limnológicamente, los cuerpos de agua se pueden clasificar de forma simplificada en tres grandes tipos (CEPIS, 2001):

- Oligotróficos: Sistemas acuáticos de bajo contenido de nutrientes y reproducción vegetal mínima.
- Eutróficos: Sistemas acuáticos de alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva.
- Mesotróficos: Sistemas acuáticos con características intermedias entre oligotróficos y eutróficos.

La *eutroficación* es un proceso a través del cual cantidades nocivas de nutrientes se acumulan en los cuerpos de agua. Estos nutrientes proceden de los fertilizantes agrícolas, aguas residuales, pastizales y de sedimentos de las cuencas erosionadas. Si bien los nutrientes de origen natural son necesarios para la productividad del ecosistema, un exceso de ellos procedentes de las actividades

humanas puede saturar los ríos y lagos, hacer proliferar las algas, plantas acuáticas y deteriorar la calidad del agua. Un subproducto del crecimiento abundante de estas algas y plantas acuáticas es la generación de más materia orgánica que, a medida que se descompone en la columna de agua o en los sedimentos (ecuación a y b), produce disminución de oxígeno disuelto creando condiciones de anoxia que son tóxicas para la vida acuática (CEPIS, 2001).



Las algas presentes en los cuerpos de agua además del N y P requieren de una serie de elementos minerales para su crecimiento como el carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, potasio, magnesio, calcio, hierro, boro, zinc, cobre, molibdeno, manganeso, cobalto, sodio y cloro. Adicionalmente, las diatomeas requieren de sílice (CEPIS, 2001).

Por otro lado, el crecimiento excesivo de plantas acuáticas las cuales se pueden ubicar dentro, fuera y alrededor de los cuerpos de agua, pueden generar problemas como los siguientes (Mazzeo *et al.*, 2001):

- Deterioro de la calidad del agua.
- Pérdida de la biodiversidad de los cuerpos de agua por el desplazamiento de las especies nativas.
- Riesgos para la salud pública por la proliferación de fauna nociva, causa potencial de enfermedades.
- Obstrucción de canales y drenes de zonas de riego y tomas de plantas hidroeléctricas.
- Restricción al uso turístico, a las actividades recreativas y pesqueras.
- Reducción de la vida útil de los cuerpos de agua a causa del aumento de la sedimentación.
- Afectación del uso del agua, su valor o apariencia.

La importancia de minerales como el N y P, y otros elementos en la regulación del crecimiento vegetal depende de su abundancia y demanda en el ambiente acuático. Para el crecimiento correcto de las plantas acuáticas, existe una relación estequiométrica definida de los elementos esenciales. Por ejemplo, la proporción de N a P debe ser en la mayoría de las especies, del orden 10-15N a 1P. Si en esta proporción la cantidad de P aumenta al doble en el sistema, la planta utilizará solamente este nutriente mientras haya N disponible, el resto queda en el medio acuático (Mazzeo *et al.*, 2001).

El concepto más importante para explicar la respuesta alga-nutriente es el principio conocido como *nutriente limitante*. De forma resumida, este principio se basa en que la tasa de crecimiento algal estará restringida por el elemento que se encuentre presente en el medio acuático en menor concentración respecto a la producción requerida por las algas. Solamente la adición de este elemento limitante estimularía el crecimiento algal. Aunque cualquiera de los elementos minerales necesarios para el desarrollo vegetal, son susceptibles de ser limitantes, en la mayoría de los casos el P o N son los nutrientes limitantes y por eso los responsables de la aparición de condiciones perjudiciales en los sistemas acuáticos (CEPIS, 2001).

El N y P, responsables directos de la eutroficación, se originan en diversos lugares de una cuenca hidrológica y, debido a su poder erosivo, los ríos se consideran las principales vías de acceso a lagos y embalses. Estos arrastran sales, materia orgánica y sólidos en suspensión. A todo esto la acción humana añade residuos, que la capacidad de autodepuración que poseen los ríos no puede asumir, generándose concentraciones elevadas de estos nutrientes (Bosco *et al.*, 2004).

En una cuenca hidrológica los diferentes usos del suelo desempeñan un papel importante en la eutroficación al alterar las rutas y tasas de transporte de nutrientes del ambiente. En la mayoría de las cuencas, los nutrientes que entran al cuerpo de agua pueden ser derivados de fuentes naturales y actividades antropogénicas. El estudio del origen, transporte y destino de los nutrientes es

debido a sus ciclos biogeoquímicos y la disponibilidad de los mismos, y estos dependen de varios procesos e interacciones en la atmósfera, hidrosfera y litosfera (Figura 1). Cada proceso es un precursor del anterior y el flujo de nutrientes sigue una serie de pasos interconectados. (Bosco *et al.*, 2004). La población humana tiene un papel importante en la alteración de estos ciclos, beneficiándose a corto plazo y perjudicando a largo plazo a todo el planeta (CEPIS, 2001).

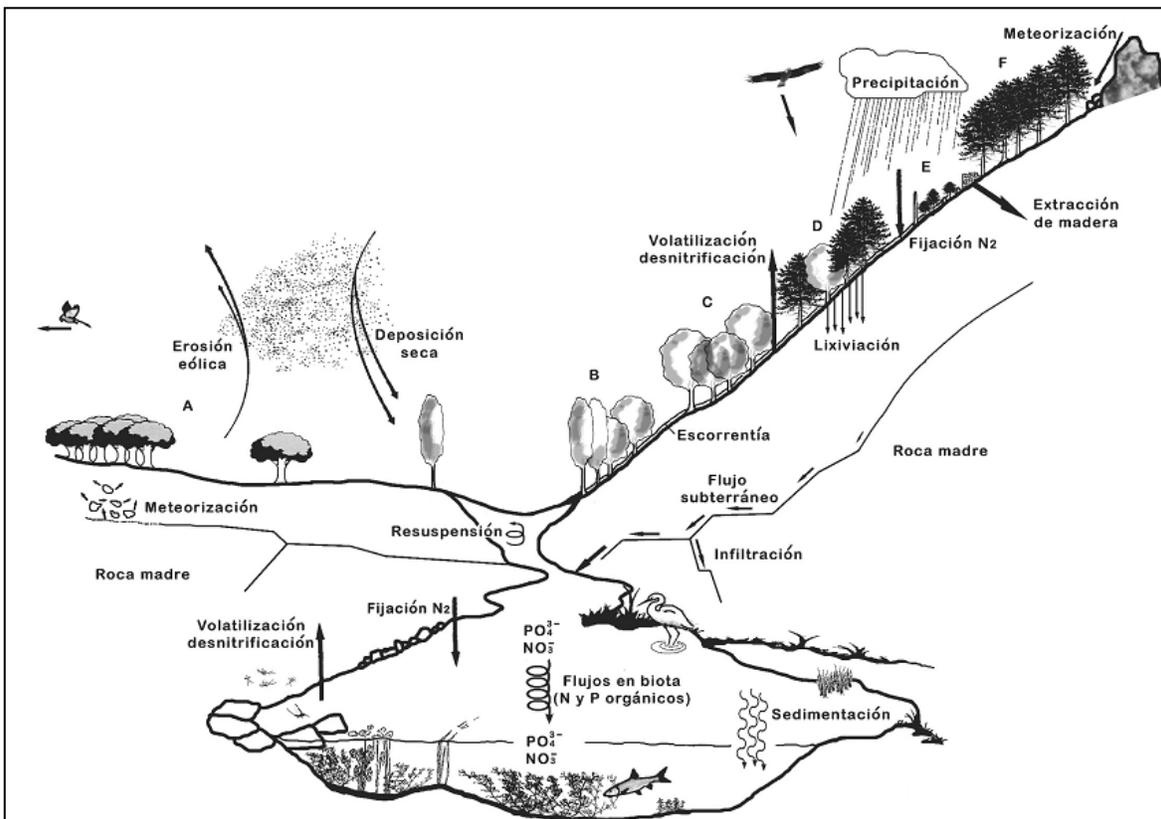


Figura 1. Ciclo externo de nutrientes en una cuenca hidrológica (Bosco *et al.*, 2004)

A continuación se describen los ciclos biogeoquímicos que tiene relación con el problema de eutroficación.

2.1.1. Ciclo biogeoquímico del fósforo

El P es un elemento químicamente muy reactivo en la naturaleza y se encuentra en más de 170 compuestos minerales; éstos varían ampliamente en su solubilidad, ya que naturalmente evolucionan en el tiempo desde formas químicas moderadamente solubles a especies poco solubles. En consecuencia, es el

elemento menos móvil y con menos problemas de biodisponibilidad de todos los macronutrientes (carbohidratos, proteínas y grasas) (Holford, 1997).

El P inorgánico principalmente se encuentra en las rocas y los depósitos naturales de fosfatos. De aquí es removido por la erosión, la lixiviación o la extracción minera para usos agrícolas. Su proceso de liberación es muy lento, por depender del ciclo geológico (conjunto de fenómenos complejos que afectan a la corteza y manto superficial, se consideran como etapas de procesos encadenados en el tiempo para la formación de rocas), por lo que constituye el principal factor limitante de su producción (Figura 2). El P se presenta en la naturaleza como P adsorbido (anión ortofosfato PO_4^{3-}), P orgánico y P mineral (Coyne, 2000).

Las principales formas de fosfato inorgánico son las que se muestran en la Tabla 1. Todas ellas son de menor solubilidad que los compuestos fosfatados orgánicos. Las principales formas de fosfatos orgánicos son el fosfato de inositol y los ácidos nucleicos. Tanto el inositol como los ácidos nucleicos parecen tener origen principalmente microbiano. El nivel de P orgánico en suelos varía entre 3 y 85% del P_T .

Tabla 1. Formas de fosfatos inorgánicos (modificado de Tsai y Rosetto, 1992)

Fosfatos inorgánicos	Denominación	Composición	Abundancia
Fosfatos de calcio	Hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$	alta
	Oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaO}$	baja
	Fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$	alta
	Carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCO}_3$	baja
	Fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	baja
	Fosfato bicálcico	CaHPO_4	alta
	Fosfato monocálcico	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	alta
Fosfatos de hierro	Vivianita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	baja
	Estrengita	$\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	baja
Fosfatos de Al	Variscita	$\text{Al}(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	baja

En diferencia con el carbono (C) y el N, el P no se presenta en estado gaseoso en condiciones normales de temperatura y presión. Su ciclo se realiza a través del agua (P orgánico disuelto y P inorgánico disuelto), suelos y sedimentos (adsorción a superficies minerales) y tejidos orgánicos/material húmico (Coyne, 2000).

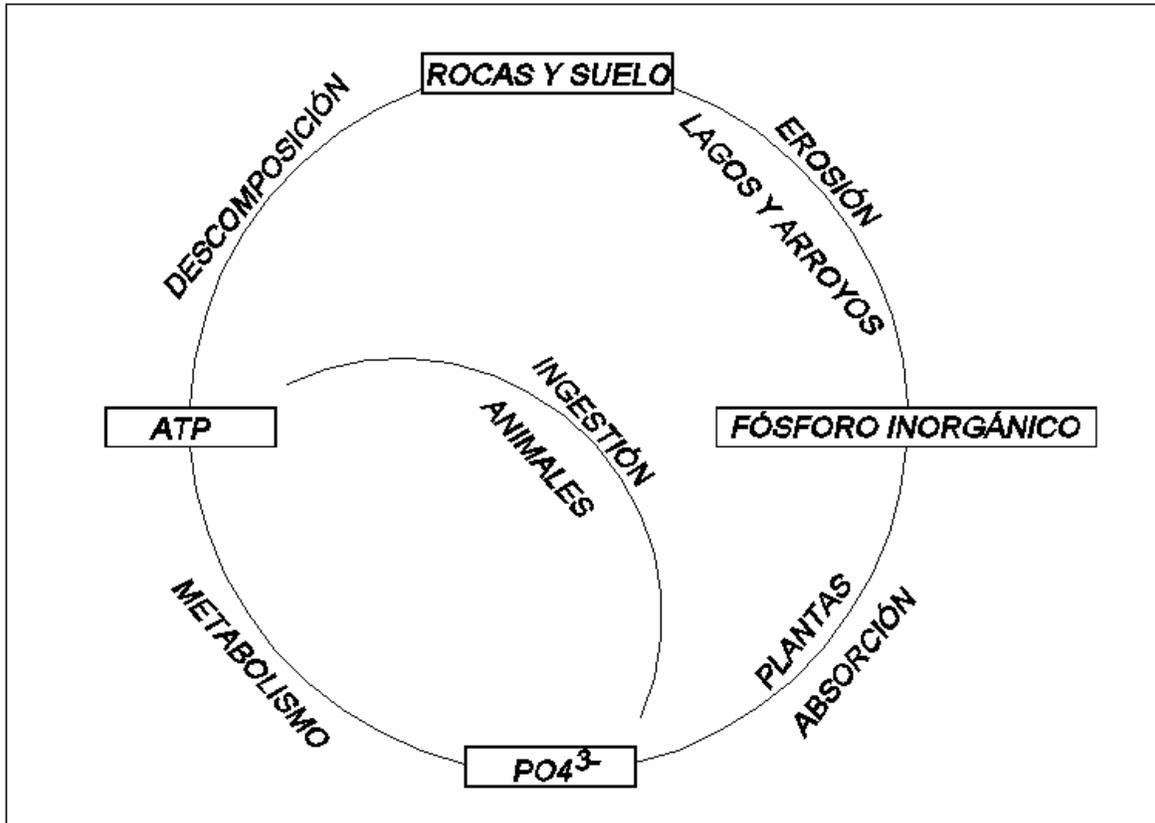


Figura 2. Ciclo simplificado del fósforo en la naturaleza (modificado de Holford, 1997)

Los principales pasos del ciclo del P son su mineralización, el almacenamiento, la adsorción/absorción del humus y su fijación química en el suelo la cual puede presentarse en suelos de origen volcánico que posee una arcilla amorfa llamada alófono, la cual casi retiene irreversiblemente el P a menos que exista la acción de hongos micorrícicos que favorecen la solubilidad del nutriente (Holford, 1997).

Los mecanismos que afectan la movilidad del P son la adsorción-precipitación, inmovilización biológica, asimilación en plantas y lixiviación (Holford, 1997). A continuación se discuten dichos mecanismos:

- Adsorción-Precipitación

El P puede ser inmovilizado en el suelo en presencia de hidróxidos de hierro, aluminio y de calcio (carbonato o hidróxido de calcio). Se trata de un proceso físico y químico donde se combina la adsorción con la precipitación. La adsorción del P

como fosfato en la superficie de las partículas del suelo es muy rápida, alcanzándose el equilibrio en 24 horas. El fosfato adsorbido es bastante móvil por lo que se puede producir fácilmente un intercambio iónico. Después de esta reacción inicial de adsorción, el fosfato continúa reaccionando con el suelo dando lugar a una fase inmóvil como consecuencia de su precipitación y/o lenta difusión dentro de la matriz del suelo. Este proceso está condicionado fuertemente por el pH; en suelos con pH mayor a 6, el fosfato es adsorbido por los óxidos de hierro y aluminio, formándose un compuesto de fosfato de calcio poco soluble que precipita (fosfato dicálcico o tricálcico que se transforma, rápidamente, en hidroxiapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, fluorapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_6$, y cloroapatita).

- Inmovilización biológica

El P soluble puede ser consumido por los microorganismos presentes en el suelo para su proliferación, acumulándose en forma orgánica, en el humus. Posteriormente podrá ser utilizado a medida que se degrada la materia orgánica. Es un proceso que se manifiesta en suelos con alto contenido en C y elevada presencia de microorganismos.

- Asimilación en plantas

El fosfato que es aportado al suelo puede ser asimilado lentamente por las plantas en forma de fosfato monobásico o dibásico PO_4H_2^- o PO_4H^{2-} . En suelos calizos, alcalinos o neutros, el fosfato precipita como formas bastante insolubles (hidroxiapatita, fluorapatita); sin embargo, pueden ser en parte asimilables por las plantas. La asimilación del fosfato por las plantas sólo se puede producir a pH entre 5.5 y 6.0 (débilmente ácido), ya que a este pH el suelo tiene la máxima concentración de fosfato en equilibrio con Fe, Al y Ca.

- Lixiviación

La lixiviación del P se produce desde la superficie del suelo hasta el subsuelo cuando el agua infiltrada circula a través de canales preferenciales de flujo (macroporos), no produciéndose entonces la interacción agua-medio sólido.

2.1.2. Ciclo biogeoquímico del nitrógeno

El N es el cuarto elemento más abundante en la materia viva que constituye un 8-16%, seguido del C, oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2). Cualitativamente, forma parte de moléculas tan importantes para la actividad biológica como son los ácidos nucleicos, donde se asienta la información genética, o las proteínas y enzimas, que son componentes estructurales fundamentales en la organización de la materia viva y catalizadoras de los procesos biológicos respectivamente (Rosswall, 1979).

El planeta Tierra contiene más de 60 000 billones de t de N, de los que el 94% se encuentran en la corteza terrestre. Del 6% restante, 99.86% se halla en la atmósfera como nitrógeno molecular (N_2), y 0.04% aparece en los organismos vivos, suelos y aguas, en forma de compuestos orgánicos e inorgánicos (Figura 3).

El aire que respiramos contiene un 79% en volumen de N_2 , lo cual significa que sobre cada hectárea de terreno, teniendo en cuenta el espesor de la capa atmosférica, existen 75 000 t de este elemento. No obstante, ese N que se encuentra en estado molecular (N_2), y que entra en nuestros pulmones, y sale tal cual, reflejando un carácter inerte, no es utilizable por los organismos vivos, excepto por los pocos que pueden convertirlo en compuestos aprovechables. De hecho, las plantas, los animales y casi todos los microbios, sólo pueden utilizar N combinado, es decir, N integrado en un compuesto químico. En efecto, las plantas y la mayoría de los microbios son dependientes de formas inorgánicas de aquel elemento como nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), mientras que los animales requieren N orgánico obtenido directa o indirectamente de las plantas (Rosswall, 1979).

Mientras que el estado de oxidación del N orgánico es -III, el N inorgánico puede existir en siete estados de oxidación (Tabla 2). Debido a que los estados I, II y IV, tienen poca significancia en los procesos biológicos, la química del N de interés para el medio ambiente, puede resumirse en cuatro estados de oxidación (Tabla 2).

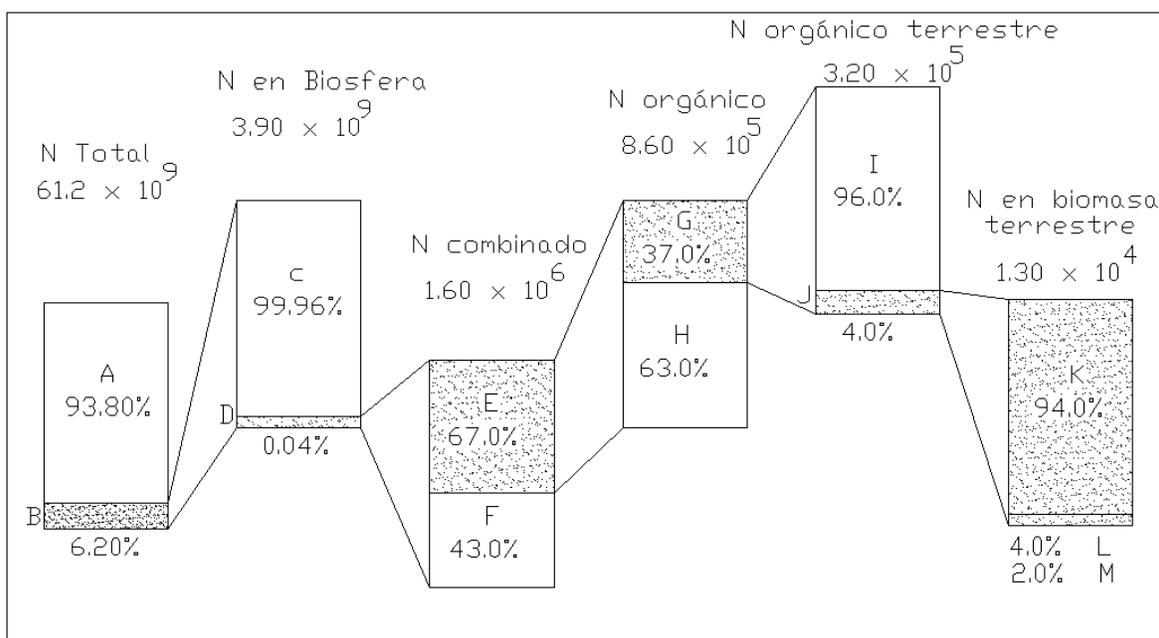


Figura 3. Distribución de nitrógeno (N) en la Tierra, expresada en millones de t.
 A: corteza; B: biósfera; C: atmósfera; D: combinado; E: orgánico; F: inorgánico;
 G: orgánico terrestre; H: orgánico acuático; I: materia orgánica muerta; J: biomasa;
 K: plantas; L: microbios; M: animales. Modificado de Rosswall, 1979.

Tabla 2. Formas del N en el medio ambiente (modificado de Rosswall, 1979).

Compuesto	Estado de oxidación	De interés para el medio ambiente
$\text{NH}_3, \text{NH}_4^+$	-III	√
N_2	0	√
N_2O	I	
NO	II	
$\text{N}_2\text{O}_3, \text{NO}_2^-$	III	√
NO_2	IV	
$\text{N}_2\text{O}_5, \text{NO}_3^-$	V	√

El N combinado se encuentra en muchos suelos en concentraciones muy bajas y constituye, después del agua, el principal factor limitante del desarrollo de los vegetales, no obstante de vivir inmersos en una atmósfera cuyas 4/5 partes son N.

El N, al igual que todos los elementos biológicamente importantes, pasa por cambios cíclicos, de modo que puede ser utilizado y a la vez repuesto dentro de lo que se conoce como ciclo biogeoquímico del N, por medio del cual un átomo de N pasa del estado orgánico al inorgánico y viceversa, en una secuencia de procesos que implican actividades de organismos vivos y conversiones no biológicas (Figura

4). Se trata de un conjunto de transformaciones donde se dan varias etapas, y entre ellas se destacan (Postgate, 1982).

- Formación de N inorgánico, como amoníaco, NO_2^- y NO_3^- , a partir de N orgánico procedente de las excreciones y descomposición de los organismos, en un proceso de mineralización.
- El N inorgánico puede ser absorbido por plantas y microorganismos, pasar de nuevo a formar parte de la materia viva, y circular a lo largo de las cadenas de alimentación.
- El N inorgánico puede ser transformado en N_2 y sus óxidos, que escapan a la atmósfera en un proceso de desnitrificación.
- El N_2 atmosférico pasa a forma combinada en un proceso de fijación.

Conviene destacar algunos puntos de interés acerca del ciclo biogeoquímico del N:

- a) Muchas de las transformaciones son realizadas por unos pocos organismos.
- b) Es fácilmente afectado por el hombre a través de la utilización creciente de fertilizantes, y de la emisión de óxidos de N a la atmósfera como consecuencia de las combustiones industriales.

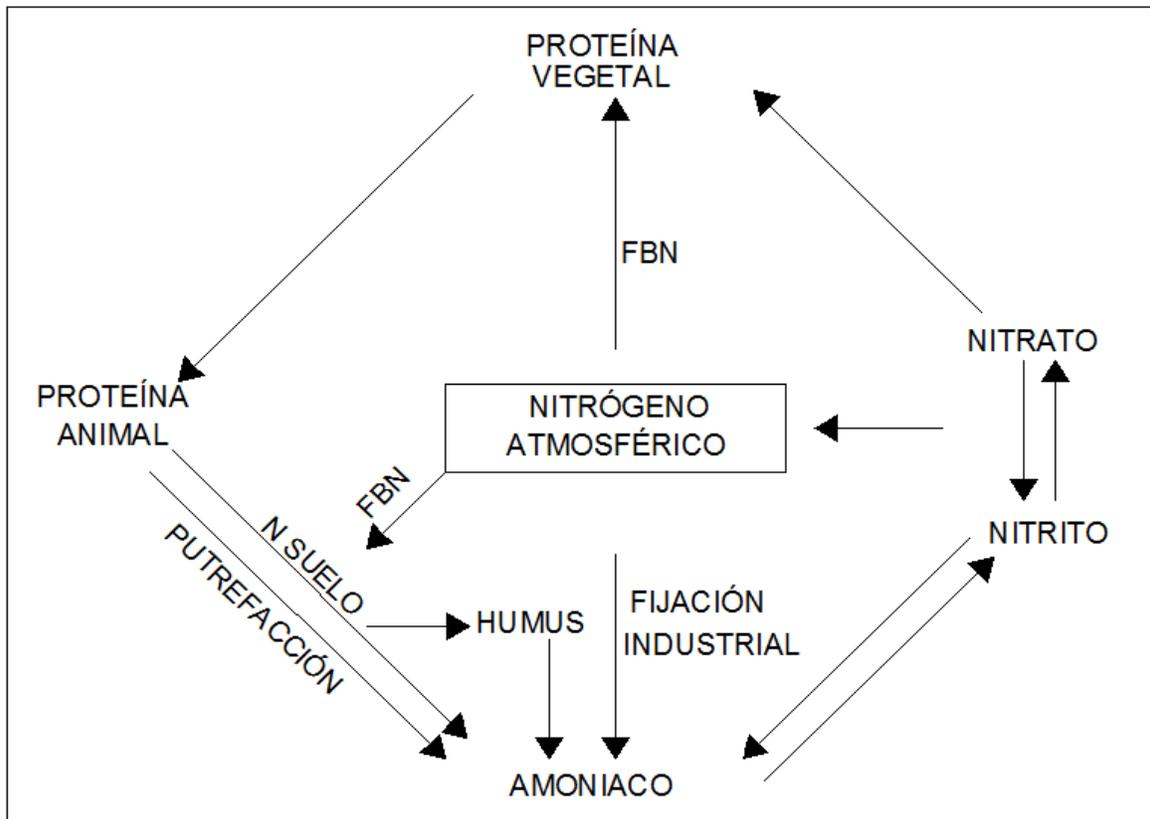
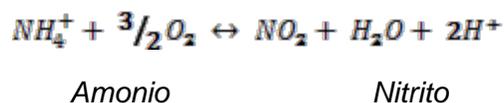
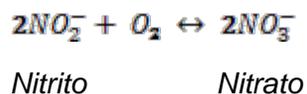


Figura 4. Ciclo simplificado del N en la naturaleza (modificado de Postgate, 1982). La reserva inagotable de N de la atmósfera regula el aporte de ese elemento al ciclo, a través de la Fijación Biológica de Nitrógeno (FBN), especialmente en aquellos sistemas suelo planta-animal-hombre, de los que se exporta en la cosecha de los cultivos

La mineralización de N incluye dos procesos: amonificación y nitrificación. La primera consiste en la formación de compuestos amoniales realizada por microorganismos heterótrofos, entre los que se encuentran bacterias y hongos. La segunda, es la oxidación del NH_4^+ a NO_3^- , en dos etapas realizadas por dos tipos de microbios, que obtienen de ellas toda la energía que necesitan para su crecimiento. En la primera etapa de la nitrificación, las bacterias del N del género *Nitrosomas* oxidan el NH_4^+ a NO_2^- , según:



En la segunda etapa, las bacterias del N *Nitrobacter* convierten el NO_2^- en NO_3^- :



La velocidad de mineralización es un factor importante en la determinación de la fertilidad del suelo. Se calcula que del 1 al 3% del N de la materia orgánica presente en un suelo agrícola se mineraliza en una estación, lo que indica una cierta resistencia del N orgánico a la mineralización (Postgate, 1982).

La nitrificación tiene lugar con rapidez en la mayoría de los suelos, constituyendo el NO_3^- la fuente de N más importante para la mayoría de las plantas, donde unas enzimas conocidas como *nitrato-reductasas*, lo convierten en NH_4^+ , que es utilizado en la síntesis de aminoácidos y proteínas. Hay que señalar que, a diferencia del NH_4^+ , el NO_3^- no es retenido fácilmente por el suelo, sino que es transportado por el frente acuoso en un proceso de lixiviación, de modo que si la lluvia es muy intensa, con duración alta y el suelo es muy permeable, puede ser arrastrado a profundidades inaccesibles para las raíces (Postgate, 1982).

El proceso opuesto a la mineralización se conoce como inmovilización. En ella, los microbios heterótrofos convierten, por amonificación, el N orgánico a N amoniacal, parte del cual es utilizado para su crecimiento, inmovilizándolo o haciéndolo no disponible para la alimentación de las plantas.

En resumen, la cantidad de N del suelo en forma asimilable por las plantas, y en ausencia de aportes externos de N, es función de la cantidad de N orgánico de reserva en el mismo y particularmente de los factores que afectan a su mineralización e inmovilización (Postgate, 1982). Cuando falta oxígeno, como ocurre por ejemplo en terrenos encharcados, algunas bacterias son capaces de respirar sustituyendo el oxígeno libre, del que no disponen en esas condiciones, por el NO_3^- o NO_2^- , formándose óxidos de nitrógeno (NO_x) o N_2 , que son gases que escapan a la atmósfera en un proceso de desnitrificación Figura 5 (Rodríguez *et al.*, 1984).

La fijación de N es la etapa reguladora del ciclo de este elemento, en la que el N atmosférico pasa a forma combinada, compensando así las pérdidas de ésta por desnitrificación y por pérdida como amoníaco (NH_3^{-2}) desde la solución del suelo (Rodríguez *et al.*, 1984). Son tres las rutas para este proceso:

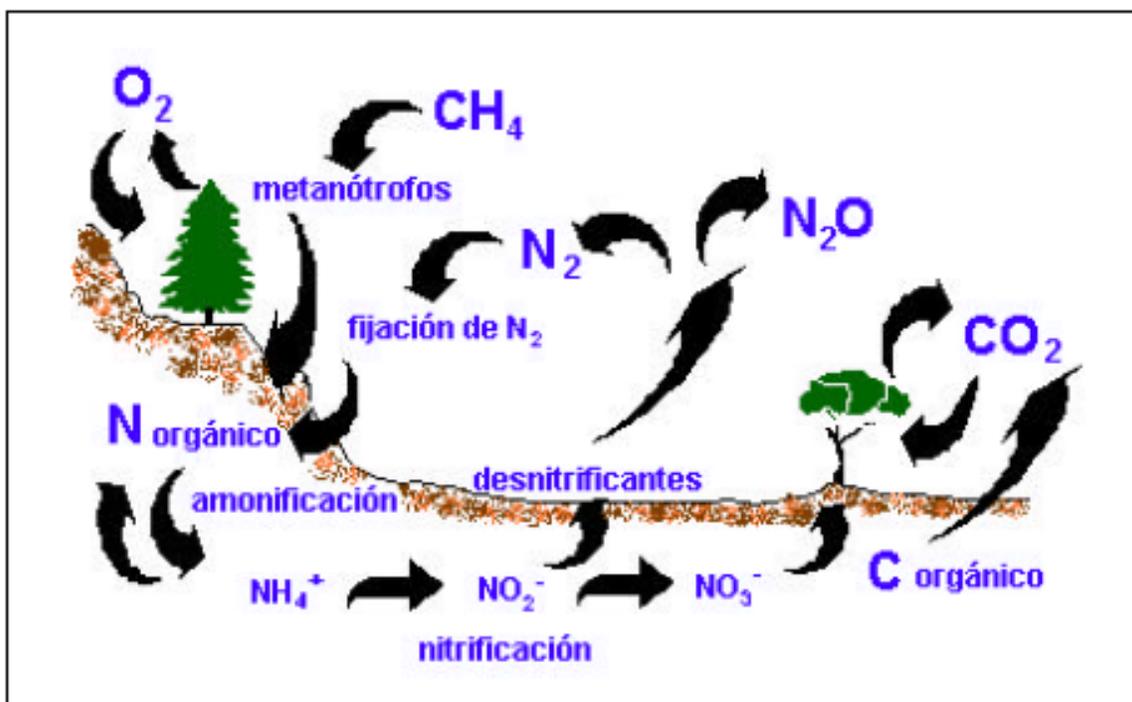


Figura 5. Procesos en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno (Rodríguez *et al.*, 1984).

- La fijación espontánea es un proceso natural en que descargas eléctricas de tormentas, radiación ultravioleta, rayos cósmicos, meteoritos, combustibles industriales e incendios, entre otras causas, proporcionan momentáneamente la energía requerida para originar NO_x e incluso NH_3^{-2} , a partir de N_2 , que eventualmente son arrastrados por el agua de lluvia al suelo.
- La fijación industrial química es la producción de NH_3^{-2} , y fertilizantes nitrogenados por la industria a partir del N del aire.
- La fijación biológica es la conversión de N_2 en NH_3^{-2} , realizada por microbios libres o en asociación con plantas superiores, microbios que reciben por ello el nombre de diazótrofos (azoe: nitrógeno; trofos: alimentación).

El balance del N en el suelo es la relación que existe entre ganancias y, pérdidas de este elemento, y viene determinado por el clima, tipo de suelo y, en su caso, actividades agrícolas. Las ganancias están representadas por las fijaciones

biológica y espontánea, y por actividades antropogénicas. Las pérdidas lo están por los procesos de desnitrificación, lavado de NO_3^- y volatilización de NH_3^{-2} , a los que hay que añadir en suelos cultivados las pérdidas que significan la exportación de las cosechas, que en conjunto y para las tierras cultivadas, suponen una extracción de más de 200 millones de t de N al año, cantidad muy superior a la incorporada por vía natural (Rodríguez *et al.*, 1984).

Teniendo en cuenta que el nivel de N asimilable en el suelo determina la productividad vegetal, es evidente que se debe reponer el N extraído, y las iniciativas han de estar dirigidas a potenciar procesos que aumenten el aporte de aquel elemento al ecosistema, como es el caso de la fijación biológica de N, al mismo tiempo que se deberán reducir las pérdidas habidas por prácticas de cultivo inadecuadas (Rodríguez *et al.*, 1984). La fijación de N en la biósfera se estima en unos 275 millones de t anuales, de los cuales 175 corresponden a la fijación biológica, 70 a la industrial, y 30 a la espontánea. Por lo tanto, la fijación biológica supone más del 60% del N fijado. La acción sobre la fijación espontánea no es fácil, por lo que se puede intervenir únicamente en la fijación industrial y, por supuesto, sobre la biológica (Rosswall, 1979).

2.2. Cargas externas e internas de nutrientes en cuerpos de agua

La carga externa se genera a partir de materiales arrastrados por la acción de la precipitación, la erosión en la cuenca y el uso de fertilizantes. A ellos se suman el vertido de efluentes industriales y domésticos. La cantidad de nutrientes que llega a los cuerpos de agua varía de acuerdo a las particularidades de la cuenca de descarga y a las características químicas de las propias sustancias que son vertidas. Los escurrimientos superficiales como ríos y arroyos constituyen las principales vías de entrada de nutrientes a lagos y presas (UNEP-IETC, 2001). En cambio, la carga interna se genera como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica y de los mecanismos físicos y químicos que permiten la liberación de nutrientes del sedimento en el propio cuerpo de agua.

2.3. Fuentes externas de nutrientes

Las principales fuentes externas de nutrientes son actividades humanas como la agricultura, la industria, la pecuaria, la deforestación, ciertos usos de suelo y las producidas por la naturaleza como la precipitación pluvial que puede contener partículas y materia disuelta que contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua (Arredondo *et al.*, 2007). En general, las fuentes de contaminación de nutrientes y otros contaminantes son de dos tipos: puntuales y difusas, esta clasificación tiene que ver con la manera en que la contaminación llega al cuerpo receptor. Los contaminantes de interés para el presente estudio y su descripción se mencionan a continuación:

Demanda Bioquímica de Oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) expresa la cantidad de oxígeno necesaria para degradar a través de los microorganismos, la materia orgánica. Los materiales que consumen el oxígeno molecular disuelto en cuerpos de agua por ejemplo, se llaman materiales demandantes de oxígeno. Este tipo de materiales en su mayor parte son materia orgánica biodegradable, junto con algunos compuestos inorgánicos. En el agua residual doméstica éstos provienen generalmente de residuos de alimentos y desechos humanos y de animales. Las industrias también descargan desechos demandantes de oxígeno.

En general, casi toda la materia orgánica que llega a un cuerpo de agua por fuentes externas contribuye a disminuir el oxígeno disuelto (OD). La demanda de oxígeno representa una amenaza para la flora y la fauna, y para las formas superiores de vida de un cuerpo de agua, quienes requieren del OD para sobrevivir. La concentración de OD necesario varía según la especie, pero los peces de mayor interés comercial y deportivo requieren de concentraciones por arriba de 5 mg/L; por ejemplo la trucha común, trucha arcoiris, salmón, y entre otras especies (Arredondo *et al.*, 2007).

Nutrientes

Los nutrientes, como el N y el P, que son requeridos por todos los seres vivos para su desarrollo, se consideran contaminantes cuando se encuentran en concentraciones elevadas y favorecen el desarrollo de algunas especies sobre otras e interrumpe la red alimenticia. La concentración elevada de nutrientes permite el crecimiento de algas, las cuales al morir se asientan en el fondo y se convierten en materia orgánica, disminuyendo el OD y dificultando el desarrollo de muchas otras especies. Los nutrientes en las aguas residuales provienen principalmente de detergentes y fertilizantes, desechos del procesamiento de alimentos así como del excremento animal y humano (Jiménez, 2005).

Sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos son partículas orgánicas e inorgánicas arrastradas por el agua residual y pluvial hasta el cuerpo de agua más cercano, generándose de igual manera como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica en el propio cuerpo de agua. Estas partículas que no se asientan con facilidad, a veces forman coloides y causan turbidez, además de que pueden llevar P en forma particulada. Los sólidos se producen sobre todo de áreas de tala, explotación minera y la construcción. Al aumentar la turbidez, las partículas suspendidas no dejan pasar la luz, lo cual puede contribuir a aumentar la concentración de bacterias y cuando estas se asientan en el fondo destruyen el hábitat de varios organismos. También en condiciones de movimiento, las partículas suspendidas, al ser arrastradas, pueden destruir los hábitats de organismos acuáticos (Jiménez, 2005).

2.3.1. Fuentes puntuales de contaminación

Las *fuentes puntuales* son aquellas que se descargan en un solo sitio, provienen de instalaciones, plantas de tratamiento de agua residual o actividades específicas. Generalmente, éstas se generan en la industria y en las manchas urbanas. Se considera que las *fuentes puntuales* son más fáciles de controlar

debido a que se conoce su localización y, por tanto, se facilita el muestreo, la cuantificación y el análisis (Jiménez, 2005).

2.3.2. Fuentes difusas de contaminación

Las *fuentes difusas* de contaminación son de difícil control y provienen de retornos agrícolas, silvicultura, lixiviados de residuos y desechos sólidos, erosión, drenados de minas, lavado de contaminación atmosférica, falta de drenaje, fugas y fosas sépticas. La contaminación por *fuentes difusas* es producida principalmente por las aguas de lluvia que se mueven sobre y a través del suelo, acarreando contaminantes naturales y los resultados de las actividades humanas, cuyo destino final se realiza sobre cuerpos de agua (Jiménez, 2005). Una característica básica de esta contaminación es que sus impactos no son locales sino que tienden a afectar toda una cuenca hidrográfica y por ende el destino final de los escurrimientos superficiales (Arredondo *et al.*, 2007).

2.4. Métodos de evaluación de las cargas externas

Los métodos que se usan para cuantificar la contaminación en un cuerpo de agua están basados en las propiedades físicas y los procesos biogeoquímicos que determinan la calidad del agua en el tiempo. Un factor que se debe de tomar en cuenta al hacer una evaluación de la calidad del agua es que la concentración de los organismos decrece con el tiempo y con la distancia que recorre al ser descargado (Richards, 1997).

Los métodos utilizados para la estimación de cargas por fuentes externas de contaminación se fundamentan en la evaluación directa (monitoreo) o en la estimación indirecta (modelación) (EPA, 2008).

2.4.1. Evaluación directa de carga externa de contaminantes por monitoreo

El método de la evaluación directa de cargas externas de contaminantes por monitoreo en cuerpos de agua se basa en la valoración en periodos de tiempo de gastos en los afluentes y mediciones de los parámetros estudiados (EPA, 2008).

La frecuencia de las mediciones necesarias para caracterizar adecuadamente los gastos y las concentraciones de contaminantes en el tiempo es a menudo difícil de determinar. Dependen de las condiciones propias de cada sitio de estudio (Richards, 1997).

Para la estimación de la carga de contaminantes, comúnmente expresada como masa por unidad de tiempo, se utiliza la siguiente ecuación general:

$$\text{Carga} = k \int_{t=1}^{t=n} C(t)Q(t)dt \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

k	=	constante de conversión de unidades.
t	=	tiempo (tiempo)
$C(t)$	=	concentración típica de contaminante en un tiempo t (masa/volumen)
$Q(t)$	=	gasto de descarga (volumen/tiempo)
n	=	número de datos

La desventaja de la evaluación directa de cargas de contaminantes, es que frecuentemente no existen suficientes datos de campo, que permitan evaluar todos los escenarios que se pueden presentar en una cuenca hidrológica.

2.4.2. Estimación indirecta de carga externa de contaminantes por modelación

Este método está dividido en tres pasos básicos que son: la estimación de la descarga de agua, la estimación de las concentraciones de contaminantes por fuente de contaminación y, finalmente, el cálculo de la carga de contaminantes (EPA, 2008).

- Estimación de la descarga de agua

Para obtener la estimación del agua que se produce en una determinada área de estudio, es necesario apoyarse en métodos hidrológicos a través de procedimientos de estimación de descarga de agua por medio de métodos directos e indirectos, basados en los resultados de las estaciones de redes de mediciones hidrométricas y meteorológicas. Los métodos estiman el volumen total

generado en un área determinada por medio de la precipitación media y por la superficie de la cuenca hidrológica.

Para el cálculo de la precipitación media en una cuenca o un área, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas (pluviométricas), pueden utilizarse tres procedimientos principales (Aparicio, 2009).

1. El primero y más simple es tomar como precipitación media la media aritmética de los valores observados en las distintas estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca. Esto sólo es aconsejable cuando la distribución de las estaciones en la cuenca sea bastante uniforme en las zonas bajas y convenientemente elegidas en zonas de montaña. Estas dos condiciones normalmente no se dan en la mayoría de las cuencas de México, por lo que este procedimiento no es adecuado.

Para determinar la precipitación media de la cuenca con este método se aplica la expresión matemática siguiente:

$$P = \frac{\sum P_n}{n} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

P = precipitación media de la cuenca (mm).
 P_n = precipitación media de cada estación meteorológica (mm).
 n = número de estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca.

2. Un segundo procedimiento es el de los polígonos de Thiessen. La red poligonal se traza formando los polígonos mediante las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones. Se supone que cada estación es representativa del área del polígono que la encierra, de manera que la precipitación media de la superficie limitada por cada polígono es la que se registra en la estación meteorológica correspondiente. Así, la precipitación media de la cuenca se obtiene sumando los productos de las precipitaciones de cada estación por el área del polígono correspondiente y dividiendo la suma entre el área total de la misma cuenca:

$$P = \frac{(P_1 a_1) + (P_2 a_2) + (P_3 a_3) + \dots + (P_n a_n)}{A} \quad \text{Ec. 3}$$

$$P = \frac{\sum P_n a_n}{A} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- P = precipitación media de la cuenca (mm).
 P_n = precipitación media de cada polígono (mm).
 a_n = área correspondiente a cada polígono (m²).
 A = área total de la cuenca (m²).

3. Un tercer procedimiento es el método de las isoyetas, que es el más preciso. Consiste en trazar isolíneas de igual precipitación (isoyetas). La precipitación media de la cuenca se calcula sumando los productos de las áreas comprendidas entre cada dos isoyetas, por su correspondiente precipitación media, y dividiendo la suma entre el área total de la cuenca. Cuando las isoyetas discurren paralelas, la precipitación media del área comprendida entre cada dos es la semisuma de los valores de éstas. Para determinar la precipitación media se emplea la siguiente expresión:

$$P = \frac{(P_1 a_1) + (P_2 a_2) + (P_3 a_3) + \dots + (P_n a_n)}{A} \quad \text{Ec. 5}$$

$$P = \frac{\sum P_n a_n}{A} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- P = precipitación media de la cuenca (mm).
 P_n = precipitación media correspondiente al área entre dos isoyetas (mm).
 a_n = área comprendida entre cada dos isoyetas (m²).
 A = área total de la cuenca (m²).

El método de isoyetas permite obtener mejores resultados ya que al construir el mapa de isoyetas se puede incluir el posible efecto orográfico, el método de Thiessen es menos preciso, pero permite sistematizar fácilmente los cálculos, lo cual es muy útil cuando se necesita analizar una gran cantidad de tormentas. El promedio aritmético sirve únicamente para tener una idea aproximada del valor de la precipitación media. En cualquier caso, el volumen total de la lluvia en la cuenca se obtiene multiplicando la precipitación media por el área de la cuenca.

Actualmente, después del desarrollo del método hidrológico seleccionado y con datos suficientes en la zona de estudio, se puede considerar la aplicación de modelos numéricos para describir escenarios de escurrimientos y carga externa de contaminantes. En el Anexo I se presenta una revisión de modelos hidrológicos y de simulación de carga externa de contaminantes.

- Estimación de concentraciones de contaminantes por fuente de contaminación

Para obtener las concentraciones de contaminantes en una zona de estudio se deben realizar mediciones en descargas o usos de suelo mediante muestreos en escurrimientos o en descargas puntuales (Newell *et al.*, 1992). Si no existe información sobre concentraciones de contaminantes en los afluentes de una zona de estudio, se deben considerar datos obtenidos para cuencas con características similares (Richards, 1997).

- Estimación de la carga de contaminantes

La estimación de la carga de contaminantes que se produce en una determinada área de estudio, se obtiene utilizando la *ecuación (Ec. 1)* presentada en el apartado de evaluación directa de carga externa de contaminantes por monitoreo.

Aplicación de un Sistema de Información Geográfica para la modelación hidrológica

La modelación hidrológica en una cuenca hidrográfica requiere la utilización conjunta de series de datos climatológicos e hidrológicos procedentes de estaciones de observación situadas en puntos estratégicos y de información fisiográfica, topografía, red de drenaje, vegetación, usos de suelos, entre otros, asociada a la cuenca, así como de información sobre la infraestructura existente y principales usos del agua. La modelación se basa, por tanto, en la utilización de información geo-referenciada mediante el uso de herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) y el vínculo con métodos hidrológicos tradicionales.

Las ventajas del proceso de utilización conjunta de un SIG con modelo hidrológico se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Utilización de cartografías digitales relativas a aspectos físicos de la cuenca.
- Obtención de más combinaciones de estas cartografías, lo cual implica mayor posibilidad de reflejar la influencia de dos o más aspectos hidrológicos en un comportamiento determinado de esorrentía.
- Relación rápida con los parámetros del modelo.
- Automatización de la estimación de la precipitación y evapotranspiración sobre cada área de la cuenca hidrográfica.
- Subdivisión de todos los procesos, por trazado y simulación hidrológica de subcuencas en la cuenca hidrográfica.

Por lo contrario, las limitaciones durante el proceso de utilización de un SIG se dan básicamente por la falta de datos actualizados y disponibles para la alimentación durante las estimaciones y simulaciones hidrológicas, sin embargo actualmente el uso de esta herramienta es considerada importante para la investigación y como elemento de apoyo a la toma de decisiones (Silva, 1998).

2.5. Métodos para disminuir la carga externa de contaminantes

En una cuenca hidrológica los lagos y presas almacenan el agua presentando períodos prolongados de residencia hidráulica en comparación con la rápida entrada y salida de agua en un escurrimiento superficial. Los lagos y presas tienen por tanto un interés especial por la retención de ciertos elementos, en especial nutrientes como N y P que favorecen la eutroficación (Wetzel, 2001).

Los cuerpos de agua a los que se les designa un uso debería controlárseles de acuerdo con la normativa vigente, que puede establecer criterios numéricos

básicos y máximos de parámetros físico-químicos y bacteriológicos (Wetzel, 2001). Sin embargo, no existe seguimiento para el cumplimiento de estas normas. Las estrategias de control o métodos de restauración se pueden clasificar en dos grandes grupos (Mazzeo *et al.*, 2001).

1.- *Preventivos*: limitan la producción o fertilidad del agua mediante reducción de la carga externa o diversificación de los efluentes hacia otro ecosistema.

2.- *Correctivos*: intervienen en el ecosistema del lago o embalse (carga interna) control de organismos indeseables mediante tratamiento químico, aeración, remoción de la capa superior del sedimento por mencionar algunos.

Los métodos para disminuir el aporte de nutrientes a los sistemas acuáticos eutroficados han evolucionado desde el control de los aportes externos de nutrientes exclusivamente hacia métodos más ecosistémicos, combinando el control de la carga externa e interna de nutrientes y la aplicación de técnicas de biomanipulación (FAO, 1997). De forma muy resumida se presentan los principales métodos y estrategias empleadas a nivel mundial de acuerdo al tipo de fuente de contaminación por carga externa:

a) Para las *fuentes puntuales* (aquellas que se descargan en el cuerpo receptor a través de un efluente) la eliminación del vertido o la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales con remoción biológica de nutrientes son buenas alternativas para el control del aporte externo. El control y eliminación de nutrientes descargados por fuente puntual normalmente es necesaria debido al vertido de aguas receptoras confinadas, en los que se pueda crear o acelerar los procesos de eutroficación, vertidos a cuerpos de agua en los que la nitrificación pueda limitar los recursos de oxígeno o en los que puedan proliferar el arraigamiento de plantas acuáticas. Los principales nutrientes contenidos en las aguas residuales son N y P, y su eliminación puede llevarse a cabo por procesos químicos, biológicos, o una combinación de ambas (Mazzeo *et al.*, 2001).

b) Para las *fuentes difusas* (aquellas que provienen de múltiples sectores de la cuenca y se transportan por la lluvia, generando escurrimientos y el viento) su manejo es más difícil de resolver, en estos casos es necesaria una planificación del uso del suelo, mediante mejoras en los métodos de riego, control del uso de fertilizantes, prohibir o establecer límites bajos de fosfatos en detergentes, reforestar para prevenir la erosión del suelo y control del tipo de alimento en el sector pecuario (Mazzeo *et al.*, 2001).

Las cuencas hidrológicas con cobertura vegetal presentan mecanismos para retener nutrientes para su propio uso. La eliminación o transformación de la vegetación natural en una cuenca produce la destrucción de los mecanismos de conservación de nutrientes. La conservación o creación de zonas o interfases de amortiguación, como humedales, entre las cuencas hidrológicas y la descarga final de los influentes pueden evitar la entrada difusa de nutrientes (FAO, 1997).

Los procesos hidrológicos fundamentales que relacionan las precipitaciones, la escorrentía y la lixiviación, y que dan lugar a la erosión y transporte de partículas de suelo químicamente enriquecidas son componentes importantes de los ciclos biogeoquímicos de nutrientes, el transporte y el destino de los productos químicos aplicados a los suelos, esto es, las fuentes difusas de contaminación. Un método para disminuir la carga de contaminantes producida por estas fuentes independientemente del tipo y uso de suelo es la prevención de la erosión (FAO, 1997).

La erosión del suelo ocurre de manera natural, pero las actividades humanas, particularmente la agricultura y deforestación, han incrementado los niveles de erosión al tender a remover la vegetación protectora y reducir la estabilidad del suelo. Algunas medidas preventivas de la erosión del suelo son las siguientes (FAO, 1997):

- Labrar el suelo según las curvas de nivel, nunca en la dirección de la pendiente mayor.

- Mantener el suelo cubierto de vegetación, la cual fija el suelo y evita el impacto de la lluvia.
- Reducir el laboreo y evitar especialmente aquellas labores que dejan el suelo muy disgregado.

Los métodos para el control de la carga interna involucran principalmente la remoción directa del sedimento, o el aislamiento físico o químico del mismo de forma de limitar el intercambio de nutrientes entre el sedimento y la columna de agua. Otros métodos pueden ser mediante el manejo del volumen de las entradas de agua, es decir, variación del tiempo de residencia hidráulica, suministro de oxígeno y, la precipitación química y hasta emplear técnicas de remoción directa manual o mecánica o utilizando técnicas de control biológico para el caso de plantas acuáticas (Mazzeo *et al.*, 2001). Sin embargo, el objetivo es la disminución de la carga externa y estos métodos no fueron analizados en esta tesis.

2.6. Antecedentes de la zona de estudio

En este apartado se presenta la descripción general de la zona de estudio, incluyendo las características físicas e hidrológicas de la cuenca de la presa Valle de Bravo, así como los estudios del estado trófico del embalse.

2.6.1. Descripción del área de estudio

La cuenca de la presa Valle de Bravo cuenta con una superficie de 61 548.47 ha y se encuentra en la parte occidental del Estado de México (Figura 6). La presa Valle de Bravo tiene una superficie de 1 855 ha, una profundidad media de 21.1 m y máxima de 38.6 m cerca de la cortina al Noroeste del embalse. La mayor longitud es de 5.3 km del extremo Noroeste hacia el Sureste. Se localiza en la orilla de la cabecera municipal de Valle Bravo, en los 19°21'30" de latitud Norte y 100°11'00" de longitud Oeste, a una altitud de 1 830 msnm (CCVB-A, 2008). Sus coordenadas geográficas son:

Estación	Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
Extremo Norte:	2,143 800N	19° 23´ 05” N
Extremo Sur:	2,111 300 N	19° 05´ 30” N
Extremo Oriente:	408 500 E	99° 52´ 00” O
Extremo Poniente:	374 100 E	100° 11´40” O

El embalse presenta aportaciones de siete tributarios: los ríos Amanalco, Molino y San Diego y los arroyos Yerbabuena, Las Flores, El Carrizal y Laderas. Se incluye además la subcuenca cerrada de San Simón (abarca un área de 8 958.28 ha). Forma parte de la Región Hidrológica río Balsas (RH 18) y de la cuenca del río Cutzamala 18G (CCVB-A, 2008).

La cuenca de la presa Valle de Bravo forma parte del Eje Neovolcánico Transversal la cual se caracteriza por una gran masa de rocas volcánicas de todos los tipos, acumulada en varios y sucesivos episodios volcánicos. La integran grandes sierras volcánicas, coladas lávicas, conos cineríticos dispersos o en enjambre y depósitos de arena y cenizas. Este sistema se divide en tres subprovincias: la de Mil Cumbres, la de Llanos y la de Sierra de Querétaro e Hidalgo (CCVB-A, 2008). En la cuenca dominan los suelos de origen volcánico ya que 74% de la superficie total de la cuenca está cubierta por cenizas volcánicas (Andosoles).

Dada la ubicación de la cuenca se presentan importantes desniveles altitudinales, que van desde los 1 100 metros sobre el nivel medio del mar hasta los 3 730 metros sobre el nivel medio del mar, lo que representa 2 630 metros de diferencia, integrando un relieve abrupto con pequeñas áreas de planicie, presentándose en la mayor parte de la cuenca, cerros, mesas y laderas abruptas.



Figura 6. Ubicación de la cuenca de la presa Valle de Bravo

La ubicación altitudinal define el clima para toda la cuenca (POETVB, 2003):

- a) Semicálido en la parte baja, debajo de la cota 2 200 msnm.
- b) Templado-subhúmedo en la parte central de la cuenca, entre 2 200 a 3 000 msnm.
- c) Semifrío-subhúmedo en la parte más alta, arriba de los 3 200 msnm (oriente de la cuenca).

Características físicas e hidrológicas de la cuenca de la presa Valle de Bravo

- a) Pendiente media de la cuenca:

La pendiente media de una cuenca tiene una importante relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo de los cauces. Asimismo, ejerce influencia sobre la velocidad del escurrimiento y la magnitud de las avenidas. En términos generales, la cuenca de la presa Valle de Bravo tiene una pendiente media de 16%, ésta corresponde a una zona de terrenos accidentados (67% de la superficie total de la cuenca de la presa Valle de Bravo). Sin embargo, en algunas áreas existen condiciones particulares (Campos Aranda, 1992). En la Tabla 3 se muestran las pendientes medias presentes en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 3. Pendiente media de la cuenca de la presa Valle de Bravo

Pendiente		Superficie de	%
		la cuenca (km ²)	
S	Suave (0 a 10 %)	110.17	17.9
Am	Accidentado medio (11 a 15%)	71.40	11.6
A	Accidentado (16 a 25 %)	413.61	67.2
FA	Fuertemente accidentado (26 a 50%)	17.85	2.9
E	Escarpado (+ 50%)	2.46	0.4
Cuenca		615.48	100

Fuente: Modificado de POETVB, 2003

En la Tabla 4 se muestran las pendientes medias para las diferentes subcuencas que conforman la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 4. Pendiente media en las subcuencas de la cuenca de la presa Valle de Bravo

Subcuenca	Pm	
	%	
Lago (área inundada de la presa Valle de Bravo)		S
Río Amanalco	16.4	A
Río Molino	17.2	A
Río San Diego	18.2	A
Arroyo El Carrizal	19.1	A
Arroyo Yerbabuena	10.7	Am
Arroyo Las Flores	16.8	A
Laderas	32.6	FA
Cuenca Cerrada San Simón	6.5	S

S = suave, Am = accidentado medio, A = accidentado, FA = fuertemente accidentado Fuente: Modificado de POETVB, 2003

b) Densidad de drenaje

Es un indicador importante del grado de respuesta que tiene una cuenca a las precipitaciones. Generalmente la densidad de drenaje (D_d , ecuación 7) adquiere valores entre 0.5 y 3.5 km/km², la primera para cuencas con drenaje pobre y la segunda en cuencas bien drenadas. Es común encontrar bajas densidades de drenaje en zonas donde predominan rocas y suelos resistentes a la erosión, suelos muy permeables o con vegetación densa. Situación contraria se presenta en áreas con rocas y suelo débiles susceptibles a la erosión, suelos impermeables y vegetación escasa. La cuenca de la presa Valle de Bravo tiene una D_d promedio de 1.5 km/km², con lo que se califica como de D_d media (POETVB, 2003).

$$D_d = \frac{L_s}{A} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

L_s = longitud total de las corrientes
 A = área de la cuenca

c) Escurrimiento superficial en una cuenca

Durante una tormenta, la precipitación cae sobre el terreno en cantidades que varían notablemente en magnitud e intensidad. La parte de la precipitación que no es interceptada por la vegetación, al llegar al suelo se infiltra o comienza a escurrir. La lluvia que se infiltra es una pérdida de escurrimiento, aunque después puede aparecer como descarga o drenaje de los suelos. El flujo sobre el terreno

llega a corrientes superficiales y éstos posteriormente forman los cauces principales los cuales finalmente definen el colector principal de la cuenca hidrológica. El escurrimiento superficial sin control en una cuenca hidrológica constituye un problema ambiental crítico, favorece la erosión hídrica del suelo, la carga de sedimentos, y otros contaminantes en el agua (Campos Aranda, 2010).

2.6.2. Estudios de calidad de agua en la presa Valle de Bravo

Desde hace dos décadas se han realizado diversos estudios de la calidad del agua y del estado trófico de la presa Valle de Bravo. En la Tabla 5 se han resumido estos resultados así como los análisis de las cargas externas de la cuenca hidrológica e internas de los sedimentos, de nitrógeno y fósforo.

De acuerdo a los estudios realizados (Olvera, 1992, Olvera *et al.*, 1993; Merino *et al.*, 2007; CNA/Acuagranjas, 2009; Conagua-IMTA, 2009 y 2010), la calidad del agua en la presa se encuentra afectada principalmente por problemas de eutroficación, presentándose concentraciones de P-PO₄, N-NO₃, N-NH₄ y N_T superiores a los establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA) (DOF, 1989). Asimismo, los estudios realizados clasifican la presa entre estado eutrófico e hipereutrófico.

Las cargas internas de nutrientes obtenidas en los diferentes estudios se presentan en la Tabla 5. Estos fueron obtenidos por diferentes métodos, incluyendo estimaciones por balance de masa empleando concentraciones medidas en campo (IMTA, 2007; Ramírez Zierold *et al.*, 2010) y estimaciones por variaciones en potencial redox en sedimentos (Conagua-IMTA, 2010), validando con balance de masa empleando concentraciones medidas en campo y extracción secuencial para determinar fracciones de P lixiviables en los sedimentos. Se observan amplias variaciones en los resultados obtenidos que en el caso de P varía entre 394.56 t/año (IMTA, 2007) y -102.3 t/año (es decir los sedimentos acumulan más nutrientes de los que se liberan, Ramírez-Zierold *et al.*, 2010). Este último valor difiere de los resultados obtenidos por un estudiante del mismo grupo

de trabajo (Carnero-Bravo, 2008) ya que a partir de sus resultados se puede calcular una acumulación en sedimentos de 53.1 t/año.

Las cargas externas de nutrientes varían entre 9.59 y 120.8 t/año en caso del P y entre 194.1 y 591.8 t/año en caso de N. Los valores más altos son los reportados por Ramírez-Zierold *et al.* (2010). En este trabajo se observan mediciones de P de aproximadamente 80% mayores a los reportados en los demás trabajos. Dado las diferencias en carga externa reportada en la literatura (Tabla 5), en este trabajo se propone analizar estas diferencias y estudiar la carga externa por un método indirecto para comparar con los resultados de medición directa.

La Comisión Nacional del Agua ha realizado diversas actividades para disminuir la carga externa de nutrientes en la cuenca hidrológica. Estas acciones incluyen la construcción de colectores y emisores para la recolección y disposición final de agua residual, ampliación de la planta de tratamiento de agua residual doméstica en la cabecera municipal de Valle de Bravo e instalación de baños secos (ecotécnicas), estabilización de la cuenca media para evitar la erosión hídrica y el crecimiento del uso de suelo agrícola; así como métodos directos en el embalse para el control integral de malezas acuáticas (Conagua-IMTA, 2005).

Tabla 5. Estudios de calidad del agua realizados en Valle de Bravo.

Autores	Volumen en la presa (Mm ³)	Calidad del agua	Estado trófico	Metodología	Carga interna (t/año)	Carga externa (t/año)	Comentarios
Olvera (1992) y Olvera <i>et al.</i> (1993)	295-393	DQO, P-PO ₄ , NO ₃ y SO ₄ > CECA (vida acuática) P-PO ₄ > CECA (fuente de abastecimiento)	Eutrófico - hipereutrófico	CE Estimación directa por monitoreo en los ríos Amanalco, González y Molino (ciclo anual 1992-1993)	-	P 48.3 N 372.52	-
CNA/IDECA (1999)	-	-	-	-	-	P 45.1 N 194.1	Población en la cuenca de ~35 000 hab.
IMTA (2007)	328	-	Eutrófico	CI Estimación por balance mensual de fósforo basado en CNA/IDECA (1999)	P 394.56	-	-
Merino <i>et al.</i> (2007)	264-346	-	Eutrófico	-	-	-	-
Carnero-Bravo (2008)	261	-	Eutrófico	-	-	-	Estudió la evolución de calidad del agua mediante núcleos de sedimentos. La acumulación de P fue de 53.1 t/año
Nandini <i>et al.</i> (2008)	290-395	-	Eutrófico	-	-	-	-
Jiménez <i>et al.</i> (2008)	218-346	-	Eutrófico	-	-	-	-
Conagua/Acuagranjas (2009)	199-381	pH, turbiedad, DQO, Al, N _T y coliformes fecales > CECA (vida acuática y fuente de abastecimiento)	Eutrófico - hipereutrófico	CE Estimación directa por monitoreo en los ríos Amanalco, González y Molino (segundo semestre de los años 2002-2009)	-	P 9.59 N 531.91	-
Conagua-IMTA (2009)	199	OD < CECA y N-NH ₄ > CECA (vida acuática)	Eutrófico - hipereutrófico	-	-	-	-

Autores	Volumen en la presa (Mm ³)	Calidad del agua	Estado trófico	Metodología	Carga interna (t/año)	Carga externa (t/año)	Comentarios
		pH, Mn, P-PO ₄ > CECA (fuente de abastecimiento)					
Ramírez-Zierold <i>et al.</i> (2010)	290-380	-	Eutrófico	CE Estimación directa por monitoreo en los ríos Amanalco, González, Molino, arroyos Las Flores y Tizates (ciclo anual de 2002-2005) CI Balance de fósforo durante el periodo de 2002-2005	P -102.3 N -258.4	P 120.8 N 591.8	Concentraciones de P ~ 80% mayores a las reportadas en los demás trabajos. Acumulación en sedimentos (CI negativa) no coincide con lo reportado por Carnero-Bravo (2008)
Conagua-IMTA (2010)	309-395	Disminuye durante el verano por la estratificación	Eutrófico - hipereutrófico	CI Analizando variaciones de Eh en sedimentos y validando con estimación por balance mensual de fósforo (2010)	P 7.8 N 87.1	-	-

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se establece la metodología utilizada para la estimación de la carga de contaminantes de N y P en la cuenca de la presa Valle de Bravo por medio de una *estimación indirecta por modelación*, por fuente de contaminación y por subcuenca. Para ello se realizan determinaciones de la descarga de agua, de concentraciones de contaminantes por fuente de contaminación y de la carga de nutrientes en toda la cuenca.

Para contribuir a la identificación de cargas externas de N_T , P_T , SST y materia orgánica degradable, expresada como DBO a la presa Valle de Bravo, se elaboró un inventario de descargas por fuentes puntuales y difusas el cual se construyó con información oficial disponible en Internet y estudios realizados anteriormente en la zona de estudio.

3.1. Delimitación de la zona de estudio

La cuenca de la presa Valle de Bravo está integrada por ocho subcuencas, que abarcan extensiones territoriales de ocho municipios del Estado de México. Cubre en su totalidad el municipio de Amanalco, la mayor parte del municipio de Valle de Bravo y parte de los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria, Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec (Figura 7).

Esta delimitación se realizó bajo un ambiente SIG (Sistema de Información Geográfica), lo que permitió paralelamente la generación de una tabla de atributos correspondientes a cada subcuenca. Para el análisis de la carga externa se tomaron en cuenta las subcuencas que drenan al embalse excepto la subcuenca Cerrada de San Simón. En la Tabla 6 se presentan las áreas de aportación correspondientes.

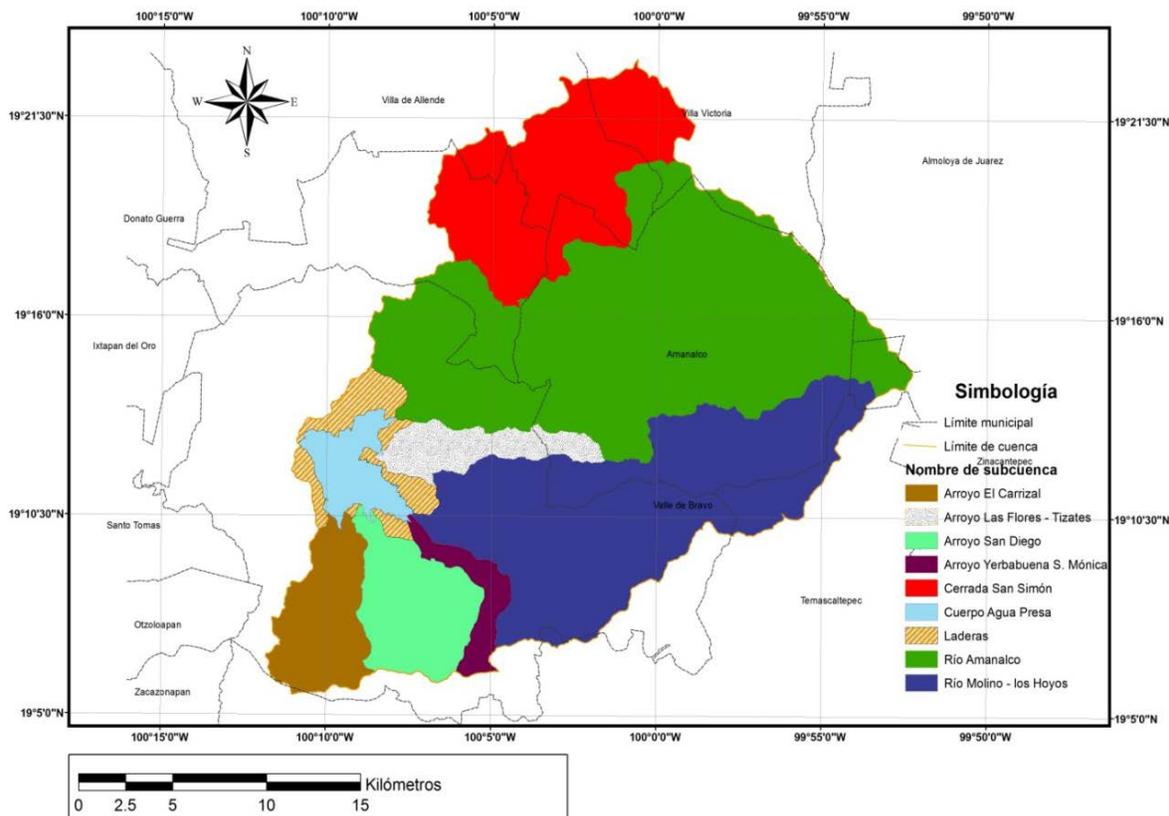


Figura 7. Subcuencas y municipios que abarca la cuenca de la presa Valle de Bravo
(Modificado de IMTA, 2005)

Tabla 6. Áreas de aportación en la cuenca de la presa Valle de Bravo

Subcuenca	Área de aportación		
	(m ²)	(ha)	(%)
Arroyo El Carrizal	33 509 444.40	3 350.94	5.44
Arroyo Las Flores-Tizates	20 752 248.00	2 075.22	3.37
Río San Diego	37 509 897.80	3 750.99	6.09
Arroyo Yerbabuena-Sta Mónica	12 542 816.30	1 254.28	2.04
Cerrada de San Simón	90 440 294.00	9 044.03	14.69
Cuerpo de agua	17 869 293.20	1 786.93	2.90
Las Laderas	19 002 628.60	1 900.26	3.09
Río Amanalco	232 357 107.00	23 235.71	37.75
Río Molino-Los Hoyos	151 501 127.00	15 150.11	24.61
Total	615 484 857.00	61 548.49	100

3.2. Inventario de fuentes puntuales de nutrientes

3.2.1. Fuentes puntuales de nutrientes

El inventario de descargas por fuentes puntuales se realizó considerando la siguiente clasificación.

- Descargas de agua residual municipal sin tratamiento y

- Descargas de plantas de tratamiento de agua residual municipal

Descargas de agua residual municipal sin tratamiento

En este apartado se consideró 20% y 15% del agua residual generada en Amanalco y Valle de Bravo respectivamente y 100% de la generada en las demás localidades en la cuenca con base en las coberturas de tratamiento de agua residual (Conagua, 2008). Se identificaron las localidades, analizando información de INEGI (2006) en un SIG, identificándose un total de 82 localidades (Figura 8), las cuales pertenecen a cinco de los ocho municipios que conforman la zona de estudio (Amanalco, Donato Guerra, Valle de Bravo, Villa de Allende y Villa Victoria).

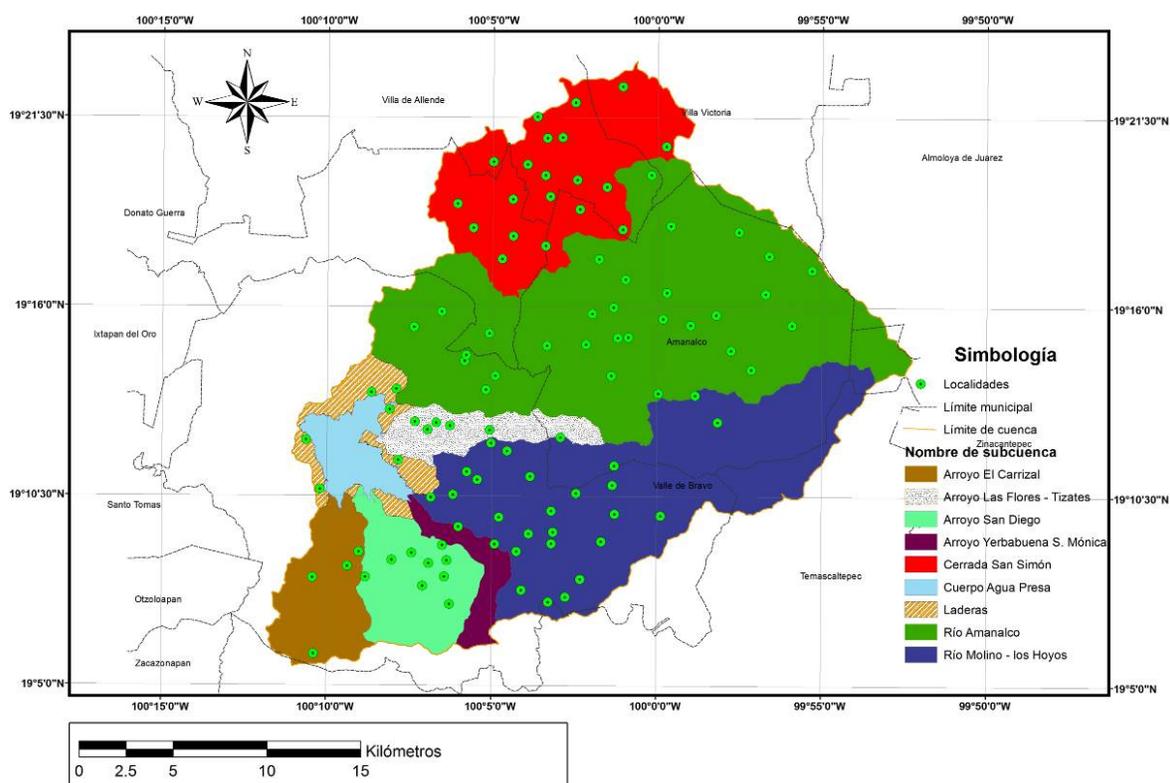


Figura 8. Ubicación de localidades en la cuenca de la presa VB.

Una vez identificadas las localidades, se analizaron las proyecciones de población para el año 2010 realizadas por el Consejo Nacional de Población (Conapo, 2006), resultando en una población total de 81 832 habitantes en toda la cuenca. El número de localidades y la población por subcuenca se muestran en la Tabla 7 y

en el Anexo II se presenta el número de habitantes por localidad, municipio y subcuenca en la toda la cuenca.

Tabla 7. Inventario de localidades en la cuenca de la presa Valle de Bravo

Subcuenca	Número de Localidades	Población 2010 (habitantes) ¹
Río Amanalco	31	26 013
Río Molino	25	6 818
Río San Diego	9	1840
Arroyo El Carrizal	4	70
Arroyo Yerbabuena	2	554
Arroyo Las Flores	5	1 937
Las Laderas	6	44 600
Total	82	81 832

Fuente: Conapo (2006)

Descargas de plantas de tratamiento de agua residual municipal

Para la elaboración del inventario por este tipo de fuente se recopiló información de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) municipales en operación actualmente dentro de la cuenca de la presa Valle de Bravo. En su inventario, la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2008) reporta las plantas de tratamiento de Valle de Bravo y Amanalco (Tabla 8).

Tabla 8. PTAR's en operación en la cuenca de la presa VB

Municipio	Localidad	Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Gasto de operación (l/s)	Cuerpo receptor
Valle de Bravo	Valle de Bravo	Los Arcos	Lodos activados	100	41.19	Río Tilostoc
Amanalco	Amanalco	Amanalco	Lodos activados	18	7.5	Río Amanalco

Fuente: Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación Conagua, 2008

Para diferenciar los volúmenes de agua residual y agua pluvial, se analizaron los registros del organismo operador (Ing. Patricia Flores, comunicación personal). La PTAR-Valle de Bravo descarga en el río Tilostoc aguas abajo de la cortina del embalse (Conagua, 2008) por lo que no se incluyó esta descarga en la estimación de la carga externa de fósforo. Las descargas de la PTAR-Amanalco fueron incluidas en su totalidad en el inventario de fuentes puntuales.

3.2.2. Concentraciones de contaminantes

Concentraciones de contaminantes del agua residual sin tratamiento

Para determinar las cargas de los diferentes contaminantes contenidos en el agua residual, se utilizó la información de las concentraciones típicas presentes en el agua residual mostrada en la columna de Influyente de la Tabla 9.

Concentraciones de contaminantes del agua residual tratada

La composición de los efluentes de las plantas de tratamiento, se estimó en base al tipo de proceso y al porcentaje de remoción de los contaminantes (columna de Efluente de la Tabla 9).

Tabla 9. Composición de influentes y efluentes de las PTAR's en operación

Parámetro	Unidad	Influente*	Efluente	Remoción
				(%)
DBO	mg/l	200	10	¹ 95%
SST	mg/l	200	20	¹ 90%
N _T	mg/l	40	28	² 30%
P _T	mg/l	10	8.2	¹ 18%

*Composición típica del agua residual doméstica (FAO, 2002)

¹Metcalf y Eddy, 2003 ; ²Choi *et al.*, 2004

Se realizaron muestreos de agua residual en la entrada y después de los procesos de sedimentación y cloración en la PTAR-Valle de Bravo, para comparar con las concentraciones de N_T y P_T mostradas anteriormente. Las metodologías del muestreo y análisis químicos se presentan en el Anexo III junto con los resultados. Se obtuvieron concentraciones de nutrientes inferiores a las reportadas en la literatura (Anexo III y Tabla 9). Los muestreos realizados en época de lluvia arrojaron concentraciones bajas por dilución con escurrimientos urbanos y en época de estiaje, las concentraciones fueron más elevadas aunque aproximadamente sólo representaron 28[±]1% de los valores reportados en la literatura (Tabla 9).

3.2.3. Volumen de descarga

El volumen de descarga de agua residual municipal sin tratamiento aportada por las localidades que forman parte de la cuenca se estimó de manera mensual y

anual con base en el número de habitantes por localidad (Conapo, 2006), dotación promedio estatal de agua potable por habitante del estado de México, cuyo valor es de 236 L/hab/d (CAEM, 2008), porcentaje de generación de agua residual (Conagua, 2007) y al porcentaje de cobertura de agua potable y alcantarillado municipal (INEGI, 2007).

El volumen de descarga por las plantas de tratamiento de agua residual municipal en operación es el generado por la PTAR-Amanalco, el cual se estimó de acuerdo al gasto de operación de 7.5 L/s de manera mensual y anual. En la Tabla 10 se presenta el volumen de agua residual sin tratamiento por subcuenca y el generado por la PTAR-Amanalco.

Tabla 10. Volumen de descarga de agua residual sin tratamiento y de PTAR Amanalco

Subcuenca	Municipio	Población 2010	Coberturas de servicios		Volumen de agua residual generada
		(hab)	Agua potable	Alcantarillado sanitario	(m ³ /año)
<i>Volumen de descarga de agua residual sin tratamiento</i>					
Río Amanalco	Amanalco	18 617	81.50%	53.50%	287 908.22
	Donato Guerra	4 168	72.60%	45.60%	89 136.31
	Valle de Bravo	2 478	91.30%	82.50%	120 575.83
	Villa de Allende	751	69.10%	34.10%	11 431.82
	Subtotal	26 013			509 052.18
Río Molino	Valle de Bravo	6 154	91.30%	82.50%	299 448.37
	Amanalco	664	81.50%	53.50%	18 704.25
	Subtotal	6 818			318 152.62
Río San Diego	Valle de Bravo	1 840	91.30%	82.50%	89 532.23
	Subtotal	1 840			89 532.23
Arroyo El Carrizal	Valle de Bravo	70	91.30%	82.50%	3 406.64
	Subtotal	70			3 406.64
A. Yerbabuena	Valle de Bravo	554	91.30%	82.50%	26 965.23
	Subtotal	554			26 965.23
Arroyo Las Flores	Valle de Bravo	1 937	91.30%	82.50%	94 282.33
	Subtotal	1 937			94 282.33
Laderas	Valle de Bravo	44 600	91.30%	82.50%	66 268.62
	Subtotal	44 600			66 268.62
<i>Volumen de descarga de PTAR</i>					
Río Amanalco	Amanalco		81.50%	53.50%	236 520
	Subtotal				236 520
	Total	81 833			1,344 179.86

3.3. Inventario de fuentes difusas de nutrientes

El inventario de fuentes difusas de nutrientes al igual que para las puntuales se realizó con información oficial y estudios realizados anteriormente en la zona de estudio. Esta información se agrupó por subcuenca y tipo de fuente de contaminación.

3.3.1. Fuentes difusas de nutrientes

El inventario de descargas por fuentes difusas se realizó considerando la siguiente clasificación:

- Descargas del sector pecuario
- Descargas del sector trutícola (trucha arcoiris) y
- Descargas de escurrimientos de suelos con diferentes usos

Descargas del sector pecuario

Para la elaboración del inventario debido a este tipo de fuente se analizó la base de datos publicada en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP-SAGARPA del Estado de México, 2008); de ella se obtuvo la producción porcina anual de los municipios pertenecientes a la cuenca de la presa Valle de Bravo (Tabla 11).

Tabla 11. Producción porcina en la cuenca de la presa Valle de Bravo

Municipio	Ganado en pie (porcino)	
	Producción	Peso promedio por cabeza
	(t)	(kg)
Amanalco	79.309	88.219
Valle de Bravo	130.933	94.536

Fuente: SIAP-SAGARPA, 2008

Se consideró que existe un equilibrio entre los nutrientes removidos por el pastoreo del ganado bovino y los devueltos por estiércol, que controla el escurrimiento adicional de nutrientes y la consecuente contaminación de los cuerpos de agua (Bellows, 2001). Por ello, para este tipo de ganado, únicamente se consideró la contaminación provocada por el escurrimiento de pastizales.

Descargas del sector trutícola

Acuagranjas (2004), a través de la Conagua menciona que existe un total de 111 granjas trutícolas, distribuidas por subcuenca de la siguiente manera: río Amanalco (69), río Molino (27), río San Diego (5), Las Laderas (9) y Arroyo Yerbabuena (1) donde la producción de trucha arcoiris en toda la cuenca es de 485.05 t/año. En la Figura 9 se muestra la ubicación de las granjas trutícolas en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

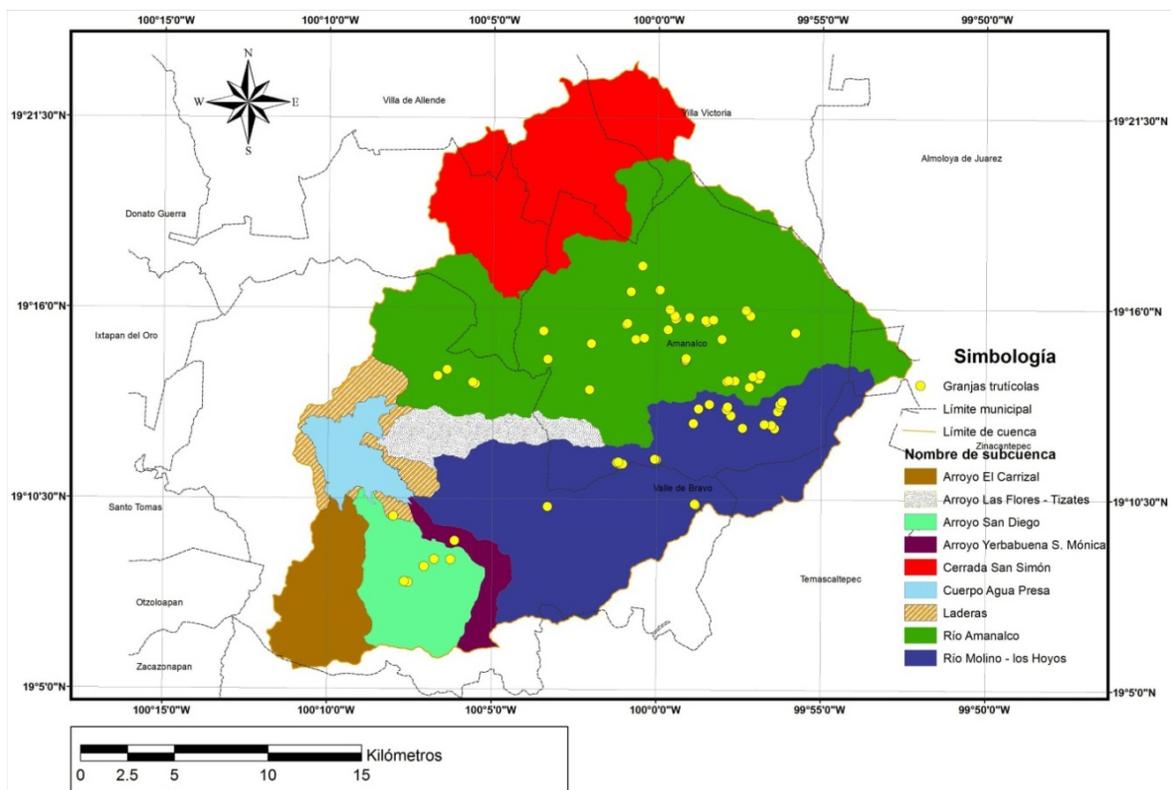


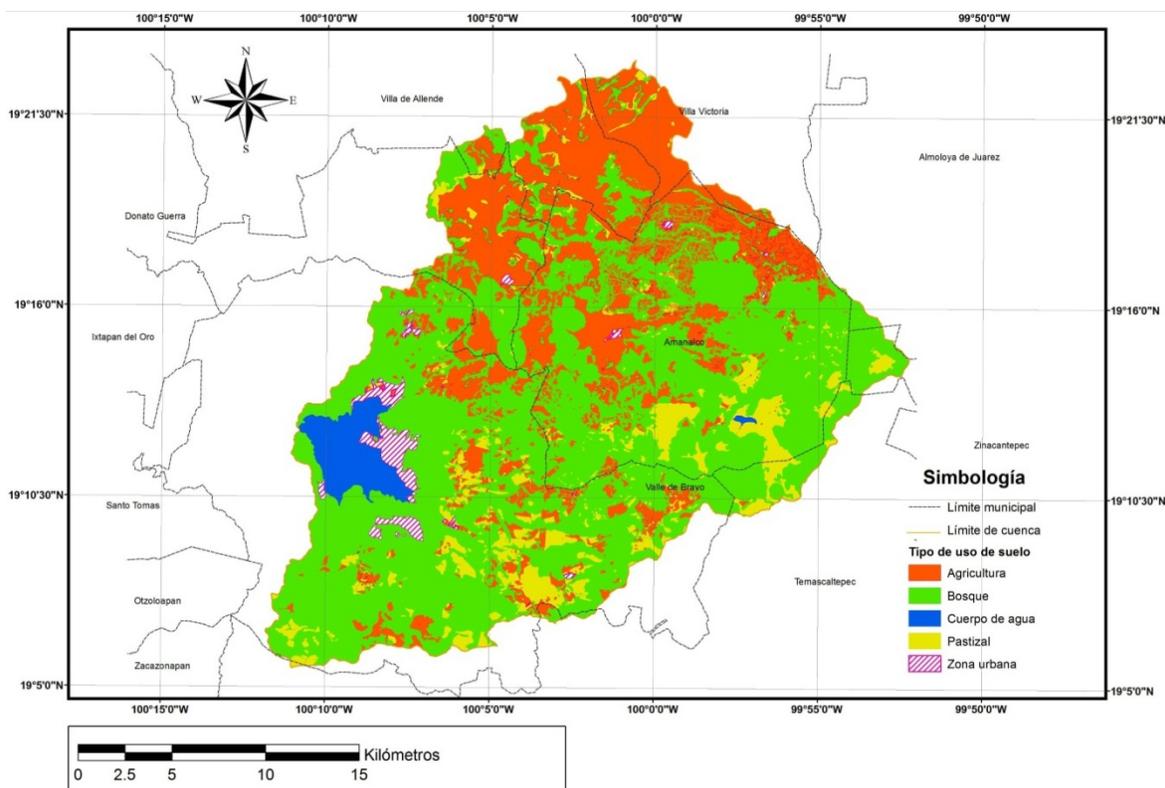
Figura 9.Ubicación de granjas trutícolas en la cuenca de la presa VB

Descargas de escurrimientos de suelos con diferentes usos

Para la elaboración del inventario debido a las descargas de escurrimientos de suelos con diferentes usos, se utilizó un SIG para su delimitación y la carta de usode suelo de INEGI modificada (IMTA, 2005). Esta información fue empleada para la determinación de coberturas vegetales para cada subcuenca (Figura 10). La distribución del uso de suelo por subcuencas se describe en la Tabla 12, en donde podemos observar que las superficies de bosque y agrícolas son los principales coberturas de suelo en la cuenca.

Tabla 12. Uso de suelo por subcuenca en la cuenca de la presa Valle de Bravo (m²)

Subcuenca	Agricultura	Bosque	Cuerpo de agua	Pastizal	Zona urbana
Arroyo El Carrizal	997 488	29,873 519	2 394	2,616 510	19 533
Arroyo Las Flores	1,801 411	15,946 793	1 259	805 341	2,197 444
Río San Diego	3,863 567	28,973 460	7 722	3,045 413	1,619 736
Arroyo Yerbabuena	675 781	9,099 149	3 730	2,378 851	385 306
Las Laderas	20 363	14,208 323	72 221	158 332	4,358 390
Río Amanalco	89,705 128	135,045 217	0	6,223 227	1,383 536
Río Molino	18,778 971	99,423 360	380 771	32,534 076	383 949
Total	115,842 709	332,569 821	18,337 390	47,761 750	10,347 894

**Figura 10.** Uso de suelo en la cuenca de la presa Valle de Bravo

3.3.2. Concentraciones de contaminantes

En la Tabla 13 se muestran los parámetros considerados para determinar la aportación de contaminantes por estiércol de porcino con referencia a la producción y al peso promedio del animal. Para estimar la carga de contaminantes en toneladas por año se consideraron los parámetros obtenidos del Consejo Mexicano de Porcicultura que se obtienen por kg/UPA/d, siendo una unidad de producción animal (1 UPA = 100 kg de peso vivo) que genera 0.05 kg/UPA*d de nitrógeno total Kjeldahl (Taiganides *et al.*, 1996).

Tabla 13. Concentración de contaminantes por ganado porcino

Parámetro		(kg/UPA*d)
SST	Sólidos suspendidos totales	0.6
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno	0.25
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl	0.05
P _T	Fósforo total	0.013

Fuente: Taiganides *et al.*, 1996*Concentraciones de contaminantes del sector trutícola*

Los desechos de nutrientes y de materia orgánica, disueltos o en forma de partículas que proceden de alimentos no comidos y de excrementos de la trucha arcoiris, se caracterizan generalmente por un aumento en SST, DBO, N_T y P_T (FAO, 1994). La caracterización del efluente por producción de trucha arcoiris en la cuenca de Valle de Bravo fue realizada por Acuagranjas (2004) y los resultados promedio se muestran en la Tabla 14. En este informe no se reportan resultados de N_T.

Tabla 14. Concentración de contaminantes por trucha arcoiris

Producción de trucha arcoiris en la cuenca	SST	DBO	P _T
	(kg/t prod.)	(kg/t prod.)	(kg/t prod.)
500	1,066	338	21

Fuente: Acuagranjas, 2004.

Concentraciones de contaminantes del agua escurrida

Salas *et al.* (2001) señalan que los cuerpos de agua de Latinoamérica y el Caribe se encuentran en su mayor parte en climas del tipo cálido tropical. La definición se basa en que los cuerpos de agua presentan una temperatura mínima de 10°C durante condiciones normales y un promedio anual mínimo de 15°C. Dentro de esta definición, la cobertura geográfica se extiende desde el Lago Livingston en Texas, E.U.A., hasta el Salto Grande en Argentina. Por ello, en este estudio se utilizaron concentraciones típicas para DBO, N_T, P_T y SST en escurrimientos superficiales según el tipo de uso del suelo, obtenidos para una zona en Texas (Benaman *et al.*, 1996) con clima cálido tropical semejante a la cuenca Valle de Bravo y con similares usos de suelo. Las concentraciones de contaminantes para esta zona, que fueron aplicados para la cuenca de estudio, se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Concentración de contaminantes por uso de suelo (mg/L)

Uso del Suelo	DBO	N _T	P _T	SST
Urbano	9.00	2.10	0.37	166.00
Agrícola	4.00	1.56	0.36	201.00
Bosque	6.00	0.83	0.06	39.00
Pastizal	6.00	1.51	0.12	70.00

Fuente: Benaman *et al.*, 1996

3.3.3. Volúmenes de descarga

Para los sectores pecuario y trutícola, los volúmenes de descarga fueron estimados en base a la producción de ganado porcino y trucha arcoiris, mientras que los volúmenes de descarga por escurrimientos de suelos con diferentes usos se estimaron mediante el método indirecto de lluvia-escurrimiento. Este método requiere de información de la precipitación media mensual y anual en el área de la cuenca, el área de la subcuenca (área de drenaje) y el coeficiente de escurrimiento, obtenida mediante la siguiente expresión matemática:

$$V_e = (A)(P_m)(C_e) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

V_e	=	Volumen medio anual de escurrimiento (m ³ /mes)
A	=	Área de subcuenca (m ²).
P_m	=	Precipitación media mensual (m ³ /m ² *mes)
C_e	=	Coeficiente de escurrimiento

- Precipitación media mensual

La precipitación media mensual se estimó a partir de los datos de las estaciones climatológicas cercanas y dentro de la cuenca (Figura 11 y Tabla 16). Para ello se aplicó el método de las isoyetas. Este procedimiento consiste en obtener un promedio ponderado de las alturas de precipitación media, donde cada isoyeta representa una altura específica de lluvia de acuerdo a la estación climatológica correspondiente (Aparicio, 2009). Para ello se analizaron las 14 estaciones climatológicas para los periodos de 1961 a 2003 (años de operación de las estaciones), las cuales fueron ubicadas por coordenadas geográficas para el trazado de las isoyetas en un SIG. La información de cada estación climatológica fue obtenida del extractor rápido de información climatológica ERIC III (IMTA,

2007). En el Anexo IV se presenta la precipitación mensual registrada en las estaciones analizadas.

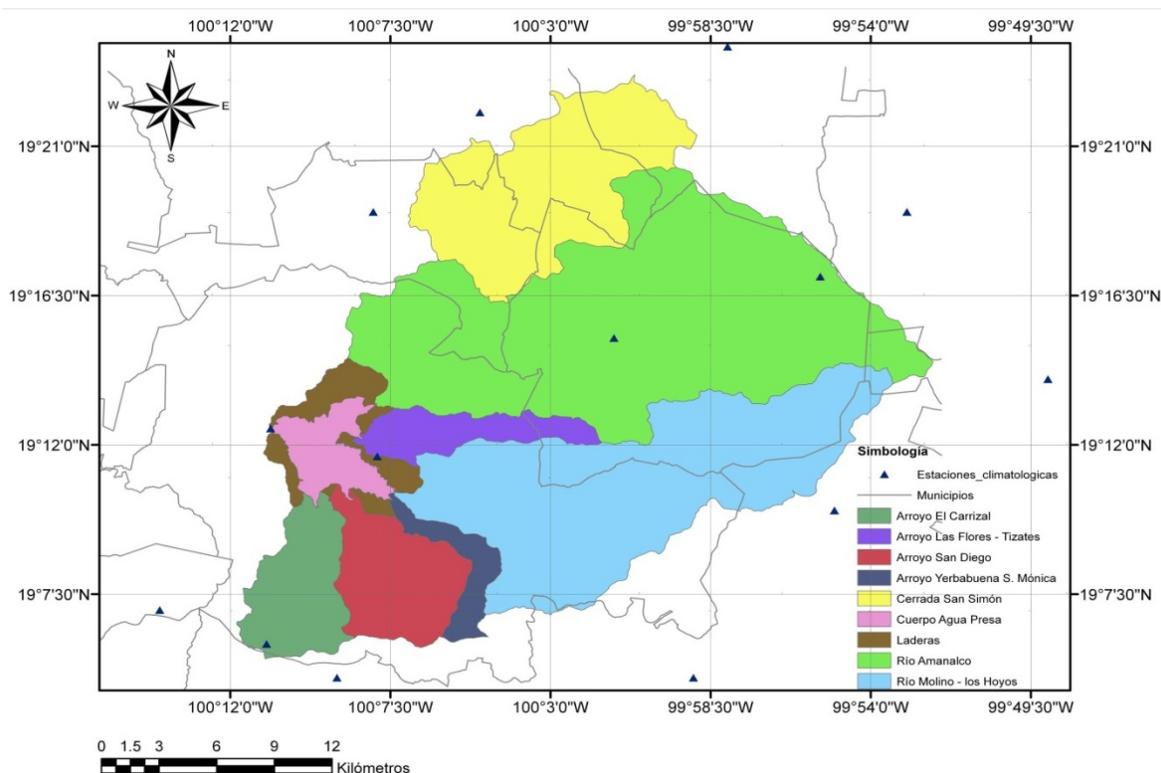


Figura 11. Ubicación de estaciones climatológicas en el área de estudio

Tabla 16. Estaciones climatológicas en el área de estudio

Clave	Estación climatológica	Longitud	Latitud	Altitud
15005	Amanalco de Becerra	-100.020	19.253	2 300
15046	Presa Colorines (CFE)	-100.183	19.100	1 680
15079	Puente Andaro	-099.983	19.083	2 370
15088	San Francisco Oxtotilpan	-099.917	19.167	2 635
15108	Santa María del Monte	-100.133	19.317	2 210
15130	Psa. Valle de Bravo, V.B	-100.117	19.200	1 869
15131	Villa de Allende, V.A.	-100.083	19.367	2 900
15160	Santiago del Monte	-099.967	19.400	2 680
15165	Valle de Bravo V. de B.	-100.117	19.217	2 242
15174	Palos Mancornados	-099.950	19.283	2 920
15201	Trojes, Santiago Temoaya	-100.233	19.117	1 200
15241	San Pedro Temayac	-100.150	19.083	1 730
15244	Muyteje, Acambay	-099.883	19.317	3 120
15276	San José del Contadero	-099.817	19.233	3 045

- Extrapolación de datos faltantes

Es frecuente que en un registro de precipitación falten los datos de un cierto periodo, debido a la ausencia del operador o fallas del aparato registrador. Para

estos casos, la estimación de los datos faltantes se realizó por métodos estadísticos basados en la precipitación media mensual y eliminando los años donde no se tenían completos los registros durante más de 6 meses.

El método estadístico consiste en realizar un promedio aritmético de los registros de precipitación en las estaciones circundantes (Aparicio, 2009). La extrapolación de los datos faltantes se realizó entre las estaciones más cercanas, en primer lugar ubicadas dentro de la cuenca del colector general y de preferencia sobre la misma corriente, siempre y cuando la precipitación fue del mismo orden de magnitud. Así por ejemplo, los datos faltantes en la estación Amanalco de Becerra (15005) fueron estimados con base en la estación Palos Mancornados (15174). En la estación Valle de Bravo V. de B. (15165) los datos faltantes se estimaron con base en los de la estación Psa. Valle de Bravo, V.B (15130). Cabe mencionar que aún existen datos faltantes (entre 1% a 5% de las 14 estaciones) que no se pudieron estimar por falta de información y con los criterios arriba mencionados. Sin embargo, con la información medida y extrapolada, se pudo analizar un valor medio de precipitación para construir las isoyetas para la cuenca de estudio, como se describe a continuación.

- Construcción de isoyetas en la cuenca de la presa Valle de Bravo

Paso 1. Preparación de capas

Se utilizaron los registros de precipitación media mensual, capturados en Excel y exportados a archivo dbf, creando otro archivo mxd en ArcView. Al espacio de trabajo se le asignó un sistema de coordenadas geográficas específico (wgs84, Figura 12).

Paso 2. Carga de puntos de estaciones climatológicas

Desde el menú Tools – Add XY data (Figura 13) se adicionan los datos de la tabla en Excel, que contiene clave de la estación, nombre de la estación climatológica, latitud, longitud y altitud, la precipitación total anual y la precipitación acumulada por mes de las 14 estaciones climatológicas.

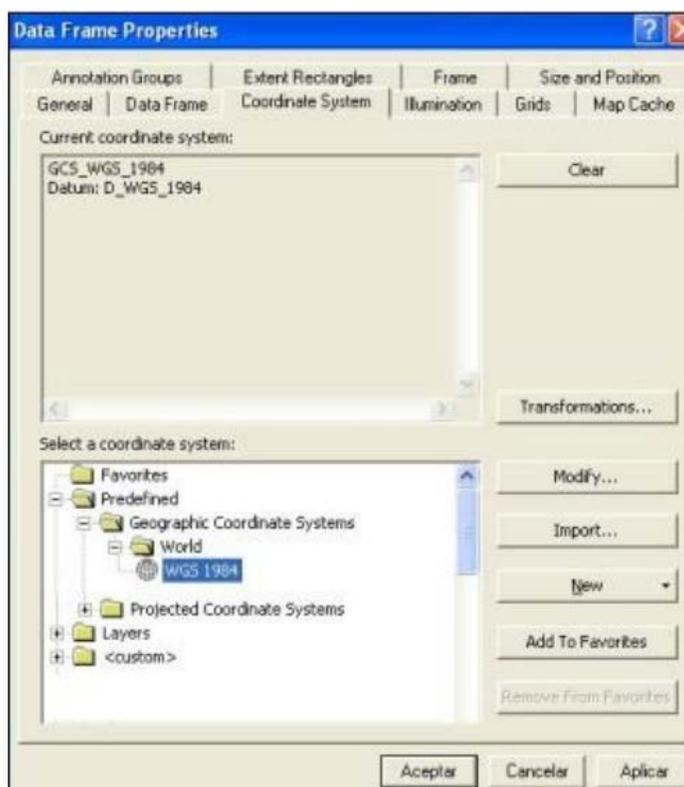


Figura 12. Pantalla para la asignación del sistema de coordenadas geográficas

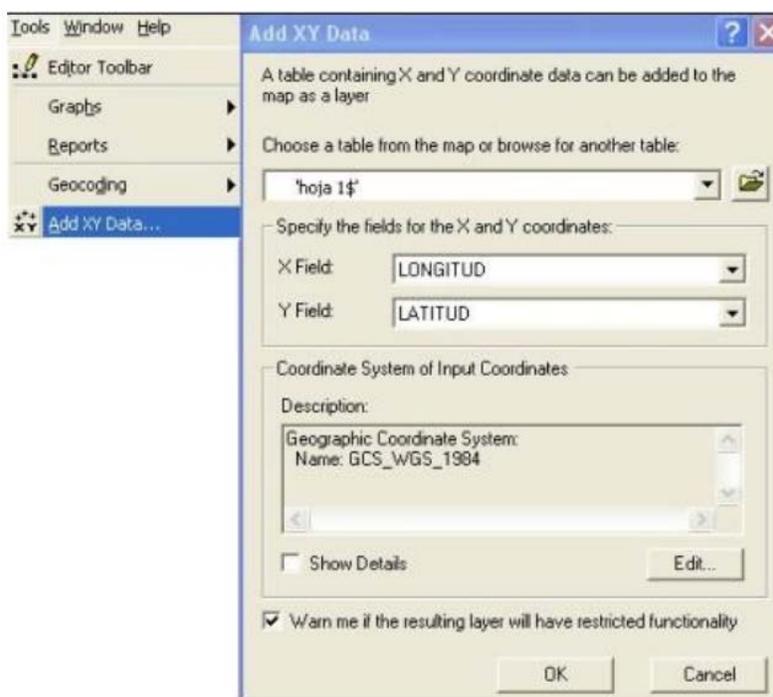


Figura 13. Pantalla de carga de puntos de estaciones climatológicas

Saldrán entonces las estaciones como una capa puntual de nombre estaciones climatológicas que se exportó como shape (Figura 14).

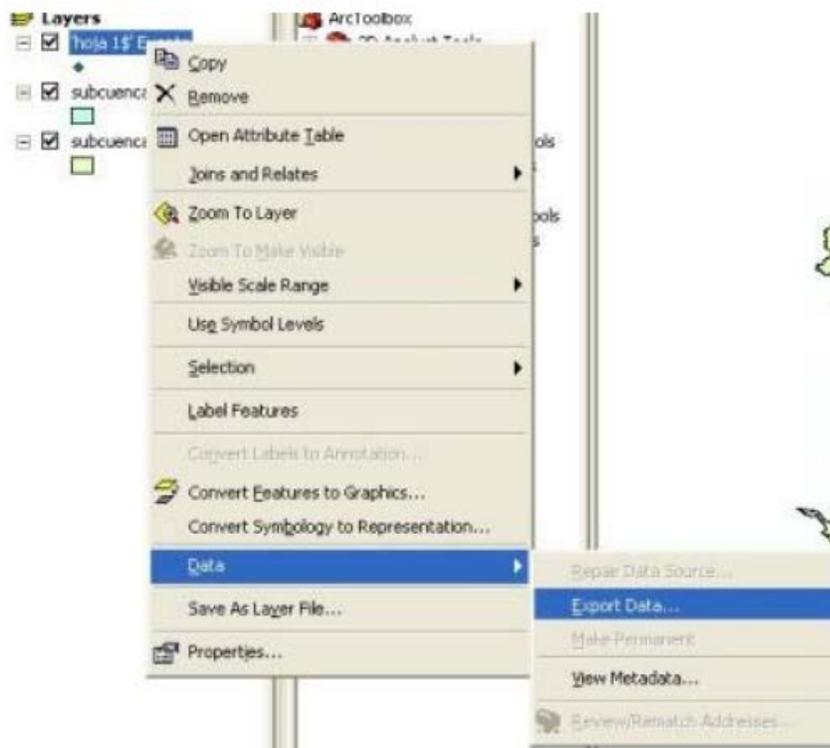


Figura 14. Pantalla de exportación como shape

Paso 3. Interpolación y generación de superficie de pluviometría.

Para trabajar con los modelos raster e interpolaciones, se cargó la extensión *Spatial Analyst* desde el menú Tools – Extensions (Figura 15).

Existen varios métodos de interpolación tales como *IDW*, *Spline*, *Kriging*, entre otros. En este caso, al tratarse de pluviometría, se recomienda usar el método *Spline* (ArcView 9.3). La herramienta se selecciona desde *toolbox – spatial analysis – interpolation- spline* (Figura 16). Aparece la pantalla (Figura 17) con información sobre precipitación mensual, el modelo raster, tamaño de la celda, método (aquí se seleccionó Regularizado, ya que genera un trazado más suave) y número de puntos que intervienen en la interpolación para obtener las superficies de precipitación.



Figura 15. Pantalla de carga de la extensión Spatial Analyst

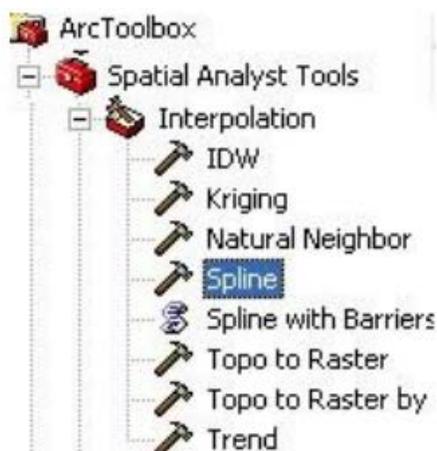


Figura 16. Pantalla de selección de método de interpolación



Figura 17. Pantalla con información para interpolación de datos de precipitación

Paso 4. Generación de Isoyetas y áreas de pluviometría

Una vez obtenida las superficies se procedió a construir las isolíneas de precipitación (Isoyetas) como líneas de contorno (*contours*).

Hay varias formas de realizar este paso por menú de herramientas o por toolbox. En este caso se usó la ruta *toolbox-spatial analysis-surface-contours*, indicando el modelo de superficie, el nombre del shape de salida, el intervalo (en este caso cada 5mm), la curva base (la más baja del modelo, en este caso 1 y 3mm, dependiendo del mes) y factor Z (=1, sin exageración vertical). A la capa de isoyetas se le agregaron las etiquetas (*labels*) con información de altura de precipitación, a partir de la columna *contour*.

- Áreas de pluviometría

Para obtener las áreas de pluviometría como polígonos, se reclasificó la superficie en *toolbox-spatial analysis-tools-reclass-reclassify*, donde aparecen los valores originales (*old values*) y los nuevos (*new values*). En *new value* se asignó el valor del rango inferior de la capa de isoyetas (por ejemplo 1-10 – *new value*: 1).

Este procedimiento se repitió para cada mes del año. Los mapas de las isoyetas por mes se muestran en el Anexo IV.

3.3.4. Determinación del coeficiente de escurrimiento

Dado que el coeficiente de escurrimiento no es constante, pues varía de acuerdo con la intensidad de precipitación y las condiciones de la cuenca, su valor aproximado es variable en el transcurso del año. Por ello, se calculó inicialmente la precipitación y el coeficiente medio anual.

La determinación del coeficiente de escurrimiento se realizó para cada subcuenca de acuerdo con el tipo de suelo, uso de suelo y pendiente, estimando la precipitación efectiva a partir de la total y de las características de la cuenca (Aparicio, 2009).

El Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU. propone el método de los números de escurrimiento, en donde la altura de lluvia total P se relaciona con la altura de lluvia efectiva Pe mediante las ecuaciones siguientes (Aparicio, 2009):

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad \text{Ec. 9}$$

$$Ce = \frac{Pe}{P} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- N = Número de escurrimiento (adimensional)
- Pe = Altura de precipitación efectiva (cm)
- P = Altura de precipitación de lluvia total (cm)
- Ce = Coeficiente de escurrimiento

El valor de N depende de las características de la cuenca (tipo de suelo, uso de suelo y pendiente de la subcuenca) (Tabla 17). Para tomar en cuenta las condiciones iniciales de humedad del suelo, se realizó una corrección al número

de escurrimiento, según la altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha en cuestión, P_5 , de la siguiente manera (Tabla 18):

- a) Si $P_5 < 2.5$ cm, se realizó corrección A
- b) Si $2.5 < P_5 < 5$ cm, no se realizó corrección
- c) Si $P_5 \geq 5$ cm, se realizó corrección B.

Tabla 17. Número de escurrimiento para diferentes tipos de suelos y uso de suelo

Uso de la Tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	-	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
	Contorneo	>1	63	74	82	85
	Contorneo	<1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
	Terrazas	<1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Contorneo	>1	64	75	83	85
	Contorneo	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizales	-	>1	68	79	86	89
	-	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
Pradera permanente	-	<1	30	58	71	78
Bosques naturales						
Muy ralo	-	-	56	75	86	91
Ralo	-	-	46	68	78	84
Normal	-	-	36	60	70	77
Espeso	-	-	26	52	62	69
Muy espeso	-	-	15	44	54	61
Caminos						
De terracería	-	-	72	82	87	89
Con superficie dura	-	-	74	84	90	92

A = Arenas con poco limo y arcilla, suelos muy permeables; B = Arenas finas y limos; C= Arenas muy finas, limos, suelo con alto contenido de arcilla; D= Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana, suelos muy impermeables (Aparicio, 2009).

Tabla 18. Correcciones del número de escurrimiento (N)

Número de escurrimiento (N)	N con corrección A	N con corrección B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Fuente: Aparicio, 2009

Los tipos de suelos en la cuenca de la presa Valle de Bravo, son de textura fina, aunque su contenido de arcilla no suele pasar del 20 a 25%, son pobres en arenas y en más de 50% dedicados al uso forestal (POETVB, 2003). Para la estimación del número de escurrimiento, N (Tabla 19) se ponderaron los usos de suelo por subcuenca, y se consideró 50% de suelos tipo A (Arenas con poco limo y arcilla, suelos muy permeables) y tipo B (Arenas finas y limos).

Tabla 19. Estimación del número N ponderado por grupo de suelo

Uso suelo	Grupo de suelo		N ponderado
	A (50%)	B (50%)	
Pastizal	68	79	73.5
Bosque	26	52	39.0
Agrícola	70	79	74.5
Urbano	74	84	79.0

De acuerdo al Número de escurrimiento (N) mostrado en la Tabla 20, a las expresiones de la altura de precipitación efectiva (Pe), coeficiente de escurrimiento (Ce) y a la altura de precipitación acumulada, se obtuvieron los coeficientes de escurrimiento por mes y por subcuenca (Tabla 21). Para obtener los volúmenes escurridos, se realizó una intersección de isoyetas con el uso de suelo por subcuenca en la zona de estudio. En la Tabla 22 se presenta el volumen de descarga por escurrimientos de suelos con diferentes usos para cada subcuenca y por mes perteneciente a la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 20. Ponderado de *N* por extensión de uso de suelo y por subcuenca

Subcuenca	Uso de suelo	Extensión (ha)	N ponderado por uso de suelo	Área ponderada (ha)	N ponderado por subcuenca	N final
						Corrección B
Río Amanalco	Pastizal	7 316.69	73.5	537 777.01	59.3	77.3
	Bosque	9 737.90	39.0	379 778.01		
	Agrícola	6 170.19	74.5	459 679.14		
	Urbano	10.93	79.0	863.40		
	Subtotal			1 378 097.56		
Río Molino	Pastizal	1 636.10	73.5	120 253.03	53.0	72.0
	Bosque	9 048.97	39.0	352 909.97		
	Agrícola	4 256.06	74.5	317 076.26		
	Urbano	37.60	79.0	2 970.73		
	Subtotal			793 210.00		
Río San Diego	Pastizal	304.54	73.5	22 383.79	47.2	67.2
	Bosque	2 897.35	39.0	112 996.49		
	Agrícola	386.36	74.5	28 783.57		
	Urbano	161.97	79.0	12 795.92		
	Subtotal			176 959.77		
Arroyo El Carrizal	Pastizal	261.65	73.5	19 231.35	43.0	63.0
	Bosque	2 987.35	39.0	116 506.73		
	Agrícola	99.75	74.5	7 431.29		
	Urbano	1.95	79.0	154.31		
	Subtotal			143 323.67		
Arroyo Yerbabuena	Pastizal	237.89	73.5	17 484.55	49.0	69.0
	Bosque	909.91	39.0	35 486.68		
	Agrícola	67.58	74.5	5 034.57		
	Urbano	38.53	79.0	3 043.91		
	Subtotal			61 049.72		
Arroyo Las Flores	Pastizal	80.53	73.5	5 919.25	48.0	68.0
	Bosque	1 594.68	39.0	62 192.49		
	Agrícola	180.14	74.5	13 420.51		
	Urbano	219.74	79.0	17 359.80		
	Subtotal			98 892.07		
Las Laderas	Pastizal	15.83	73.5	1 163.74	49.0	69.0
	Bosque	1420.83	39.0	55 412.46		
	Agrícola	20.54	74.5	529.95		
	Urbano	435.84	79.0	34 431.28		
	Subtotal			92 537.43		

Tabla 21. Coeficiente de escurrimiento (*C_e*) por subcuenca y por mes

Subcuenca	Coeficiente de escurrimiento (<i>C_e</i>)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Amanalco	0.01	0.31	0.31	0.15	0.16	0.36	0.45	0.41	0.34	0.15	0.04	0.09
Río Molino	0.05	0.05	0.09	0.14	0.05	0.30	0.39	0.35	0.30	0.10	0.11	0.29
Río San Diego	0.16	0.34	0.34	0.14	0.11	0.22	0.23	0.19	0.22	0.06	0.13	0.25
Arroyo El Carrizal	0.37	0.37	0.36	0.31	0.10	0.16	0.19	0.18	0.15	0.11	0.30	0.23
Arroyo Yerbabuena	0.01	0.24	0.15	0.28	0.12	0.22	0.30	0.29	0.23	0.16	0.39	0.22
Arroyo Las Flores	0.17	0.29	0.30	0.31	0.23	0.21	0.29	0.27	0.22	0.15	0.22	0.33
Las Laderas	0.29	0.21	0.33	0.27	0.19	0.22	0.27	0.25	0.21	0.13	0.35	0.27

Tabla 22. Volumen de escurrimiento por subcuenca y uso de suelo

Subcuenca	Uso de Suelo	Volumen de escurrimiento (m ³ /mes)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
Río Amanalco	A	220 328	266 286	278 287	253 402	937 214	5,634 463	9,123 755	7,440 455	4,985 417	1,114 130	178 945	266 286	30,698 967
	B	284 208	404 775	423 942	404 342	1,458 760	8,433 935	13,603 298	8,908 494	7,523 287	1,713 596	271 812	404 775	43,835 224
	P	17 083	22 203	22 058	20 456	72 288	391 619	632 442	513 772	348 253	83 696	14 419	22 203	2,160 492
	ZU	2 783	2 956	3 250	3 525	13 307	83 250	129 933	110 278	74 743	15 988	2 150	2 956	445 119
Río Molino	A	39 802	14 598	9 753	29 825	100 977	1,031 399	1,802 906	1,465 511	1,009 714	147 689	33 024	14 598	5,699 794
	B	250 359	100 069	89 413	240 260	662 028	5,532 580	9,590 146	7,680 059	5,354 445	881 221	230 246	100 069	30,710 895
	P	81 342	32 155	29 872	77 332	217 414	1,797 253	3,098 748	2,473 042	1,743 792	289 588	74 825	32 155	9,947 518
	ZU	661	215	100	416	1 599	20 204	34 259	28 469	19 354	2 756	481	215	108 729
Río San Diego	A	11 898	5 254	12 146	2 302	18 171	156 486	179 312	137 386	159 542	33 066	8 850	5 254	729 667
	B	87 337	39 404	61 784	16 840	128 195	1,148 397	1,400 271	1,080 845	1,175 496	233 275	54 728	39 404	5,465 977
	P	9 214	4 142	5 918	2 513	14 480	119 391	147 847	112 853	122 004	23 781	5 728	4 142	572 011
	ZU	4 406	2 203	1 342	227	6 058	62 657	80 468	65 217	63 338	12 221	1 899	2 203	302 238
Arroyo Las Flores	A	6 227	3 395	1 782	6 579	21 583	70 710	131 746	110 508	72 312	20 531	5 377	3 395	454 145
	B	51 581	25 939	11 431	50 438	178 398	601 632	1,097 730	948 168	629 174	173 766	40 978	25 939	3,835 175
	P	2 676	4 142	546	2 564	9 226	30 809	56 895	49 034	31 732	8 786	2 070	1 426	199 906
	ZU	6 351	2 549	659	4 641	17 816	78 785	137 626	122 176	84 118	22 619	4 351	2 549	484 239
Arroyo El Carrizal	A	6 616	1 476	3 892	339	3 489	29 230	38 891	34 880	26 869	9 485	3 896	1 476	160 540
	B	188 521	44 213	114 000	10 835	107 956	864 149	1,148 752	1,043 519	781 713	284 220	110 923	44 213	4,743 013
	P	16 336	3 872	13 109	1 121	10 074	75 733	99 365	90 520	67 571	25 531	11 080	3 872	418 186
	ZU	123	29	42	6	66	578	802	745	510	180	53	29	3 164
Arroyo Yerbabuena	A	1 149	649	344	1 325	3 731	26 018	43 791	40 242	27 084	7 865	3 281	649	156 127
	B	16 195	8 735	4 762	19 394	48 086	349 671	575 101	527 769	365 295	107 386	49 532	8 735	2,080 663
	P	4 331	2 284	1 848	6 494	13 115	91 045	147 622	133 939	95 312	28 559	14 684	2 284	541 517
	ZU	655	370	58	208	1 625	14 834	24 968	23 689	15 649	4 500	1 352	370	88 278
Las Laderas	A	986	173	83	574	1 834	7 409	10 868	9 771	6 857	1 845	647	173	41 219
	B	66 430	11 935	13 314	24 695	104 514	521 644	745 962	661 284	488 210	134 517	51 254	11 935	2,835 694
	P	707	133	77	460	1 414	5 713	8 379	7 046	5 287	1 442	499	133	31 289
	ZU	21,372	3 661	1 793	6 256	31 977	162 435	241 373	216 078	153 925	39 970	13 729	3 661	896 230
Total		1,399 676	1,007 815	1,105 603	1,187 369	4,185 396	27,342 028	44,333 257	34,035 751	25,431 001	5,422 210	1,190 812	1,005 099	147,646 016

A = agricultura, B = bosque, P = pastizal y ZU = zona urbana

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan las estimaciones de aportes de nutrientes por fuente de contaminación y por subcuenca. Se muestran las fuentes con mayor aporte de contaminantes por subcuenca, se discuten los resultados obtenidos con relación a estimaciones reportadas en la literatura de cargas tanto externas como interna a la presa Valle de Bravo y, finalmente, se presentan varios escenarios de reducción de la carga externa.

4.1. Aportes de nutrientes por fuentes puntuales

Las cargas externas de P_T , N_T , DBO y SST obtenidos para fuentes puntuales en la cuenca de la presa Valle de Bravo se presentan en la Figura 18. Se aprecia que la mayor aportación ocurre en las subcuencas Laderas, río Amanalco y río Molino, representando 41%, 34% y 15% respectivamente de la carga total de estos parámetros. La aportación debido a las fuentes puntuales es de 20.95 t/año de P_T , 82.68 t/año de N_T , 385.01 t/año de SST y 382.65 t/año de DBO (Tabla 23).

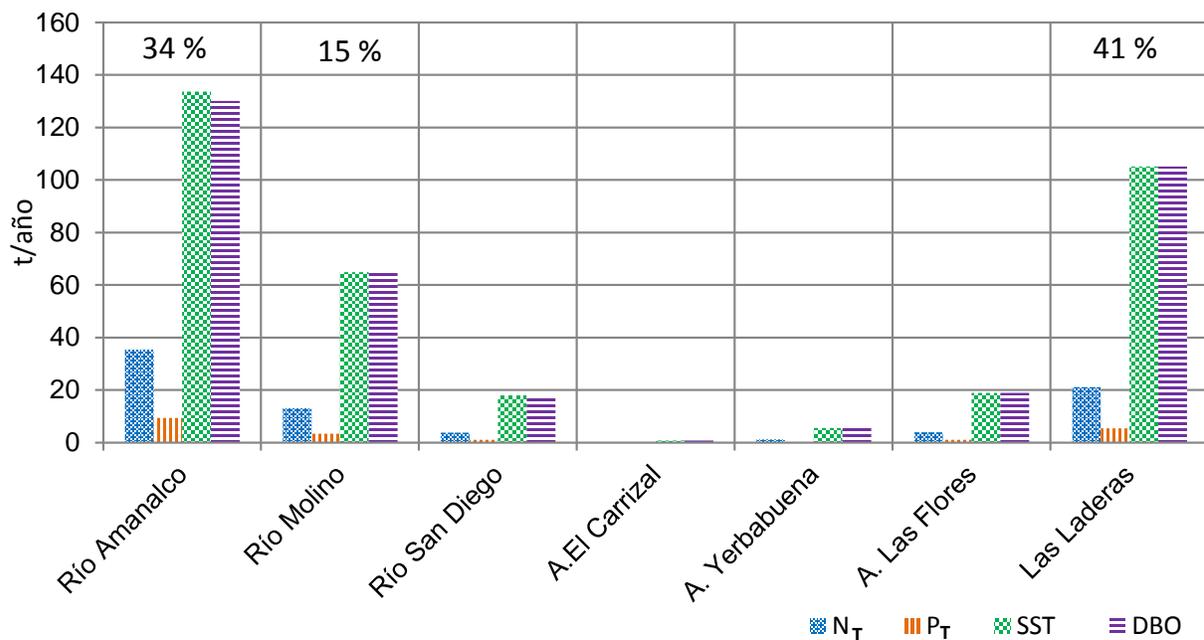


Figura 18. Aporte de contaminantes por fuentes puntuales a la presa Valle de Bravo

En la misma Tabla 23 se observa la aportación de contaminantes de manera mensual, se puede apreciar una carga constante durante casi todo el año, donde se incluyen los aportes de N_T (6.62 t/año) y P_T (1.94 t/año) debido a la descarga de agua residual tratada de la PTAR-Amanalco las cuales representan 8% y 9%, respectivamente, de la carga total por fuentes puntuales.

4.2. Aportes de nutrientes por fuentes difusas

La aportación mensual y anual de nutrientes por descargas pecuarias se presenta en la Tabla 24. Se observa que las aportaciones de contaminantes por ganado porcino son mayores en las subcuencas de los ríos Amanalco y Molino, representando 44% y 28% de la carga total hacia el embalse para este tipo de fuente. La aportación de P_T resultó en 12.68 t/año, variando de 0.97 t/mes a 1.08 t/mes durante todo el año.

En la Tabla 25 se observan las aportaciones mensuales y anuales de contaminantes por descargas del sector trutícola. Se observa que la mayor aportación de contaminantes ocurre en las subcuencas de los ríos Amanalco y Molino, las cuales representan 53% y 35%, respectivamente de la carga total. La aportación de P_T generada por la producción de trucha en la cuenca, es de 10.19 t/año, en donde la aportación menor resultó en 0.78 t/mes, presentándose en febrero, con variaciones de 0.84 t/mes a 0.87 t/mes para los restantes meses del año.

En la Tabla 26 se presentan las aportaciones mensuales y anuales de contaminantes por escurrimientos de suelos con diferentes usos. Se aprecia una carga total de 162.63 t/año y 21.71 t/año de N_T y P_T , respectivamente, representando las subcuencas de los ríos Amanalco y Molino las que aportan más contaminantes con 65% y 24% respectivamente, de la carga total por esta fuente de contaminación. Las mayores cargas de contaminantes se presentan en los meses de junio a septiembre, se le atribuye por ser el periodo de mayor precipitación pluvial durante todo el año.

Finalmente, en la Tabla 27 y Figura 19 se observan las aportaciones mensuales y anuales respectivamente de P_T , N_T , SST y DBO por fuentes difusas en toda la cuenca. En ellas se aprecia un aporte de 44.58 t/año de P_T y 162.63 t/año de N_T en donde las mayores aportaciones son debido a las subcuencas de Amanalco y Molino, las cuales representan 56% y 27% respectivamente, de la carga total por fuentes difusas hacia el embalse.

Durante el periodo de junio a septiembre se presentaron las mayores aportaciones de contaminantes las cuales variaron de 5.56 t/mes (septiembre) a 8.45 t/mes (julio) para P_T y de 27.86 t/mes (septiembre) a 48.74 t/mes (julio) para N_T (Tabla 29).

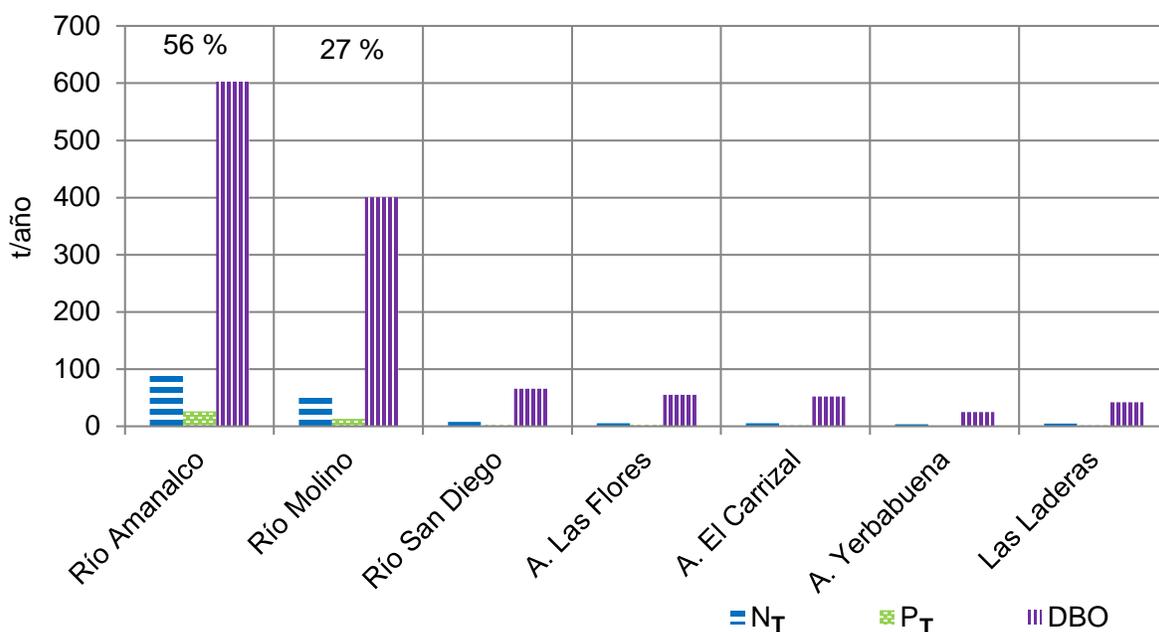


Figura 19. Aporte de contaminantes por fuentes difusas a la presa Valle de Bravo

Tabla 23. Aporte de contaminantes por fuentes puntuales (t/mes)

Subcuenca	Población (2010)	Parámetro	Aporte de contaminantes (t/mes)												Aporte de contaminantes (t/año)
			Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Río Amanalco	26,013	N _T	1.77	1.60	1.77	1.71	1.77	1.71	1.77	1.77	1.71	1.77	1.71	1.77	20.80
		P _T	0.44	0.40	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	0.44	0.43	0.44	0.43	0.44	5.20
		SST	8.83	7.98	8.83	8.55	8.83	8.55	8.83	8.83	8.55	8.83	8.55	8.83	104.02
		DBO	8.83	7.98	8.83	8.55	8.83	8.55	8.83	8.83	8.55	8.83	8.55	8.83	104.02
Río Molino	6,818	N _T	1.07	0.97	1.07	1.04	1.07	1.04	1.07	1.07	1.04	1.07	1.04	1.07	12.64
		P _T	0.27	0.24	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	3.16
		SST	5.37	4.85	5.37	5.19	5.37	5.19	5.37	5.37	5.19	5.37	5.19	5.37	63.21
		DBO	5.37	4.85	5.37	5.19	5.37	5.19	5.37	5.37	5.19	5.37	5.19	5.37	63.21
Río San Diego	1,840	N _T	0.30	0.27	0.30	0.29	0.30	0.29	0.30	0.30	0.29	0.30	0.29	0.30	3.55
		P _T	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.89
		SST	1.51	1.36	1.51	1.46	1.51	1.46	1.51	1.51	1.46	1.51	1.46	1.51	17.75
		DBO	1.51	1.36	1.51	1.46	1.51	1.46	1.51	1.51	1.46	1.51	1.46	1.51	17.75
A. El Carrizal	70	N _T	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.14
		P _T	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
		SST	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.68
		DBO	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.68
A. Yerbabuena	554	NT	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	1.07
		PT	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.27
		SST	0.45	0.41	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	5.35
		DBO	0.45	0.41	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	0.45	0.44	0.45	0.44	0.45	5.35
A. Las Flores	1,937	N _T	0.32	0.29	0.32	0.31	0.32	0.31	0.32	0.32	0.31	0.32	0.31	0.32	3.74
		P _T	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.93
		SST	1.59	1.43	1.59	1.54	1.59	1.54	1.59	1.59	1.54	1.59	1.54	1.59	18.70
		DBO	1.59	1.43	1.59	1.54	1.59	1.54	1.59	1.59	1.54	1.59	1.54	1.59	18.70
Las Laderas	44,600	N _T	2.90	2.62	2.90	2.80	2.90	2.80	2.90	2.90	2.80	2.90	2.80	2.90	34.12
		P _T	0.72	0.65	0.72	0.70	0.72	0.70	0.72	0.72	0.70	0.72	0.70	0.72	8.53
		SST	14.49	13.09	14.49	14.02	14.49	14.02	14.49	14.49	14.02	14.49	14.02	14.49	170.58
		DBO	14.49	13.09	14.49	14.02	14.49	14.02	14.49	14.49	14.02	14.49	14.02	14.49	170.58
Río Amanalco (PTAR-Amanalco)	Gasto de operación	N _T	0.56	0.51	0.56	0.54	0.56	0.54	0.56	0.56	0.54	0.56	0.54	0.56	6.62
		P _T	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.94
	7.5	SST	0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.73
		DBO	0.20	0.18	0.20	0.19	0.20	0.19	0.20	0.20	0.19	0.20	0.19	0.20	2.37
Total	81,833	N _T	7.02	6.34	7.02	6.80	7.02	6.80	7.02	7.02	6.80	7.02	6.80	7.02	82.68
		P _T	1.78	1.61	1.78	1.72	1.78	1.72	1.78	1.78	1.72	1.78	1.72	1.78	20.95
		SST	32.70	29.54	32.70	31.64	32.70	31.64	32.70	32.70	31.64	32.70	31.64	32.70	385.01
		DBO	32.50	29.35	32.50	31.45	32.50	31.45	32.50	32.50	31.45	32.50	31.45	32.50	382.65

Tabla 24. Aporte de contaminantes por descargas del sector pecuario (fuentes difusas)

Subcuenca	Producción de ganado bovino (t/año)	Parámetro	Aporte de contaminantes (t/mes)												Aporte de contaminantes (t/año)
			Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Río Amanalco	117.96	SST	21.94	19.82	21.94	21.23	21.94	21.23	21.94	21.94	21.23	21.94	21.23	21.94	258.33
		DBO	9.14	8.26	9.14	8.85	9.14	8.85	9.14	9.14	8.85	9.14	8.85	9.14	107.64
		NTK	1.83	1.65	1.83	1.77	1.83	1.77	1.83	1.83	1.77	1.83	1.77	1.83	21.53
		P _T	0.48	0.43	0.48	0.46	0.48	0.46	0.48	0.48	0.46	0.48	0.46	0.48	5.60
Río Molino	74.4	SST	13.84	12.50	13.84	13.39	13.84	13.39	13.84	13.84	13.39	13.84	13.39	13.84	162.94
		DBO	5.77	5.21	5.77	5.58	5.77	5.58	5.77	5.77	5.58	5.77	5.58	5.77	67.89
		NTK	1.15	1.04	1.15	1.12	1.15	1.12	1.15	1.15	1.12	1.15	1.12	1.15	13.58
		P _T	0.30	0.27	0.30	0.29	0.30	0.29	0.30	0.30	0.29	0.30	0.29	0.30	3.53
Río San Diego	23.6	SST	4.39	3.96	4.39	4.25	4.39	4.25	4.39	4.39	4.25	4.39	4.25	4.39	51.68
		DBO	1.83	1.65	1.83	1.77	1.83	1.77	1.83	1.83	1.77	1.83	1.77	1.83	21.54
		NTK	0.37	0.33	0.37	0.35	0.37	0.35	0.37	0.37	0.35	0.37	0.35	0.37	4.31
		P _T	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	1.12
A. El Carrizal	20.99	SST	3.90	3.53	3.90	3.78	3.90	3.78	3.90	3.90	3.78	3.90	3.78	3.90	45.97
		DBO	1.63	1.47	1.63	1.57	1.63	1.57	1.63	1.63	1.57	1.63	1.57	1.63	19.15
		NTK	0.33	0.29	0.33	0.31	0.33	0.31	0.33	0.33	0.31	0.33	0.31	0.33	3.83
		P _T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	1.00
A. Yerbabuena	7.89	SST	1.47	1.33	1.47	1.42	1.47	1.42	1.47	1.47	1.42	1.47	1.42	1.47	17.28
		DBO	0.61	0.55	0.61	0.59	0.61	0.59	0.61	0.61	0.59	0.61	0.59	0.61	7.20
		NTK	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	1.44
		P _T	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.37
A. Las Flores	10.54	SST	1.96	1.77	1.96	1.90	1.96	1.90	1.96	1.96	1.90	1.96	1.90	1.96	23.08
		DBO	0.82	0.74	0.82	0.79	0.82	0.79	0.82	0.82	0.79	0.82	0.79	0.82	9.62
		NTK	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.92
		P _T	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.50
Las Laderas	11.95	SST	2.22	2.01	2.22	2.15	2.22	2.15	2.22	2.22	2.15	2.22	2.15	2.22	26.17
		DBO	0.93	0.84	0.93	0.90	0.93	0.90	0.93	0.93	0.90	0.93	0.90	0.93	10.90
		NTK	0.19	0.17	0.19	0.18	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18	0.19	0.18	0.19	2.18
		P _T	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.57
Total	267.33	SST	49.72	44.91	49.72	48.12	49.72	48.12	49.72	49.72	48.12	49.72	48.12	49.72	585.45
		DBO	20.72	18.71	20.72	20.05	20.72	20.05	20.72	20.72	20.05	20.72	20.05	20.72	243.94
		NTK	4.14	3.74	4.14	4.01	4.14	4.01	4.14	4.14	4.01	4.14	4.01	4.14	48.79
		P _T	1.08	0.97	1.08	1.04	1.08	1.04	1.08	1.08	1.04	1.08	1.04	1.08	12.68

Tabla 25. Aporte de contaminantes por descargas del sector trutícola (fuentes difusas)

Subcuenca	Producción de trucha arcoiris (t/año)	Parámetro	Aporte de contaminantes (t/mes)												Aporte de contaminantes (t/año)
			Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Río Amanalco	258	P _T	0.46	0.41	0.46	0.44	0.46	0.44	0.46	0.46	0.44	0.46	0.44	0.46	5.41
		SST	23.32	21.06	23.32	22.57	23.32	22.57	23.32	23.32	22.57	23.32	22.57	23.32	274.55
		DBO	7.39	6.68	7.39	7.15	7.39	7.15	7.39	7.39	7.15	7.39	7.15	7.39	87.05
Río Molino	171	P _T	0.30	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	3.59
		SST	15.48	13.98	15.48	14.98	15.48	14.98	15.48	15.48	14.98	15.48	14.98	15.48	182.29
		DBO	4.91	4.43	4.91	4.75	4.91	4.75	4.91	4.91	4.75	4.91	4.75	4.91	57.80
Río San Diego	3	P _T	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
		SST	0.23	0.20	0.23	0.22	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.23	0.22	0.23	2.67
		DBO	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.85
A. Las Flores	40	P _T	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.84
		SST	3.62	3.27	3.62	3.50	3.62	3.50	3.62	3.62	3.50	3.62	3.50	3.62	42.64
		DBO	1.15	1.04	1.15	1.11	1.15	1.11	1.15	1.15	1.11	1.15	1.11	1.15	13.52
Laderas	14	P _T	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.29
		SST	1.27	1.14	1.27	1.23	1.27	1.23	1.27	1.27	1.23	1.27	1.23	1.27	14.92
		DBO	0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.73
Total	485	P _T	0.87	0.78	0.87	0.84	0.87	0.84	0.87	0.87	0.84	0.87	0.84	0.87	10.19
		SST	43.91	39.67	43.91	42.50	43.91	42.50	43.91	43.91	42.50	43.91	42.50	43.91	517.06
		DBO	13.92	12.58	13.92	13.48	13.92	13.48	13.92	13.92	13.48	13.92	13.48	13.92	163.95

Tabla 26. Aporte de contaminantes por escurrimientos de suelos con diferentes usos

Subcuenca	Parámetro	Aporte de contaminantes (t/mes)												
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Río Amanalco	DBO	2.71	3.65	3.82	3.59	13.05	76.24	123.08	87.29	67.84	15.38	2.45	3.65	402.78
	SST	57.03	71.35	74.55	68.72	252.54	1 502.68	2 430.24	1 897.23	1 332.26	299.28	47.93	71.35	8 105.19
	N _T	0.61	0.79	0.83	0.77	2.81	16.56	26.75	20.01	14.70	3.32	0.53	0.79	88.47
	P _T	0.10	0.12	0.13	0.12	0.44	2.61	4.22	3.32	2.32	0.52	0.08	0.12	14.11
Río Molino	DBO	2.16	0.85	0.76	2.03	5.69	48.29	83.65	67.04	46.80	7.64	1.97	0.85	267.73
	SST	23.57	9.12	7.56	20.85	61.60	552.24	959.00	771.93	537.05	84.78	20.93	9.12	3 057.76
	N _T	0.39	0.15	0.13	0.36	1.04	8.96	15.52	12.45	8.69	1.40	0.36	0.15	49.63
	P _T	0.04	0.02	0.01	0.03	0.10	0.93	1.61	1.30	0.90	0.14	0.03	0.02	5.13
Río San Diego	DBO	0.67	0.30	0.47	0.13	0.98	8.80	10.73	8.30	8.99	1.78	0.42	0.30	41.87
	SST	7.17	3.25	5.49	1.33	10.67	95.00	114.36	88.49	96.97	19.44	4.63	3.25	450.05
	N _T	0.11	0.05	0.08	0.02	0.17	1.51	1.83	1.42	1.54	0.31	0.07	0.05	7.17
	P _T	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.16	0.20	0.15	0.17	0.03	0.01	0.01	0.77
Arroyo Las Flores	DBO	0.41	0.22	0.08	0.39	1.37	4.79	8.69	7.52	5.01	1.38	0.32	0.20	30.39
	SST	3.45	2.41	0.95	4.24	14.90	52.91	96.12	82.90	55.26	15.27	3.55	2.22	334.18
	N _T	0.07	0.04	0.01	0.07	0.23	0.82	1.49	1.29	0.86	0.24	0.05	0.03	5.21
	P _T	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.09	0.17	0.15	0.10	0.03	0.01	0.00	0.59
Arroyo El Carrizal	DBO	1.26	0.29	0.78	0.07	0.72	5.76	7.65	6.95	5.21	1.90	0.75	0.29	31.64
	SST	9.85	2.30	6.15	0.57	5.63	44.97	59.71	54.17	40.70	14.81	5.89	2.30	247.04
	N _T	0.19	0.04	0.12	0.01	0.11	0.88	1.17	1.06	0.79	0.29	0.11	0.04	4.83
	P _T	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.07	0.10	0.09	0.06	0.02	0.01	0.00	0.39
Arroyo Yerbabuena	DBO	0.13	0.07	0.04	0.16	0.40	2.88	4.74	4.34	3.01	0.89	0.41	0.07	17.15
	SST	1.27	0.69	0.39	1.51	3.81	27.70	45.71	41.98	28.96	8.52	3.84	0.69	165.09
	N _T	0.02	0.01	0.01	0.03	0.07	0.50	0.82	0.75	0.52	0.15	0.07	0.01	2.97
	P _T	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.07	0.05	0.01	0.01	0.00	0.28
Las Laderas	DBO	0.60	0.11	0.10	0.21	0.93	4.66	6.74	5.99	4.37	1.18	0.44	0.11	25.43
	SST	6.39	1.12	0.84	2.15	9.85	49.20	71.93	64.12	46.34	12.35	4.44	1.12	269.84
	N _T	0.10	0.02	0.02	0.04	0.16	0.79	1.16	1.03	0.75	0.20	0.07	0.02	4.35
	P _T	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09	0.14	0.04	0.09	0.02	0.01	0.00	0.44
Total	DBO	7.93	5.50	6.04	6.58	23.16	151.41	245.29	187.44	141.25	30.16	6.75	5.48	816.98
	SST	108.73	90.24	95.93	99.37	359.00	2 324.71	3 777.07	3000.82	2 137.54	454.45	91.23	90.05	12 629.15
	N _T	1.51	1.11	1.20	1.30	4.59	30.02	48.74	38.01	27.86	5.91	1.27	1.11	162.63
	P _T	0.19	0.16	0.16	0.17	0.62	4.01	6.51	5.11	3.68	0.78	0.16	0.16	21.71

Tabla 27. Aporte de contaminantes por fuentes difusas (t/mes)

Subcuenca	Parámetro	Aporte de contaminantes (t/mes)												Aporte de contaminantes (t/año)
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Río Amanalco	DBO	19.25	18.59	20.35	19.60	29.59	92.24	139.61	103.82	83.85	31.92	18.45	20.19	597.47
	SST	102.29	112.23	119.81	112.52	297.80	1 546.48	2 475.50	1 942.49	1 376.06	344.54	91.73	116.61	8 638.07
	N _T	0.61	0.79	0.83	0.77	2.81	16.56	26.75	20.01	14.70	3.32	0.53	0.79	88.47
	P _T	1.03	0.97	1.06	1.02	1.37	3.52	5.16	4.25	3.22	1.45	0.99	1.06	25.11
Río Molino	DBO	12.83	10.50	11.43	12.36	16.37	58.62	94.33	77.71	57.13	18.32	12.30	11.53	393.42
	SST	52.89	35.61	36.88	49.22	90.92	580.62	988.32	801.25	565.43	114.10	49.31	38.44	3 402.98
	N _T	0.39	0.15	0.13	0.36	1.04	8.96	15.52	12.45	8.69	1.40	0.36	0.15	49.63
	P _T	0.64	0.56	0.62	0.62	0.71	1.51	2.21	1.90	1.49	0.75	0.62	0.62	12.25
Río San Diego	DBO	2.57	2.02	2.37	1.97	2.88	10.64	12.63	10.20	10.83	3.69	2.25	2.20	64.25
	SST	11.79	7.42	10.10	5.80	15.29	99.47	118.98	93.11	101.43	24.05	9.10	7.86	504.40
	N _T	0.11	0.05	0.08	0.02	0.17	1.51	1.83	1.42	1.54	0.31	0.07	0.05	7.17
	P _T	0.11	0.10	0.11	0.10	0.12	0.26	0.30	0.25	0.26	0.13	0.10	0.11	1.94
Arroyo Las Flores	DBO	2.37	1.99	2.05	2.29	3.34	6.69	10.66	9.49	6.91	3.35	2.22	2.17	53.52
	SST	9.03	7.45	6.53	9.64	20.48	58.31	101.70	88.49	60.66	20.86	8.95	7.80	399.90
	N _T	0.07	0.04	0.01	0.07	0.23	0.82	1.49	1.29	0.86	0.24	0.05	0.03	5.21
	P _T	0.12	0.11	0.12	0.12	0.14	0.20	0.28	0.26	0.21	0.14	0.12	0.12	1.93
Arroyo El Carrizal	DBO	2.88	1.76	2.41	1.65	2.35	7.34	9.28	8.58	6.78	3.52	2.32	1.92	50.79
	SST	13.75	5.82	10.06	4.35	9.53	48.75	63.61	58.07	44.48	18.71	9.67	6.20	293.01
	N _T	0.19	0.04	0.12	0.01	0.11	0.88	1.17	1.06	0.79	0.29	0.11	0.04	4.83
	P _T	0.10	0.08	0.09	0.08	0.09	0.15	0.18	0.17	0.15	0.11	0.09	0.09	1.39
Arroyo Yerbabuena	DBO	0.75	0.62	0.65	0.75	1.01	3.47	5.35	4.96	3.60	1.50	1.00	0.68	24.35
	SST	2.74	2.02	1.86	2.93	5.28	29.12	47.18	43.45	30.38	9.98	5.26	2.16	182.37
	N _T	0.02	0.01	0.01	0.03	0.07	0.50	0.82	0.75	0.52	0.15	0.07	0.01	2.97
	P _T	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.08	0.11	0.10	0.08	0.05	0.04	0.03	0.65
Las Laderas	DBO	1.93	1.31	1.42	1.49	2.26	5.94	8.07	7.32	5.66	2.51	1.72	1.43	41.07
	SST	9.88	4.27	4.33	5.53	13.34	52.58	75.42	67.61	49.72	15.84	7.82	4.61	310.94
	N _T	0.10	0.02	0.02	0.04	0.16	0.79	1.16	1.03	0.75	0.20	0.07	0.02	4.35
	P _T	0.09	0.07	0.07	0.07	0.09	0.17	0.21	0.12	0.16	0.10	0.08	0.08	1.31
Total	DBO	42.58	36.79	40.69	40.11	57.80	184.93	279.93	222.08	174.77	64.80	40.27	40.13	1 224.86
	SST	202.37	174.82	189.57	189.99	452.64	2 415.33	3 870.71	3 094.46	2 228.16	548.09	181.84	183.69	13 731.67
	N _T	1.51	1.11	1.20	1.30	4.59	30.02	48.74	38.01	27.86	5.91	1.27	1.11	162.63
	P _T	2.13	1.91	2.11	2.05	2.56	5.89	8.45	7.05	5.56	2.73	2.04	2.10	44.58

Las cargas externas anuales de contaminantes por fuentes puntuales (FP) y fuentes difusas (FD) en la cuenca de la presa Valle de Bravo se muestran en la Tabla 28. En ella se aprecia que las subcuencas con mayor aporte de P_T y N_T son las de los ríos Amanalco, Molino y Las Laderas, representando 48%, 24% y 15% respectivamente de la carga total hacia el embalse. En la misma Tabla 28 y Figura 20 se puede observar que la mayor contribución de la carga externa se debe a FD la cuales representan en promedio 67% de P_T y N_T por subcuenca. Excepto para la subcuenca Las Laderas en ella la mayor contribución de la carga de P_T y N_T es debido a las FP, las cuales representan el 87% y 89% respectivamente de estos parámetros.

El aporte total de cargas externas por FP y FD en la presa Valle de Bravo resultaron en 65.54 t/año de P_T , 245.31 de N_T , 1 607.51 de DBO y 14 116.68 de SST.

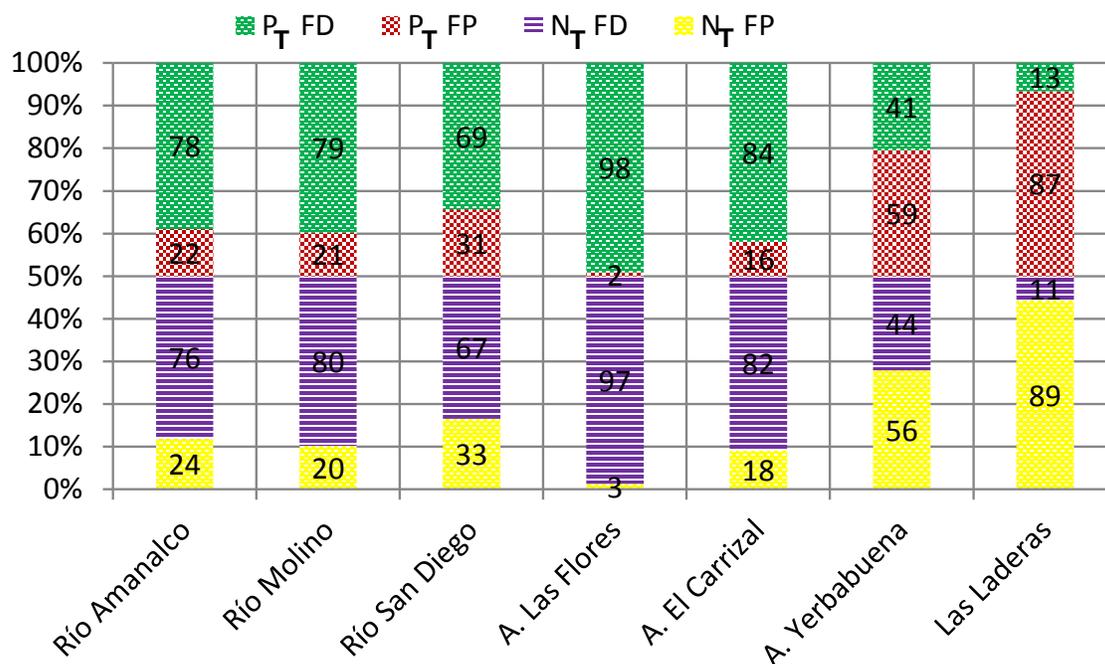


Figura 20. Aporte de nutrientes por fuentes puntuales (FP) y difusas (FD)

Proyección de la carga externa año 2020

Utilizando la misma metodología de *estimación indirecta (modelación)*, se estimó el aporte total de cargas externas por fuente de contaminación en la presa Valle de Bravo para el año 2020, considerando las siguientes proyecciones:

- 1 Proyección de la población año 2020
- 2 Proyección de coberturas de alcantarillado sanitario y agua potable
- 3 Proyección del gasto de operación de PTAR-Amanalco
- 4 Proyección de uso de suelo

Los resultados y su discusión se muestran en el Anexo V, se obtuvo para el año 2020 un aporte de carga externa de 65.43 t/año de P_T , 240.60 t/año de N_T , 1 583.45 t/año de DBO y 14 149.11 t/año de SST; estos resultados mostraron valores similares comparados con la estimación actual (2010). Se le atribuye a las proyecciones utilizadas de coberturas de servicios y gasto de operación de PTAR-Amanalco.

Tabla 28. Aporte de contaminantes por fuentes externas

Subcuenca	Carga de contaminantes (t/año)											
	SST			N _T			P _T			DBO		
	FP	FD	Total	FP	FD	Total	FP	FD	Total	FP	FD	Total
Río Amanalco	108.75	8 638.07	8 746.82	27.43	88.47	115.90	7.14	25.11	32.25	106.39	597.47	703.85
Río Molino	63.21	3 402.98	3 466.19	12.64	49.63	62.27	3.16	12.25	15.41	63.21	393.42	456.62
Río San Diego	17.75	504.40	522.15	3.55	7.17	10.72	0.89	1.94	2.83	17.75	64.25	82.00
A. Las Flores	0.68	399.90	400.58	0.14	5.21	5.35	0.03	1.93	1.97	18.70	53.52	72.22
A. El Carrizal	5.35	293.01	298.36	1.07	4.83	5.89	0.27	1.39	1.66	0.68	50.79	51.47
A. Yerbabuena	18.70	182.37	201.06	3.74	2.97	6.71	0.93	0.65	1.58	5.35	24.35	29.70
Las Laderas	170.58	310.94	481.52	34.12	4.35	38.46	8.53	1.31	9.83	170.58	41.07	211.65
Total	385.01	13 731.67	14 116.68	82.68	162.63	245.31	20.95	44.58	65.54	382.65	1 224.86	1 607.51

FP = fuentes puntuales, FD = fuentes difusas

4.3. Comparación con otros reportes de carga externa

Los resultados de la evaluación de la carga externa obtenidos por estimación indirecta (modelación), se compararon con los reportados en estudios realizados mediante la medición directa (monitoreo) en el embalse y en los principales tributarios de la cuenca. Para llevar a cabo esto, fueron analizadas dos metodologías reportadas por IDECA, 1999 y Ramírez-Zierold *et al.*, 2010. El estudio realizado en 1999 reporta mediciones mensuales durante tres días en los ríos de Amanalco, Molino y González durante un año. En el 2010 en mediciones cada 28 días de enero/2002 a agosto/2005, se analizaron además el afluente arroyo Carrizal y descarga de aguas residuales sobre arroyo Tizates de la PTAR-Valle de Bravo, esta última debido a fallas en el sistema de alcantarillado sanitario durante el muestreo entre los meses de marzo a julio para el año 2003.

En la Tabla 29 se muestra la comparación de la evaluación de la carga externa en la cuenca de la presa Valle de Bravo. En ella se puede apreciar un aumento de la aportación de P_T y N_T de 45% y 26% respecto al estudio reportado en el año de 1999. Y un decremento de 40% y 54% de N_T y P_T respectivamente con el estudio reportado en el año 2010. Los incrementos de carga comparada con el primer estudio se le atribuyen al aumento de la población y a los cambios de uso de suelo en ese periodo de 17 años. En el segundo estudio se presentaron cargas de P_T y N_T de 35.2 t/año y 83.7 t/año respectivamente debido a fallas en la infraestructura del sistema de alcantarillado sanitario ocasionando descarga directa de agua residual tratada de la PTAR-Valle de Bravo. Estos valores representan 29% y 14% de la carga total de estos nutrientes (Tabla 29). Actualmente este problema ya fue reparado y estas cargas se reflejan en la disminución del aporte total.

La evaluación de la carga de nutrientes realizada por *estimación indirecta (modelación)*, comparada con estos estudios puede ser aceptada, sus valores representan una estimación con base a concentraciones de contaminantes según su origen y con fallas de infraestructura ya resueltos para este periodo.

Tabla 29. Comparación de metodologías de la carga externa en Valle de Bravo

Autor	Método	Aporte de nutrientes (t/año)		Consideraciones
		N _T	P _T	
IDECA, 1999	Mediciones mensuales, durante tres días seguidos en las desembocaduras de los ríos Amanalco, Molino y González en el periodo de 1992 a 1993.	194.1	45.1	Población total 1990 en la cuenca= 35 000 hab
Ramírez-Zierold <i>et al.</i> , 2010	Mediciones cada 28 d, en las desembocaduras de los ríos Amanalco, Molino, González, arroyo Carrizal, en el periodo de 2002 a 2005.y de aguas residuales de Valle de Bravo de marzo a julio 2003.	591.8	120.8	
esta tesis	Estimación mensual con base a concentraciones promedio de contaminantes y volumen de agua generado en las subcuencas de los ríos Amanalco, Molino, González y arroyos Carrizal, Yerbabuena, Las Flores y Las Laderas.	245.31	65.54	Población total 2010 en la cuenca= 81 832 hab

4.4. Comparación con estimaciones de carga interna

Los resultados de la evaluación de la carga externa obtenidos por estimación indirecta (modelación) para la presa Valle de Bravo, se compararon con la carga interna reportada en el estudio realizado por Conagua-IMTA, 2010. El estudio reporta una estimación de 5.90 t de carga interna con base en variaciones en potencial redox (Eh) para el periodo de abril a diciembre de 2010.

En la Tabla 30 se presenta la comparación de las evaluaciones de la carga externa e interna en la presa Valle de Bravo. Para los valores de la carga externa se realizaron dos estimaciones a partir de la total de 62.30 t para el mismo periodo de estimación que la carga interna (abril a diciembre), la primera en base a los resultados de muestreos sobre el río Amanalco, cuya finalidad fue la de conocer en qué forma llega el fósforo a la presa. La metodología se presenta en el Anexo IV. De acuerdo a estos resultados, se obtuvo en promedio una relación de fósforo

particulado de 25% y fósforo disuelto de 75% del cual el 92% es como fósforo reactivo soluble (PRS). La segunda estimación considerando que el 30% del fósforo entra al embalse en forma disuelta y el 70% particulada (Wetzel, 2001)

Tabla 30. Evaluación de la carga externa e interna en la presa Valle de Bravo.

Método	Fósforo disponible sobre el embalse (t)	Consideraciones
Carga interna estimada en función de las variaciones en el potencial redox (Eh)	5.90	Valores mensuales medidos de potencial redox en sedimentos sobre el embalse. Conagua-IMTA, 2010
Carga externa estimada considerando que el 30% entra disuelta y 70% en forma particulada	18.69	Muestreos realizados sobre ríos y embalses en Estados Unidos de 1964 a 1973. Wetzel, 2001.
Carga externa estimada considerando que el 75% entra en forma disuelta y el 25% particulada	42.98	Se realizaron tres muestreos sobre río Amanalco, incluyendo muestras filtradas (0.45 μm). Muestreo en esta tesis.

Considerando los resultados mostrados en la Tabla anterior, la carga total como fósforo disponible (P-PO₄) en el embalse fue de 48.88 t, siendo 87% de carga externa y 13% de carga interna respecto a la estimación de esta tesis y 76% de carga externa y 24% de carga interna respecto a la consideración de Wetzel, 2001. Se puede observar que para ambas consideraciones la carga externa representa más de 50% de la carga total de fósforo en embalse.

4.5. Escenarios de control de la carga externa y reducción de nutrientes

Para evaluar las variaciones en carga externa a la presa Valle de Bravo, se analizaron diferentes escenarios de control en cargas de contaminantes por fuentes puntuales y difusas; los cuales contemplan las siguientes acciones específicas:

- 20% de reforestación de pastizales en la subcuenca del río Molino
- 20% de deforestación de bosques en la subcuenca del río Molino
- 20% de aumento en actividades porcícolas y trutícolas
- 20% de reducción en actividades porcícolas y trutícolas
- Separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo
- 95% en cobertura de redes de agua para consumo y 90% de alcantarillado en Valle de Bravo y Amanalco e incremento de eficiencia de tratamiento (remoción de 50% P y N)
- Tratamiento descentralizado de 50% de agua residual generada por pequeñas localidades
- Floculación/sedimentación de sólidos suspendidos en río Amanalco

4.5.1. Reforestación de pastizales/Deforestación de bosques

Para evaluar la variación en carga externa debido a la reforestación de pastizales/deforestación de bosques, primeramente se identificaron las zonas de pastizal y bosques en la carta de uso de suelo de INEGI reportada en el estudio del IMTA (2005), situando a la subcuenca del río Molino como la principal zona de pastizales con 68% y 30% en bosque del total de la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Estos escenarios contemplan las variaciones en carga externa por los escurrimientos provenientes de suelos con diferentes usos. Las estimaciones se realizaron considerando 20% de aumento (deforestación) y 20% de reducción (reforestación) en las coberturas de suelo de bosque a pastizal y de pastizal a

bosque, respectivamente, para la subcuenca del río Molino, y aplicando las concentraciones de contaminantes según su cobertura de uso.

En la Tabla 31 se muestra la reducción de contaminantes debido a la reforestación de pastizales en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 31. Escenario reforestación de pastizales y deforestación de bosques

Concepto	Carga de contaminantes (t/año)			
	DBO	SST	N _T	P _T
Aporte actual de contaminantes por uso de suelo (río Molino)	267.73	3057.76	49.63	5.13
Aporte total en la cuenca	1 607.51	14 116.68	245.31	65.54
Aporte de contaminantes por reforestación de pastizales (río Molino)	242.81	2957.48	47.54	5.00
Aporte total en la cuenca	1 582.60	14 016.40	243.22	65.41
Aporte de contaminantes por deforestación de bosques (río Molino)	292.64	3,158.04	51.72	5.26
Aporte total en la cuenca	1 632.43	14 216.96	247.40	65.67

Implementando el escenario de reforestación de 20% de los pastizales en la subcuenca del río Molino, se estima una reducción de 2.09 t/año de N_T y 0.13 t/año de P_T, respectivamente. Por otro lado, considerando la deforestación adicional de 20% del área de bosque para convertirlo en pastizal, las aportaciones de estos nutrientes incrementarían las mismas cantidades de contaminantes, las cuales representan el 1.0% de N_T y el 0.20% de P_T.

4.5.2. Aumento/Reducción de las actividades porcícolas y trutícolas

Para evaluar las variaciones de carga externa debido al aumento o la reducción de la producción de cada actividad, se emplearon los valores reportados en la SIAP (2008) y Acuagranjas/CNA (2004) para toda la cuenca: 267 t/año en producción de ganado porcino y 485 t/año de trucha arcoiris.

La estimación de este escenario se realizó considerando un aumento o una reducción de 20% en la producción de ganado porcino y trucha arcoiris en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

En las Tablas 32 y 33 se muestran los escenarios de aportes de contaminantes debido a las variaciones de la producción de las actividades porcícolas y trutícolas en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 32. Escenario aumento y reducción de las actividades trutícolas

Concepto	Producción de trucha (t/año)	Carga de contaminantes (t/año)		
		DBO	SST	P _T
Aporte actual de contaminantes debido a la producción de actividades trutícolas ¹	485	163.95	517.06	10.19
Aporte total en la cuenca	485	1 607.51	14 116.68	65.54
Aporte de contaminantes por 20% más en la producción de esta actividad	582	196.74	620.48	12.22
Aporte total en la cuenca	582	1 640.30	14 220.10	67.57
Aporte de contaminantes por 20% menos en la producción de esta actividad	388	131.16	413.65	8.15
Aporte total en la cuenca	388	1 574.72	1 4013.27	63.50

¹ Fuente: Acuagranjas/CNA (2004).

Tabla 33. Escenario de aumento y reducción de actividades porcícolas

Concepto	Ganado en pie producción (t/año)	Carga de contaminantes (t/año)				
		HyO	DBO	SST	NTK	P _T
Aporte actual de contaminantes debido a la producción de ganado ¹	267.33	6,020.27	243.93	585.45	48.78	12.69
Aporte total en la cuenca	267.33	6,020.27	1 607.51	14 116.68	48.78	65.54
Aporte de contaminantes por 20% más en la producción de esta actividad	320.80	7,224.49	292.73	702.54	58.55	15.22
Aporte total en la cuenca	320.80	7,224.49	1 656.31	14 233.77	58.55	68.07
Aporte de contaminantes por 20% menos en la producción de esta actividad	213.86	4,816.32	195.15	468.36	39.03	10.15
Aporte total en la cuenca	213.86	4,816.32	1 558.73	13 999.59	39.03	63.00

¹ Fuente: SIAP (2008).

Considerando un crecimiento de 20% en las producciones de actividades porcícolas y trutícolas en la cuenca, las aportaciones de P_T incrementarían 4.57 t/año. Por otro lado, considerando un control en la producción de estas actividades se estima una reducción de esta misma cantidad (4.57 t/año de P_T), lo que representa 7% del aporte total hacia el embalse.

4.5.3. Separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo

La estimación de este escenario se realizó, considerando la separación de agua residual y pluvial para el municipio de Valle de Bravo y desvío del agua residual durante todo el año, incluso durante los cinco meses de la época de lluvias. Actualmente, durante esta época del año, el agua residual se diluye con agua de lluvia y se considera que 50% del agua residual (coeficiente de previsión, CNA, 1994) es tratada para luego ser desviada aguas abajo de la cortina de la presa y el remanente se descarga no intencionalmente al embalse. La estimación consiste en reducir este porcentaje a 0% durante la época de lluvias.

Para evaluar las variaciones en carga externa debido a este escenario, se tomó en cuenta la hidrología del área para la época de lluvias (de junio a octubre) y el cálculo de las concentraciones con base en la dilución del agua residual tratada (2,108 903 m³/año, Conagua, 2008) con el agua pluvial (896 230 m³/año), las cuales se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. Concentraciones de contaminantes en agua residual diluida con agua de escurrimiento urbano

Parámetro	Concentración (mg/L)		
	Uso de suelo zona urbana*	Agua residual**	Agua residual diluida
SST	166.00	200	189.86
N _T	2.10	40	28.70
P _T	0.37	10	7.13
DBO	9.00	200	189.86

*Benaman *et al.*, 1996, ** FAO (1992).

Implementado un sistema de separación de agua pluvial y residual para el municipio de Valle de Bravo, se estima una reducción de contaminantes de 3.54 t/año y 14.24 t/año de P_T y N_T (Tabla 35), lo que representa 7% y 6%, respectivamente, de la aportación total hacia el embalse.

Tabla 35. Escenario separación de agua residual y pluvial en Valle de Bravo

Concepto	Carga de contaminantes (t/año)			
	DBO	SST	N _T	P _T
Aporte total en la cuenca	1 607.51	14 116.68	245.31	65.54
Aporte de contaminantes separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo	70.99	94.23	14.24	3.54
Aporte total en la cuenca	1 536.52	14 022.45	231.07	62.00

4.5.4. Ampliación de coberturas de agua y alcantarillado e incremento de eficiencia de tratamiento

La estimación de este escenario se realizó considerando un aumento en las coberturas de redes de agua para consumo, alcantarillado e incremento en la eficiencia de tratamiento de aguas residuales para los municipios de Amanalco y Valle de Bravo.

Para evaluar las variaciones en carga externa bajo este escenario, se tomó como referencia la demanda de servicios (agua potable, alcantarillado sanitario y saneamiento) reportado por INEGI (2007) y por Conagua (2008), los cuales se presentan en la Tabla 36. Se observa que para ambos municipios, las coberturas de los servicios no alcanzan 90% del total de la población. La disminución en aportación de contaminantes hacia el embalse se estimó, considerando una cobertura de agua potable de 95% y alcantarillado sanitario de 90% tanto para Amanalco como para Valle de Bravo. Asimismo, se consideró un incremento en eficiencia de tratamiento (remoción de 50% P_T y N_T) y gastos de operación de 7.5 a 18 L/s (capacidad instalada) para Amanalco y de 41 a 70 L/s para Valle de Bravo.

Tabla 36. Coberturas de servicios de Amanalco y Valle de Bravo

Subcuenca	Municipio	Población (hab)	Población en la cuenca (%)	¹ Cobertura (%)		Planta de tratamiento de aguas residuales
				AP	AS	² Gasto de operación actual (L/s)
Río Amanalco	Amanalco	18 839	27	80.09	55.64	7.50
Laderas	Valle de Bravo	40 701	45	88.53	84.36	41.19

AP = agua potable, AS = alcantarillado sanitario;
Fuente: ¹ INEGI, 2007, ² Conagua (2008).

En la Tabla 37 se muestran las aportaciones de contaminantes debido a la ampliación de coberturas de servicios e incremento en la eficiencia de tratamiento en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 37. Escenario ampliación de la red de alcantarillado e incremento en la eficiencia de tratamiento

Concepto	Carga de contaminantes (t/año)			
	DBO	SST	N _T	P _T
Aporte actual de contaminantes por fuentes puntuales	382.65	385.01	82.68	20.95
Aporte total en la cuenca	1 607.51	14 116.68	245.31	65.54
Aporte de contaminantes ampliación de coberturas	213.92	219.60	57.54	13.25
Aporte total en la cuenca	1 438.79	13 951.26	220.17	57.84

Implementando una ampliación de cobertura de los servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y saneamiento, se estima una reducción de contaminantes de 7.70 t/año de P_T y de 25.14 t/año de N_T. Estas cantidades representan el 12% y el 11% respectivamente de la aportación total hacia el embalse.

4.5.5. Tratamiento descentralizado de agua residual en pequeñas localidades

La estimación de este escenario se realizó, considerando el tratamiento descentralizado para 28 localidades con población mayor a 500 habitantes y menor a 2 500 habitantes en la cuenca. Estas poblaciones son seguidas en tamaño sólo por Amanalco y Valle de Bravo.

Para evaluar la variación en carga externa a la presa, por el tratamiento descentralizado de aguas residuales generada con base al número de habitantes en estas localidades, se estimó la aportación de contaminantes considerando un volumen de agua residual tratado de 814 227 m³/año con eficiencia de tratamiento de 50% de remoción de P_T y N_T y un volumen de agua residual sin tratamiento a 1,084 635 m³/año en toda la cuenca. En la Tabla 38 se presentan las aportaciones de contaminantes debido al tratamiento descentralizado de las 28 localidades consideradas.

Tabla 38. Escenario tratamiento descentralizado de agua residual en pequeñas localidades

Concepto	Carga de contaminantes (t/año)			
	DBO	SST	N _T	P _T
Aporte actual de contaminantes por fuentes puntuales	382.65	385.01	82.68	20.95
Aporte total en la cuenca	1 607.51	14 116.68	245.31	65.54
Aporte de contaminantes tratamiento descentralizado	379.14	379.14	58.91	14.73
Aporte total en la cuenca	1 604.01	14 110.81	221.54	59.31

Implementando el escenario de tratamiento descentralizado en las 28 localidades con poblaciones entre 500 a 2 500 habitantes, se estima una reducción de 6.15 t/año de P_T y 23.47 t/año de N_T .

4.5.6. Floculación/Sedimentación de sólidos suspendidos en río Amanalco

La estimación de este escenario se realizó, considerando la floculación/sedimentación de los sólidos suspendidos sobre río Amanalco, subcuenca de mayor aportación con 77.14 Mm³ a la presa Valle de Bravo. Para evaluar la variación en carga externa a la presa, bajo este escenario se consideró lo siguiente:

- Los volúmenes de escurrimiento de diseño (máximo, medio y mínimo) los cuales se estimaron en base a las estaciones climatológicas del Extractor Rápido de Información Climatológica (IMTA, 2007) ubicadas cerca y dentro de la subcuenca del río Amanalco, los cuales resultaron en 8.77, 2.43 y 0.18 m³/s, respectivamente.
- Los valores estimados de carga de contaminantes de 32.35 t/año para P_T , 115.90 t/año de N_T , 703.85 t/año de DBO y 8 746.82 t/año de SST.
- La consideración de que el 25% del fósforo de carga externa se transporta como partículas y 75% como fósforo disuelto con base al muestreo realizado sobre el río Amanalco (subcapítulo 3.2.2 de esta tesis) y
- La remoción de 50% de sólidos suspendidos durante el proceso (Metcalf & Eddy, 2002).

El sedimentador será de forma rectangular de dos niveles donde la sedimentación tendrá lugar en el compartimiento de la parte superior y la acumulación de lodos en la parte inferior bajo la influencia de la gravedad. La velocidad de sedimentación será de 1 m³/m²/hora, con un tiempo de retención de 3 h. En la Tabla 39 se presentan las aportaciones de contaminantes debido a la floculación/sedimentación de sólidos suspendidos sobre río Amanalco.

Tabla 39. Escenario floculación/sedimentación sobre río Amanalco

Concepto	Carga de contaminantes (t/año)			
	DBO	SST	N _T	P _T
Aporte actual de contaminantes por río Amanalco	703.85	8 746.82	115.90	32.35
Aporte total en la cuenca	1 607.51	14 116.68	245.31	65.54
Aporte de contaminantes por floculación/sedimentación	211.16	4 373.41	115.90	4.04
Aporte total en la cuenca	1 114.82	9 743.27	245.31	61.50

Cabe mencionar que el porcentaje de fósforo retenido en el proceso de sedimentación representa la forma particulada, y la disuelta entra al embalse, sin embargo, implementando una floculación/sedimentación sobre río Amanalco, se estima una reducción de 4.04 t/año de P_T. Esta cantidad representa el 6% de la aportación total hacia el embalse. Además que para este escenario se presenta la mayor reducción de sólidos suspendidos, cuyo valor representa el 31% de la carga total de este contaminante a la presa.

Los escenarios de control de carga externa y la evaluación de la reducción de contaminantes en la cuenca de la presa Valle de Bravo, se presentan en forma resumida en la Tabla 40. Se observan porcentajes de reducción que varían entre 0.2 y 11% para P_T, y entre 0.9 y 10% para N_T, presentando mayor eficiencia el *escenario 4* que corresponde a la ampliación de coberturas de alcantarillado, agua para consumo y eficiencia de tratamiento. Los seis escenarios son medidas de control de carga externa consideradas para mediano (10 años) y largo plazo (20 años), las cuales se pueden implementar con otras acciones en paralelo que involucren la carga interna en un periodo a corto plazo (5 años).

Considerando todos los escenarios para el control de carga externa se podría lograr una reducción de 26.21 t/año de P_T, lo cual representa el 40% de reducción de la carga total.

Tabla 40. Estimación de escenarios de control de la carga externa de contaminantes

Parámetro	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5		Escenario 6	
	Reforestación de 20% de pastizales en el Río Molino (t/año)	Reducción de la carga externa (%)	20% de reducción en actividades pecuarias y trutícolas	Reducción de la carga externa (%)	Separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo y Amanalco	Reducción de la carga externa (%)	Ampliación de la red de alcantarillado e incremento de eficiencia de tratamiento	Reducción de la carga externa (%)	Tratamiento descentralizado en pequeñas localidades	Reducción de la carga externa (%)	Floculación/Sedimentación de sólidos suspendidos en río Amanalco	Reducción de la carga externa (%)
N _T	2.09	0.9	0	0	14.24	6	25.14	10	23.77	10	0	0
P _T	0.13	0.2	4.57	7	3.54	5	7.70	11	6.23	9	4.04	6
DBO	24.92	2	81.57	5	70.99	4	168.73	11	3.51	0.2	211.16	13
SST	100.28	0.7	220.50	2	94.23	1	165.41	2	5.87	0.04	4 373.41	31
Total (reducción de la carga de P_T (t/año) en la cuenca)												26.21

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesis se presentó una metodología indirecta para estimar cargas externas de contaminantes en cuerpos de agua, consistente en la estimación de volúmenes y de masas de contaminantes en descargas mediante un Sistema de Información Geográfica. La metodología propuesta fue aplicada para estimar la carga externa mensual y anual en la cuenca de la presa Valle de Bravo y de acuerdo con los resultados se concluye lo siguiente:

Las subcuencas río Amanalco, río Molino y Las Laderas presentaron la mayor carga de contaminantes a la presa con 48%, 24% y 15% respectivamente. Se obtuvieron cargas más altas de nutrientes durante los meses de junio a septiembre, coincidiendo con el periodo donde se presentan las lluvias con mayor intensidad. Se confirmó la validez de las cargas estimadas mediante la metodología desarrollada en esta investigación al comparar sus resultados con los publicados en la literatura mediante medición directa en afluentes y embalse, pudiéndose explicar las diferencias por el aumento en población, métodos de medición y existencia de fallas en la infraestructura de alcantarillado sanitario.

De los seis escenarios evaluados para el control de carga externa de contaminantes los más eficientes fueron *escenario 4* consistente en la ampliación del control de descargas de aguas residuales en las cabeceras municipales de Valle de Bravo y Amanalco, que permitiría la eliminación de 11% de la carga externa de fósforo, y *escenario 5* que involucra el tratamiento descentralizado de aguas residuales en pequeñas localidades con población entre 500 y 2 500 hab, que eliminaría 9% de la carga externa de fósforo.

Se confirmó la suposición de que la mayor contribución de aporte de nutrientes a la presa Valle de Bravo, es debido a la carga externa, la cual representa más de 50% de la carga total de P en el embalse.

Recomendaciones

Para controlar la eutroficación en la presa de forma sustentable, se recomienda realizar las acciones a mediano y largo plazo identificadas en esta tesis como las más eficientes para el control de la carga externa y al mismo tiempo que se decida implantar alguna de las medidas a corto plazo, discutidas en el capítulo II, para reducir las concentraciones de fósforo en el agua y la carga interna. Entre estas se recomienda la precipitación química en las entradas de los ríos de mayor aportación (Amanalco y Molino), y el uso de adsorbentes naturales para inmovilizar el fósforo dentro del embalse.

Se recomienda realizar muestreos de agua sobre los principales afluentes de la presa para complementar el análisis de las formas de entrada del fósforo al embalse.

Por último y para evaluar el impacto de ejecución de las estrategias para el control de la carga externa, se recomienda implementar un programa de monitoreo de la calidad del agua antes y después de estos trabajos.

6. REFERENCIAS

Aparicio Mijares, F. J. 2009. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México D.F. 2009.

Arnold, J.G., Williams J.R., Nicks A.D., y Sammons N.B.1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M University Press, College Station, TX. 1990.

Arredondo F.J.L., Díaz Z. G., Ponce P. J.T., 2007. Limnología de presas mexicanas aspectos teóricos y prácticos. 1^{ra} edición. Editorial AGT EDR. México D.F. 2007.

Bellows B. 2001, Nutrient Cycling in Pastures. NCAT (National Center for Appropriate Technology), Chapter 3 Nutrient Distribution and Movement in Pastures. Disponible en: World Wide Web: <http://www.attra.ncat.org/attra-pub/nutrientcycling.html>

Bosco I. J., Blanco J. A. y Castillo F. J. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. 2004 ISBN: 84-8014-552-8. Páginas 479-506.

CCVB-A (Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco). 2008. Presa de Valle de Bravo. Estado de México. Disponible en World Wide Web: <http://www.cuencaamanalcovalle.org/index.php>.

CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), 2001. Metodologías Simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Editado por la CEPIS, Lima Perú. Enero 2001. Disponible en World Wide Web: <http://www.cepis.org.pe/bvsaca/e/fulltext/eutrof>.

CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/Acuagranjas Consultores en Acuicultura, S.A. de C.V.). 2002. Muestreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final. 151 pp.

CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/Acuagranjas Consultores en Acuicultura, S.A. de C.V.). 2003. Monitoreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final. 226 pp.

CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/Acuagranjas Consultores en Acuicultura, S.A. de C.V.). 2004. Modelación Matemática de la Calidad del Agua y Monitoreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala. Informe final. 229 pp.

CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 2005. Monitoreo Biológico en las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque del sistema Cutzamala y adecuación del modelo matemático para la presa Villa Victoria. Informe final. 205 pp.

CNA/Acuagranjas (Comisión Nacional del Agua/Acuagranjas Consultores en Acuacultura, S.A. de C.V.). 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. 213 pp.

Conagua (Comisión Nacional del Agua). 2001. Sistema Cutzamala. Noviembre 2001. SEMARNAT. Editada por la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México. México. D.F. 2001.

Conagua (Comisión Nacional del Agua). 2008. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2008. SEMARNAT. Editada por la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México. México D.F. 2008.

Conagua-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2007. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), (CD-ROM), ver. 2007, México, Hidrometría y Sedimentos/IMTA.

Conagua-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009. Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo, Estado de México, y evaluación de diferentes técnicas de control de nutrientes. Primera etapa. Informe final. Convenio No. OAVM-DT-MEX-09-453-RF-CC

Conagua-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2010. Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo, Estado de México, y evaluación de diferentes técnicas de control de nutrientes. Segunda etapa. Informe final. Convenio No. OAVM-DT-MEX-10-441-RF-CC

Conapo. (Consejo Nacional de Población). 2006. Proyecciones de México 2005-2050. Disponible en World Wide Web: http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=234.

Cooke, G.D., Welch E.B., Nichols S.A. 2005. Restoration and management of lakes and reservoirs, Taylor and Francis Group, 3^{ra} Edition United States of America.2005.

Corzo-Juárez, C.E. 2009. Contaminación de la cuenca del Arcediano y propuesta de saneamiento, tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, México, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Coyne M., 2000. Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. Ed Paraninfo. Capítulo 16. 1ª Edición. Madrid España. 2000.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1989. "Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89", México, 13 de diciembre, p. 17.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1980. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-003-1980, la cual establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el objetivo de fijar sus características físicas y químicas. 25 de marzo de 1980.

Dommergues, Y. R., Dreyfus, B., Hoang Gia Diem y Dulhoux, E. 1985. Fijación del nitrógeno y agricultura tropical. Mundo Científico, 5, 276-285. Universiteit van Amsterdam.1985.

EPA (Environmental Protection Agency). 2008. Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters. EPA 841-B-08-002. Washington, DC. 2008.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55), Roma Italia.1997.

Holford, I. C. R. 1997. Soil properties related to phosphate buffering in calcareous soils. Soil Science and Plant Analysis 8, 125-37.

IDECA (Investigación y Desarrollo de Estudios de Calidad del Agua). 1999. Estudio limnológico de la presa Valle de Bravo, México. Contrato GT-306-GAVM-98. Informe final.

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2005. Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca Valle de Bravo. Estado de México. Clave de informe: GAVMSC-GOA-MEX-05-404-RF-CC. Informe final. 228 pp.

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2007. ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica v.1.0). Jiutepec Morelos.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2007. Anuario Estadístico Estado de México Edición 2007. Disponible en World Wide Web <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/mex/index.htm>.

Jackson, T. 1982. Application and selection of hydrologic models. In: Hydrologic modeling in small watersheds. ASAE Monograph 5; 476-505. Texas. 1982.

Jiménez C.B.E., 2005. La contaminación ambiental en México. 1ra edición. Editorial Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C. Instituto de Ingeniería de la UNAM. México D.F. 2005.

Mazzeo N., García F., Gorga J., Kruk C., Lacerot G., Larrea D., Loureiro M., Meerhoff M., Quintans F. y Rodríguez-Gallego L. 2001. Is the infestation by *Egeriadensa* detrimental for water quality? Proceeding 9th International Conference on the Conservation and Management of Lakes. Shiga, 4: 171-174. Disponible en World Wide Web <http://limno.fcien.edu.uy/>.

Metcalf and Eddy. 2002. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th Ed.). McGraw-Hill. New York, 2002. 1848 pages. ISBN: 0070418780.

Newell C.J., Rifai H.S., y Bedient P.B. 1992. Characterization of non-point sources and loadings to Galveston bay. Publication GBNEP-15, Galveston Bay National Estuary Program. Webster, Texas.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 1982. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control, París, OECD.

Olem, H. y Flock G. 1990. Lake and reservoirs restoration guidance manual. 2nd edition. EPA 440/4-90-006. United States Environmental Protection Agency. Washington DC.

Olvera V. V. 1990. Estudio de la eutroficación del embalse Valle de Bravo, México en: Olvera, V., Bravo L. y Sánchez J. Aquatic ecology and management assessment in Valle de Bravo reservoir and its watershed. Aquatic Ecosystem Health & Management, Volume 1, Issue 3 & 4, 1998. pp. 227-290.

Olvera V. V. 1993. Limnología y manejo de la cuenca de la presa Valle de Bravo, México en: A. Anis, G. Singhal. 2006. Mixing in the surface boundary layer of a tropical freshwater reservoir. Journal of Marine Systems. Volume 63, Issues 3-4, December 2006. pp. 225-243.

Olvera V.V., Bravo L. y Sánchez J. 1998. Aquatic ecology and management assessment in Valle de Bravo reservoir and its watershed. Aquat. Ecosys. Health Manag. vol.1, núm. 2-3, pp. 277-290.

Parra, O. O. 1989. La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: Un caso de estudio, en: Ambiente y Desarrollo, Vol. V(1), pp. 117-136.

POETVB (Programa de Ordenamiento Ecológico de la Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco). 2003. Universidad Autónoma del Estado de México. Gobierno del Estado de México 2003.

Postgate, J. R. 1982. The fundamentals of nitrogen fixation. Cambridge University Press. London 252 pp.

Ramírez-García p, Nandini S, Sarma S, Robles E, Cuesta I, Hurtado D, 2002. Seasonal variations of zooplankton abundance in the freshwater reservoir Valle de Bravo. *Hydrobiologia* 467:99-108.

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 y Reservoir Management. Vol. 26, pp. 23-34.

Richards, R.P. 1997. National management measures to control nonpoint pollution from agriculture. EPA (Environmental Protection Agency). 1997. Disponible en World Wide Web: www.epa.gov/owow/tmdl/nutrient/pdf/nutrient.pdf

Rodríguez B.C., Sevillano G.F., Subramaniam P. 1984. La fijación de nitrógeno atmosférico. 1ª edición Instituto de Recurso Naturales y Agrobiología. Salamanca España. 1984.

Rosswall, T. 1979. Nitrogen losses from terrestrial ecosystems global, regional and local considerations, in: Proc. V Int. Meet. Global impacts of applied Microbiology. Bangkok, 17-26.

Santos, D.V., P.L. Sousa y R.E. Smith. 1996. Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments. *Agric. Water Manage.* 32: 293-306.

Schueler, T.R. 1987. Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs. Metropolitan Council of Governments, Washington, DC.

Silva E. O. 1998. Conceptos básicos de simulación hidrológica. Conservación de suelos y agua. Departamento e Instituto de agronomía. Venezuela. 1998.

Srinivasan R, B.W. Byars, J.G. Arnold. 1996. SWAT/GRASS Interface users manual, version 96.2. Soil and water research lab. Blackland research center. Temple, Texas. 41 p.

Tilman, D. y C. Lehman. 2001. Human-caused environmental change: Impacts on plant diversity and evolution, in: Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 98, pp. 5433-5440.

Tsai, S.M. y R. Rossetto. 1992. Transformaciones microbianas del fósforo. In *Microbiología del Suelo*. Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Campinas, Brasil.

UNEP-IETC (United Nations Environment Programme) 2001. Planejamento e gerenciamento de lagos e reservatórios: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização. IETC Technical Publication Series 11. Sao Paulo.

Vollenweider, R. A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem.Ist. Ital. Idrobiol., 33:53-83.

Wetzel, R.G. 2001. Limnology Lake and River Ecosystems. Third Edition. Academic Press, San Diego. XVI, 1006 pp. ISBN 0-12-744760-1.

Williams J. R y Arnold J. G. 1997. A system of erosion-sediment yield models. Soil Technology. 11:43-55.

7. ANEXOS

Anexo I. Modelos hidrológicos y de simulación de carga externa de contaminantes.

En México, la medición de la cantidad y calidad del agua no es realizada de manera periódica y directa a través de estaciones hidrométricas y de monitoreo, respectivamente. Ante esta circunstancia, una alternativa para evaluar la cantidad y calidad del agua en las cuencas y presas que no cuentan con infraestructura de medición, es el uso de los modelos hidrológicos de simulación, debido a su bajo costo y a la estimación razonable de sus resultados (Silva, 1998).

Los modelos de simulación hidrológica se componen de una serie de ecuaciones que calculan e interrelacionan los diversos procesos de movimiento del agua que ocurren en una unidad de área. Como resultado, estiman características del escurrimiento. En general, resuelven el balance hidrológico del área mediante ecuaciones que resuelven a su vez los componentes de dicho balance, es decir, funciones matemáticas que relacionan, generan o resuelven los términos de precipitación, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, drenaje profundo, almacenamiento y flujo de base (Santos *et al.*, 1996).

Los modelos de simulación de erosión, según los componentes de escurrimiento generados, calculan la producción de sedimentos. Varios de los modelos de este tipo generan información adicional a la relativa a erosión, como productividad de los cultivos y concentraciones de pesticidas y nutrientes en el suelo, el agua y el sedimento.

La principal utilidad de los modelos de simulación es que permiten utilizar e integrar de manera sistemática cierta cantidad de información básica y producir información cuantitativa sobre características y procesos de productividad y degradación agrícola y ambiental (Silva, 1998).

Los modelos de simulación hidrológica están basados en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la siguiente ecuación (Jackson, 1982):

$$SW_t = SW + \sum [(R_i) - Q_i - ET_i - P_i - QR_i]$$

Donde SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t , SW es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo, t es el tiempo en días, R es la precipitación diaria, Q la cantidad de escorrentía diaria, ET la evapotranspiración diaria, P la percolación diaria y QR el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades en mm.

Los modelos son basados en principios físicos; es decir, en lugar de integrar modelos de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, los modelos de simulación usan métodos semiempíricos que requieren de datos específicos acerca de clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo, que ocurren en la cuenca.

Escorrentía superficial. Es el agua superficial que fluye sobre la superficie terrestre y tiene relación directa con el almacenamiento de la humedad del suelo y del flujo subsuperficial o infiltración, flujo de aguas subterráneas, dentro del contexto de balance hídrico. Su cálculo afecta la cantidad de agua total expresada en el balance hídrico (Silva, 1998).

La cantidad de escorrentía (Q) es estimada por medio de la metodología del *Número de Curva* establecida por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norte América, con datos de lluvia diarios. Q es el escurrimiento diario, que está determinado por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

$$Q = \frac{(R - 0.2S)^2}{(R + 0.8S)}$$

Donde:

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254$$

R	=	Precipitación diaria (mm)
CN	=	Número de curva (Tablas)
Q	=	escorrentía diaria (mm)

En este método, cada tipo o clase de suelo es asignado a un grupo hidrológico. Los grupos hidrológicos se basan fundamentalmente en la capacidad de infiltración, la cual puede relacionarse con la conductividad hidráulica saturada de la superficie del suelo. Estos grupos son:

- Capacidad de infiltración rápida y bajo escurrimiento, arenas profundas y agregados de limos.
- Capacidad de infiltración moderada, suelos de textura moderadamente fina a moderadamente gruesos, tales como los limos arenosos.
- Capacidad de infiltración lenta con bajo contenido de materia orgánica, suelos de textura fina, tales como los limo-arcillosos, arcillas de arenosas, poco profundas.
- Capacidad de infiltración muy lenta, suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y algunos suelos salinos.

Algunos de los factores que intervienen y afectan este fenómeno de la infiltración son la cobertura vegetal, la porosidad y la conductividad hidráulica así como el contenido de humedad en el suelo, de ahí su importancia en el balance hídrico, ya que la infiltración se puede considerar de esta forma como una de las pérdidas en dicho balance.

La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo. Los modelos de simulación hidrológica estiman la evapotranspiración potencial por medio de tres métodos: (Penman-Monteith, 1965), (Hargreaves-Sammani, 1985) y (Priestley-Taylor, 1972). Esto dependerá del modelo a elegir.

Selección de modelos: Desde varias décadas atrás, se han establecido cuatro criterios básicos que pueden ser utilizados para seleccionar un modelo entre varias alternativas:

- Precisión de la predicción.
- Simplicidad del modelo.
- Consistencia de las estimaciones.
- Sensibilidad de los resultados de ante cambios de los parámetros de entrada.

Un punto de interés sería información sobre el valor y costo del uso de los modelos hidrológicos ante cada problema en específico. No obstante, este proceso puede significar la inversión de tiempo y recursos mayores de los que el analista dispone. Esta técnica de selección puede resumirse en los siguientes pasos (Jackson, 1982):

- Definir explícitamente el problema y especificar la información requerida para tomar una decisión.
- Identificar los modelos disponibles.
- Especificar los criterios y límites que serán usados para definir el valor de uso de cada modelo disponible.
- Estimar los costos de aplicación de los modelos.
- Calificar los modelos y candidatos y seleccionar el definitivo.

El costo del uso de un modelo principalmente se define según la cantidad y calidad de la información requerida. Ello es función de los procedimientos que se emplean para describir los procesos hidrológicos, así como la manera de agregar o disgregar dicha información para representar la variabilidad espacial de los factores hidrológicos dentro de la cuenca.

Alcance y detalle de los modelos: el alcance de los modelos se refiere a la dimensión (espacial, temporal o numérica) del sistema que simulan. El detalle,

consiste en el nivel que alcanza la descripción de los componentes del sistema en la simulación. Pueden existir diversas combinaciones entre alcance y detalle. Por ejemplo:

- Gran alcance y poco detalle: modelos regionales de gran visión y ecuaciones de regresión regionalizadas.
- Poco alcance y poco detalle: modelos empíricos puntuales.
- Gran detalle y poco alcance: modelos funcionales y mecanicistas puntuales.
- Gran detalle y gran alcance: modelos funcionales regionales.

La manera como los modelos describen la variación de los factores hidrológicos en una cuenca pueden determinar y/o predecir el escurrimiento y producción de sedimentos. Mucho o muy poco detalle en la descripción de la cuenca pudiera tener efectos negativos en el uso de un modelo. Si un modelo requiere poca información, produciría resultados imprecisos o su aplicación se limitará a sitios específicos.

Según la dificultad con que los modelos hidrológicos tomen en cuenta la variabilidad espacial pueden clasificarse en agregados y distribuidos. La cuenca hidrográfica puede ser dividida en sectores hidrológicos menores, con lo cual es posible agregar los parámetros y asumir un valor único para toda la cuenca, o distribuir los valores según las características de cada subdivisión. La agregación de parámetros puede traer errores de estimación considerables con respecto a los resultados obtenidos con distribución de parámetros. En cuencas pequeñas, este efecto puede ser más notable que en cuencas grandes. Sin embargo, la precisión lograda por la distribución (o disgregación) de datos de entrada dependerá de la resolución o nivel de detalle con que estos datos puedan obtenerse (Srinavasavan *et al.*, 1996).

Puede concluirse que la unidad básica de la representación espacial tiene forma agregada, es decir, se describe la unidad (cuenca, unidad de área, unidad de manejo y forma del terreno) con valores únicos para cada variable.

Existen modelos que no permiten representar variabilidad espacial y sólo simulan un sector con valores únicos de los factores de erosión y escurrimiento. Por lo tanto, solo son aplicables en los niveles de escala de parcela de cultivo o como máximo, de unidad de área con cobertura y manejo homogéneo. Estos modelos asumen que el área que se simula es homogénea y se denominan agregados (Williams *et al.*, 1997).

Resolución temporal: Es la combinación existente entre la mínima unidad de tiempo y el periodo de tiempo que el modelo está en capacidad de simular. El detalle en que los modelos reciben la información climatológica para su funcionamiento y el periodo en que agregan sus salidas, determinan la resolución temporal de los mismos. Puede haber diversas combinaciones entre el detalle de las entradas y salida, que en general, originan modelos de tipo por evento y continuos.

Los modelos por evento de lluvia tienen una resolución temporal muy detallada, hasta de horas, pero sólo producen salidas para el evento de lluvias en consideración. Los modelos de tipo continuo, tienen capacidad de operar a lo largo del tiempo. Con información climatológica diaria son capaces de ajustar los parámetros asociados a humedad en el tiempo, y generar salidas de manera continua. Los modelos continuos de base diaria pueden agregar sus salidas automáticamente en periodos mensuales o anuales. Además, estos modelos poseen componentes agronómicos que simulan el desarrollo de la cobertura vegetal en tanto esta afecte la hidrología del área.

Un modelo trata de responder por medio de transformaciones a parámetros cuantificables, lo que sucede en realidad, por lo tanto no es probable llegar a un ajuste de 100%, pero si se intenta realizar un proceso consecuente con lo que sucede en la vida real de la cuenca hidrográfica (Arnold *et al.*, 1990).

Anexo II. Población 2010 por localidad y subcuenca en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

En la Tabla 41 se presenta la población para el año 2010 por subcuenca y localidad en la cuenca de la presa Valle de Bravo.

Tabla 41. Población 2010 en la cuenca de la presa Valle de Bravo

Subcuenca	Municipio	Localidad	Población 2010 (habitantes)
Rio Amanalco	Amanalco	Ojo de Agua	32
	Amanalco	Capilla Vieja	190
	Valle de Bravo	La Candelaria	398
	Amanalco	San Jerónimo	1 795
	Amanalco	Polvillos (San Bartolo Quinta Sección)	1 151
	Amanalco	Hacienda Nueva	71
	Valle de Bravo	Santa María Pipioltepec (Pipioltepec)	1 199
	Donato Guerra	San Francisco Mihualtepec	2 389
	Amanalco	El Zacatonal	88
	Amanalco	San Bartolo	2 302
	Amanalco	San Juan	2 322
	Amanalco	Amanalco de Becerra	1 048
	Amanalco	San Jerónimo Primera Sección (El Convento)	249
	Donato Guerra	San Miguel Xooltepec	1 571
	Valle de Bravo	San Gabriel Ixtla	880
	Amanalco	Huacal Viejo	179
	Amanalco	San Lucas Cuarta Sección (San Francisco)	225
	Amanalco	San Lucas	1 003
	Amanalco	El Pedregal	251
	Amanalco	San Miguel (San Miguel Tenextepec)	871
	Donato Guerra	Nueva Colonia Tres Puentes	208
	Amanalco	San Sebastián el Chico	468
	Amanalco	Agua Bendita	592
	Amanalco	Rincón de Guadalupe	1 009
	Amanalco	San Mateo	1 632
	Amanalco	El Capulín Tercera Sección (Palo Mancornado)	471
	Amanalco	Pueblo Nuevo	679
	Amanalco	El Capulín Segunda Sección	273
	Amanalco	El Capulín Primera Sección	567
	Amanalco	El Potrero	1 148
Villa de Allende	Sabana Taborda Primera Sección	751	
Rio Molino	Valle de Bravo	Tierra Grande (La Loma)	167
	Valle de Bravo	La Laguna	86
	Valle de Bravo	Cuadrilla de Dolores	841
	Valle de Bravo	Santo Tomás el Pedregal	193
	Valle de Bravo	El Fresno (El Fresno la Compañía)	462
	Valle de Bravo	Rancho Avándaro Country Club	12
	Valle de Bravo	San Ramón	50
	Valle de Bravo	La Compañía (Tres Espigas)	857
	Valle de Bravo	Tenantongo	312
	Valle de Bravo	La Compañía (Cerro Colorado)	11
	Valle de Bravo	Los Saucos	1 037
	Valle de Bravo	Las Ahujas	31
	Valle de Bravo	La Palma	170
	Valle de Bravo	Monte Alto	499
	Valle de Bravo	Loma de Chihuahua	226
	Valle de Bravo	San Simón el Alto	246

Subcuenca	Municipio	Localidad	Población 2010 (habitantes)
	Valle de Bravo	El Trompillo	121
	Valle de Bravo	Loma de Rodríguez	111
	Valle de Bravo	Los Álamos	33
	Valle de Bravo	San Mateo Acatitlán	577
	Amanalco	El Ancón	128
	Valle de Bravo	El Castellano	85
	Valle de Bravo	Santa Rosa	29
	Amanalco	El Temporal	291
	Amanalco	Corral de Piedra	245
Rio San Diego	Valle de Bravo	La Huerta San Agustín	121
	Valle de Bravo	Barranca Fresca	39
	Valle de Bravo	Cerro Gordo	509
	Valle de Bravo	La Mecedora	22
	Valle de Bravo	Escalerillas	100
	Valle de Bravo	Peña Blanca	218
	Valle de Bravo	Rancho Espinos	29
	Valle de Bravo	Colonia Valle Escondido	117
Arroyo el Carrizal	Valle de Bravo	Casas Viejas	685
	Valle de Bravo	Los Pozos (Pinar de Osorios)	30
	Valle de Bravo	Agua Fria	21
	Valle de Bravo	Mata Redonda (Paso Hondo)	15
Arroyo Yerbabuena	Valle de Bravo	El Aguacate (El Aserradero)	5
	Valle de Bravo	La Volanta	193
Arroyo Las Flores	Valle de Bravo	Mesa de Jaimes	361
	Valle de Bravo	Rincón de Estradas	377
	Valle de Bravo	Barrio de Guadalupe	550
	Valle de Bravo	Los Tizates	67
	Valle de Bravo	Tres Puentes	97
Las Laderas	Valle de Bravo	Colonia Rincón Villa del Valle	847
	Valle de Bravo	El Cerrillo (San José el Cerrillo)	353
	Valle de Bravo	Valle de Bravo	41 743
	Valle de Bravo	La Boquilla (Cerro el Cualtenco la Boquilla)	119
	Valle de Bravo	San Antonio	85
	Valle de Bravo	San Gaspar	802
Cerrada de San Simón	Valle de Bravo	El Arco	1 499
	Donato Guerra	San Simón de la Laguna	4 706
	Amanalco	San Sebastián el Grande	812
	Donato Guerra	San Antonio de la Laguna	1 684
	Villa de Allende	Sabana Taborda Segunda Sección	228
	Donato Guerra	San Antonio Hidalgo (Rchría. de San Antonio)	537
	Amanalco	Providencia (5a. Secc. San Mateo Amanalco)	138
	Donato Guerra	Ranchería de San Martín Obispo	825
	Donato Guerra	San Martín Obispo (San Martín San Pedro)	1 246
	Villa de Allende	Rancho Morelos	54
	Villa de Allende	Sabana de San Jerónimo	465
	Villa de Allende	Sabana de la Peña (La Peña)	438
	Villa de Allende	Cerro de Guadalupe	123
	Villa de Allende	Ejido la Sabana de San Jerónimo	330
	Villa de Allende	Mesas de San Martín	422
	Villa Victoria	Laguna Seca Propiedad	944
	Villa de Allende	Ejido de San Martín	338
	Villa de Allende	Sabana del Madroño (El Madroño)	507
	Villa de Allende	Sabana del Rosario (San Miguel)	1 204
	Villa de Allende	Sabana del Refugio	241
Villa Victoria	San Agustín Canohillas Segunda Sección	193	

Fuente: Conapo (Consejo Nacional de Población), 2006. Proyecciones de México 2005-2050

Anexo III. Muestreo en la planta de tratamiento de aguas residuales en operación de la cabecera municipal de Valle de Bravo y sobre río Amanalco.

Recolección, preservación y almacenamiento de muestra de agua residual

La planeación del muestreo se realizó de acuerdo a la Norma NMX-AA-03-1980 (DOF, 1980), la cual establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el objetivo de fijar sus características físicas y químicas. El muestreo se llevó a cabo los días 23 de julio, 30 de agosto y 13 de diciembre del 2010 en la PTAR-Valle de Bravo.

Mediante oficio se obtuvo autorización por parte del encargado de la PTAR-Valle de Bravo. El operador de la PTAR realizó una explicación breve del proceso de tratamiento (Figura 21), la cual se aprovechó para mostrar esquemáticamente los sitios de muestreo seleccionados en el plan de muestreo (de acuerdo a los parámetros a estudiar), y tomar la muestra.

Los sitios seleccionados fueron:

Sitio 1.- A la entrada del agua residual al proceso de tratamiento (pretratamiento)

Sitio 2.- A la salida del sedimentador secundario

Sitio 3.- A la salida del tanque de contacto de cloro



Figura 21. Proceso de tratamiento y ubicación de sitios de muestreo

Una vez ubicados los sitios de muestreo se procedió a tomar las muestras (dos por cada sitio seleccionado) en frascos de plástico de 500 mL, mismas que fueron

preservadas a 4°C para su análisis en laboratorio (Figura 22). Para las muestras sobre el río Amanalco el sitio se ubicó en la confluencia con el embalse, donde se procedió de igual manera a tomar dos muestras en francos de plástico de 500 mL y preservadas a la misma temperatura de 4°C.



Figura 22. Toma de muestras en pretratamiento y sedimentador secundario

- Análisis de agua residual

A continuación se describen la metodología utilizada para el análisis de las muestras de agua residual de la PTAR-Valle de Bravo, que consistió en determinar los parámetros de fósforo total (P_T) y nitrógeno total (N_T) por métodos fotométricos utilizando un espectrofotómetro Merck (Figura 23).

Para determinar N_T se utilizó el método fotométrico Nitrógeno total 14537 (Spectroquant®). Para ello se agregan 10 mL de muestra a una celda vacía, se añade una micro-cuchara del reactivo N-1K (Nitrógeno total 14537) y seis gotas del reactivo N-2K (Nitrógeno total 14537). Se calienta a 120 °C en el termorreactor durante una hora para llevar a cabo la digestión y se enfría a temperatura ambiente. En una celda de reacción que contiene ácido sulfúrico se agrega una micro-cuchara de reactivo N-3K (Nitrógeno total 14537) y se agita durante un minuto; posteriormente se añade 1.5 mL de muestra digerida dejando reaccionar durante 10 min para posteriormente medir en el espectrofotómetro.

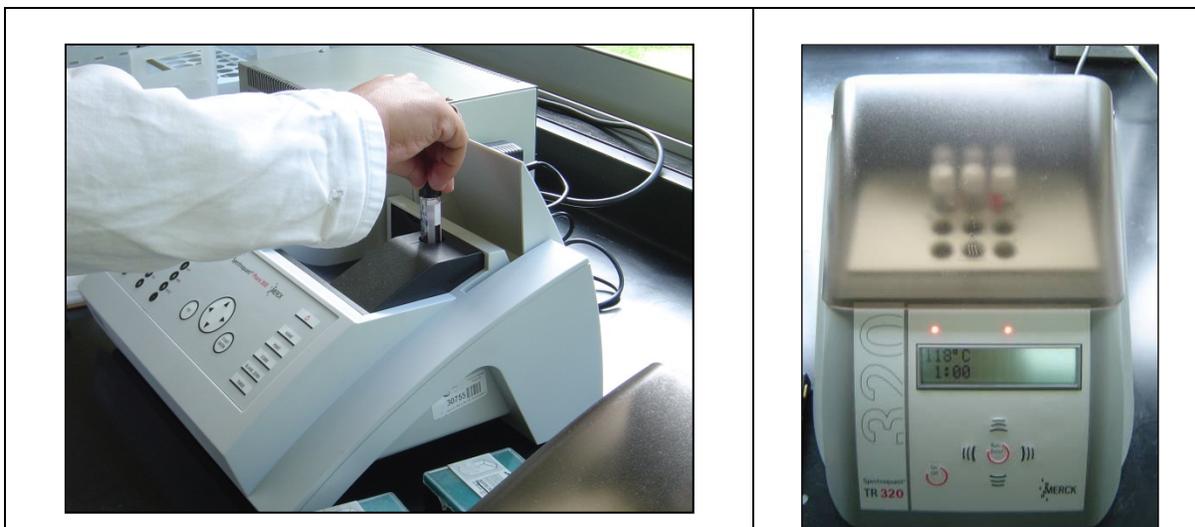


Figura 23. Espectrofotómetro Merck y termostato (para la digestión de las muestras)

La determinación de P_T se realizó a través del método fotométrico (Fosfatos 14543, Spectroquant®) el cual consiste en la digestión de una alícuota de 5 mL de muestra con peroxodisulfato de dipotasio contenido en una celda de reacción, calentamiento a 120 °C durante 30 min en termostato marca Merck modelo TR 320 (Figura 23). Después de enfriar a temperatura ambiente, a la muestra digerida se agregan cinco gotas de reactivo P-2K (Fosfatos 14543) y se mezcla. Posteriormente se agrega una dosis de reactivo P-3K (Fosfatos 14543) agitando vigorosamente hasta que el reactivo se disuelve; transcurrido cinco minutos de reacción se miden las concentraciones de P_T en el espectrofotómetro.

- Resultados

En las Tablas 42 y 43 se muestran los resultados del análisis del agua residual de la planta de tratamiento y las concentraciones promedio de nutrientes de cada sitio de muestreo en la PTAR-Valle de Bravo. En ellas se aprecian fecha y hora del muestreo. Para las muestras tomadas en el mismo sitio se obtuvieron diferencias que variaron de 0.01 a 0.35 mg/L para P_T y de 0.01 a 1.00 mg/L de N_T

Tabla 42. Resultados del muestreo del agua residual de la PTAR-Valle de Bravo

Muestra	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Sitio de muestreo	Concentración (mg/L)	
				P _T	N _T
M ₁₋₁	23 de julio	10:05	Sitio 1	1.01	8.30
M ₁₋₂		10:08		1.36	9.30
M ₂₋₁		10:15	Sitio 2	0.88	3.60
M ₂₋₂		10:18		0.84	3.80
M ₃₋₁		10:25	Sitio 3	0.84	2.50
M ₃₋₂		10:30		0.81	2.40
M ₄₋₁	30 de agosto	15:30	Sitio 1	1.25	9.10
M ₄₋₂		15:38		1.38	9.50
M ₅₋₁		15:45	Sitio 2	0.90	3.80
M ₅₋₂		15:50		0.85	3.00
M ₆₋₁		15:55	Sitio 3	0.90	2.80
M ₆₋₂		15:58		0.86	3.10
M ₇₋₁	13 de diciembre	16:02	Sitio 1	2.68	11.50
M ₇₋₂		16:05		2.71	11.80
M ₈₋₁		16:10	Sitio 2	0.92	6.00
M ₈₋₂		16:13		0.91	6.00
M ₉₋₁		16:20	Sitio 3	0.99	6.40
M ₉₋₂		16:25		0.98	6.50

Tabla 43. Concentraciones promedio agua residual de PTAR-Valle de Bravo

Fecha de muestreo	Sitio de muestreo	Concentración (mg/L)	
		P _T	N _T
23 de julio	Sitio 1	1.19	8.80
	Sitio 2	0.86	3.70
	Sitio 3	0.83	2.45
30 de agosto	Sitio 1	1.32	9.30
	Sitio 2	0.88	3.40
	Sitio 3	0.88	2.95
13 de diciembre	Sitio 1	2.70	11.65
	Sitio 2	0.92	6.00
	Sitio 3	0.99	6.45

Cabe señalar que los dos primeros muestreos se realizaron en época de lluvia, lo que explica las concentraciones bajas por dilución con escurrimientos urbanos. Comparado con las obtenidas en época de sequía las concentraciones de nutrientes que se presentan incrementan 115% de P_T y 26% para N_T. Sin embargo, aun con este incremento los valores para ambos periodos son inferiores a las típicas reportadas en la literatura (40 mg/L para N_T y 10 mg/L para P_T).

En la Tabla 44 se presentan las concentraciones promedio de P-PO₄ y P_T obtenidas sobre el río Amanalco y en las descargas directas de agua residual al

embalse a la altura del arroyo Tizates, con el objetivo de conocer en qué forma llega el fósforo a la presa las muestras sobre el río Amanalco fueron filtradas también para su análisis. Con base en los resultados, se obtuvo en promedio una relación de fósforo particulado de 25% y fósforo disuelto de 75% del cual el 92% es como fósforo reactivo soluble (PRS). Mientras que, en las descargas directas a la presa se encontró que 97% del fósforo entra disuelto y que el 97% de este es PSR.

Tabla 44. Concentraciones de P-PO₄ y P_T en río Amanalco y en descargas directas.

Muestra	Fecha de muestreo	Concentración (mg/L)	
		P-PO ₄	P _T
M-A ₁	15 de diciembre/10	0.12	0.14
M-A ₁ '	15 de diciembre/10	0.11	0.13
M-A ₂	27 de enero/11	0.30	0.44
M-A ₂ '	27 de enero/11	0.27	0.33
M-A ₃	4 de marzo/11	0.16	0.22
M-A ₃ '	4 de marzo/11	0.15	0.20
Descarga 1	4 de marzo/11	4.36	4.40
Descarga 1'	4 de marzo/11	4.25	4.30
Descarga 2	4 de marzo/11	0.82	0.86
Descarga 2'	4 de marzo/11	0.80	0.81

' = muestra filtrada

Anexo IV. Precipitación en la cuenca de la Presa Valle de Bravo de 14 estaciones climatológicas e Isoyetas por mes.

Tabla 45. Estación climatológica 15005 Amanalco de Becerra A.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1962	NO_D	NO_D	6.90	88.50	73.30	164.40	254.50	225.00	252.50	142.00	67.50	26.50
1963	0.00	0.00	13.30	5.10	73.40	300.10	323.50	257.00	206.50	143.00	10.00	0.00
1964	9.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	271.00	222.00	234.50	59.00	52.00	61.00
1965	6.00	38.00	0.00	27.00	82.00	220.00	283.50	332.50	148.00	122.00	26.10	32.00
1966	8.00	2.70	48.80	25.50	52.40	126.20	205.00	247.00	136.80	122.00	13.30	31.30
1967	56.00	7.00	36.80	46.30	115.80	158.90	222.10	202.30	181.00	118.00	43.20	13.90
1968	12.30	9.60	1.60	24.20	58.30	169.50	245.00	192.90	213.90	55.20	23.50	46.70
1969	4.50	0.00	10.40	0.00	1.50	125.70	169.20	189.80	203.10	75.60	22.80	4.50
1970	6.40	8.20	0.00	0.00	0.00	158.60	251.90	270.30	214.60	63.20	24.90	0.00
1971	5.60	0.00	28.90	3.20	109.90	166.50	261.40	192.10	241.50	135.40	20.10	14.20
1972	0.00	0.00	20.50	57.20	95.00	302.50	241.90	269.20	240.30	32.40	39.20	0.00
1973	2.50	0.00	0.00	30.00	149.50	134.00	212.20	169.50	181.20	178.00	15.30	5.50
1974	18.80	15.10	59.10	10.50	60.20	234.20	269.00	230.70	153.90	74.80	26.00	0.00
1975	97.80	4.30	0.00	0.00	141.90	276.80	302.20	201.20	114.50	61.90	12.00	0.00
1976	12.90	6.60	7.20	24.60	40.80	147.20	294.70	378.90	214.60	178.30	38.80	82.80
1977	9.00	3.10	0.00	12.00	103.50	270.20	320.20	177.40	243.30	51.30	72.10	27.40
1978	13.00	20.90	12.20	1.00	23.90	241.00	270.40	343.40	213.10	240.00	10.00	19.00
1979	0.00	18.00	0.00	24.00	111.50	142.50	206.10	282.10	165.00	29.00	13.50	78.10
1980	239.50	0.00	0.00	18.70	96.30	234.80	252.10	329.20	215.40	126.50	29.90	5.00
1981	60.10	42.00	3.10	42.20	39.50	343.40	328.00	236.00	211.00	181.80	1.00	0.00
1982	1.00	10.50	0.00	20.00	93.20	0.00	252.30	229.80	195.10	154.20	14.50	7.90
1983	41.50	44.50	54.60	60.00	54.60	60.00	306.50	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	31.20
1984	10.20	0.00	0.00	0.00	NO_D	260.20	232.80	258.50	177.00	54.00	0.00	NO_D
1985	0.00	2.00	5.60	13.30	87.00	299.00	249.20	188.60	142.90	81.50	NO_D	16.40
1986	NO_D	NO_D	NO_D	62.00	143.00	294.50	NO_D	NO_D	118.00	NO_D	NO_D	NO_D
1987	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	166.30	382.50	333.80	61.60	14.50	4.50	NO_D
1988	0.00	5.40	NO_D	2.00	10.00	195.40	425.70	284.10	233.50	36.60	0.00	3.60
1989	0.00	0.00	0.00	12.00	0.00	122.40	202.00	207.90	172.50	53.90	22.80	41.60
1990	13.00	0.00	0.50	8.00	98.00	233.50	323.60	264.50	258.40	37.70	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	33.70	401.20	532.80	310.50	230.10	NO_D	0.00	0.00
1992	187.10	53.00	0.00	3.00	164.90	120.60	368.10	181.60	153.30	158.70	NO_D	NO_D

Tabla 46. Estación climatológica 15046 Presa Colorines, (CFE)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1969	1.80	0.70	5.80	0.00	25.70	152.50	240.50	290.40	172.70	178.70	0.00	2.90
1970	2.30	12.20	0.00	0.00	1.30	241.20	169.20	222.50	234.90	62.30	16.70	0.00
1971	0.10	0.00	24.10	1.70	74.40	225.80	180.90	249.20	297.50	279.70	29.80	4.40
1972	0.50	0.00	1.50	34.80	85.50	222.10	208.50	NO_D	151.10	64.70	39.50	0.60
1973	0.50	0.00	0.00	10.40	66.70	183.50	190.50	245.30	136.00	138.40	18.20	0.00
1974	34.50	8.80	9.90	8.70	24.40	132.90	236.40	147.70	130.90	28.10	20.30	0.00
1975	NO_D	0.00	0.00	0.00	85.40	215.90	264.50	207.40	165.80	29.10	NO_D	0.00
1976	0.00	4.60	5.10	9.20	30.30	123.00	225.90	NO_D	173.50	142.20	36.00	32.00
1977	2.10	0.00	0.00	6.00	84.10	198.70	169.40	176.90	193.30	28.70	3.50	6.00
1978	6.50	13.90	3.30	1.30	8.30	228.20	164.90	180.90	291.00	120.10	8.10	10.40
1979	0.00	4.80	0.20	2.80	88.50	135.50	133.70	NO_D	139.00	21.10	0.00	36.00
1980	199.70	0.00	0.00	22.20	23.80	187.80	149.70	233.70	164.70	108.80	14.40	0.00
1981	68.30	NO_D	0.70	12.20	15.50	201.10	174.40	236.80	109.80	161.50	4.60	0.80
1982	0.00	15.20	0.10	2.40	116.20	87.10	141.90	133.20	105.80	112.70	8.10	6.90
1983	27.60	14.40	13.40	0.00	49.90	141.00	189.90	123.50	167.60	65.40	42.80	6.00
1984	2.60	0.70	0.10	0.00	52.80	138.10	268.80	181.10	230.80	71.50	0.50	0.00
1985	0.10	0.00	12.30	0.50	34.20	269.70	197.60	163.90	101.60	71.30	17.00	0.60
1986	0.00	0.00	0.00	1.80	112.20	229.80	133.60	95.00	185.80	118.50	52.40	0.00

1987	0.00	2.40	0.00	10.90	12.00	280.80	336.80	213.90	111.10	4.30	20.50	0.00
1988	0.70	0.00	40.20	0.00	1.50	115.40	267.40	442.80	197.50	43.80	4.30	0.00
1989	11.50	0.00	0.00	0.00	30.70	138.40	189.60	220.30	197.30	104.30	36.50	54.30

Tabla 47. Estación climatológica 15079 Puente Andaro

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1968	NO_D	NO_D	NO_D	45.50	63.50	218.50	131.00	107.00	175.00	36.50	2.00	29.80
1969	19.00	5.00	0.00	0.00	14.00	101.00	208.50	288.50	34.00	35.50	0.00	0.00
1970	0.00	13.90	0.00	4.10	87.70	148.70	287.70	125.30	178.80	73.80	6.00	0.00
1971	3.00	0.00	12.50	10.50	56.00	271.10	107.00	313.70	238.00	70.00	10.50	11.30
1972	2.00	1.00	13.30	19.80	90.40	138.10	135.90	60.00	143.00	65.00	32.20	7.00
1973	2.50	0.00	0.00	18.00	55.50	159.50	282.20	291.20	157.20	212.40	1.00	9.00
1974	16.50	13.50	11.00	40.50	29.10	148.50	234.60	93.70	140.00	28.50	39.50	0.00
1975	60.50	15.20	0.00	11.00	86.70	174.90	144.30	167.20	71.50	12.50	0.00	0.00
1976	0.30	0.50	12.90	21.40	57.40	65.50	194.80	188.80	152.30	168.20	19.40	4.80
1977	4.50	14.20	4.70	12.50	40.90	177.30	89.50	140.60	114.50	16.90	6.50	35.30
1978	10.80	21.30	14.60	8.30	39.30	134.00	140.20	133.60	119.10	102.50	8.20	24.60
1979	0.50	13.30	3.50	9.50	41.60	89.10	126.80	104.40	68.50	2.90	14.00	60.60
1980	104.20	3.80	0.00	83.00	66.60	131.40	127.50	227.00	109.10	61.80	28.00	5.00
1981	31.00	44.00	10.50	55.80	54.30	135.00	238.70	150.60	39.30	87.20	4.10	13.00
1982	0.00	23.00	31.60	70.40	101.60	91.40	189.60	89.20	28.00	51.70	0.00	17.30
1983	27.00	9.20	7.50	0.00	63.00	83.20	276.70	175.20	226.60	45.80	26.40	12.90
1984	13.00	15.00	2.00	0.00	47.70	119.90	157.10	200.10	121.80	115.50	13.50	3.50
1985	0.70	12.00	5.90	27.60	80.00	201.00	207.00	219.70	121.00	16.00	7.00	3.00
1986	0.00	5.50	0.00	25.00	68.00	226.10	119.70	137.20	71.20	56.40	23.00	0.00
1987	0.00	7.00	7.80	52.00	25.30	72.80	236.70	113.00	127.50	0.00	19.60	NO_D
1988	0.00	1.50	27.30	23.50	92.80	125.30	210.50	225.70	43.30	14.50	11.80	0.00
1989	0.00	34.00	0.00	6.50	69.20	89.70	NO_D	165.30	122.30	12.50	13.20	20.50
1990	13.30	9.40	3.30	28.40	68.90	100.10	210.90	208.50	91.30	100.80	0.00	0.00
1991	2.00	5.00	0.00	0.00	28.30	147.20	270.50	109.90	107.60	80.60	5.90	14.40
1992	88.70	47.50	0.20	16.80	89.20	43.80	204.10	119.80	97.50	113.00	72.50	2.30
1993	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1994	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	73.80	NO_D	NO_D	0.00
1995	5.00	2.70	NO_D	3.30	22.40	164.00	145.30	243.20	147.20	12.50	29.90	36.00
1996	0.00	0.00	0.00	9.50	11.60	NO_D	106.20	221.30	NO_D	139.60	2.50	3.20
1997	0.50	0.00	33.90	45.20	52.00	58.00	100.90	70.70	126.70	39.80	10.00	10.00
1998	6.00	0.00	0.80	0.00	3.50	116.50	131.00	105.80	278.30	91.30	34.80	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	6.20	10.50	130.10	153.00	281.50	58.00	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 48. Estación climatológica 15088 San Francisco Oxtotilpan

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1961	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	77.00	6.00
1962	2.00	0.00	0.00	97.50	103.00	129.20	186.40	240.10	252.30	143.60	48.70	30.10
1963	0.00	0.00	67.40	19.00	151.00	184.10	317.90	246.10	242.10	287.20	7.50	0.00
1964	75.10	2.50	4.00	41.00	180.80	206.10	228.70	151.30	362.10	54.80	50.40	58.00
1965	12.00	23.50	0.00	28.10	138.10	209.20	242.20	326.70	131.00	214.50	80.60	29.90
1966	9.80	11.00	64.50	69.00	81.90	123.80	239.00	261.60	101.30	174.10	8.00	19.00
1967	109.00	5.90	15.00	17.30	NO_D	168.70	227.50	NO_D	310.40	150.90	50.20	NO_D
1968	43.00	NO_D	34.00	30.90	174.10	220.00	272.60	297.80	180.90	81.20	55.10	94.80
1969	17.90	NO_D	25.00	0.00	19.70	139.00	274.40	358.70	170.00	89.70	10.20	11.90
1970	2.50	8.30	0.00	0.50	56.10	242.70	307.30	208.80	247.90	44.00	3.00	0.00
1971	0.00	0.00	71.50	34.30	126.50	221.20	165.30	189.60	217.50	NO_D	NO_D	NO_D
1972	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	157.10	50.50	52.70	7.30
1973	5.50	0.00	0.00	75.50	198.40	234.70	345.50	272.30	242.60	156.20	15.00	33.00
1974	42.00	11.00	32.00	10.00	45.00	247.50	269.50	165.00	119.50	63.50	55.00	16.00
1975	104.00	38.00	0.00	0.00	149.00	185.50	288.00	183.40	147.50	90.00	31.00	0.00

1976	18.00	27.90	12.00	87.50	74.20	153.50	318.50	271.60	210.00	132.00	77.00	67.30
1977	9.00	13.50	0.00	16.80	191.60	190.70	245.00	226.00	168.00	112.70	57.50	30.00
1978	17.00	56.30	27.00	12.00	64.90	197.70	265.70	189.10	199.30	201.20	48.80	61.50
1979	0.00	62.20	0.00	61.00	106.90	158.20	199.00	283.60	226.20	39.10	3.70	73.60
1980	226.30	2.40	0.00	68.00	95.60	205.20	160.60	283.50	134.40	108.70	51.30	10.60
1981	64.70	72.00	6.70	79.40	84.20	417.40	257.40	NO_D	83.50	156.50	14.60	11.60
1982	0.00	27.80	6.50	31.20	160.70	93.60	190.20	267.70	142.40	79.10	7.60	29.70
1983	41.20	63.80	0.00	0.00	56.60	128.30	440.30	177.30	162.40	128.80	55.70	45.30
1984	NO_D	2.30	2.50	0.00	158.20	393.00	348.70	185.90	315.90	NO_D	0.00	0.00
1985	NO_D	NO_D	11.00	30.00	185.30	338.50	270.60	184.00	254.30	NO_D	15.50	28.70
1986	6.20	10.00	0.00	48.90	219.70	NO_D	141.30	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1987	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	198.50	32.40	39.30	0.30
1988	6.00	0.00	86.70	0.00	6.50	168.00	243.80	204.00	224.80	145.50	0.50	3.40
1989	0.00	3.00	0.00	10.20	79.50	144.20	206.40	236.20	182.10	134.80	55.30	58.00
1990	37.00	0.00	0.70	70.80	130.50	181.90	262.40	187.20	228.70	158.20	12.00	14.10
1991	27.90	12.70	5.40	3.70	137.20	339.40	331.30	252.30	184.20	120.70	37.30	13.30
1992	199.70	0.00	0.00	45.30	130.60	173.30	346.60	195.00	181.20	164.70	115.80	32.00
1993	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1994	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	255.70	124.10	41.30	16.90
1995	44.50	35.30	9.90	44.60	183.20	304.70	338.70	265.20	149.80	82.90	71.10	65.50
1996	0.00	0.00	0.00	36.40	181.00	228.00	234.10	130.50	185.20	133.30	6.50	35.90
1997	5.00	1.00	89.00	21.00	145.70	171.40	238.60	246.20	144.00	96.00	79.80	12.70
1998	27.10	0.00	0.00	0.00	13.70	121.00	227.30	356.70	282.40	167.50	25.30	0.00
1999	0.00	24.70	0.00	26.20	53.10	117.40	381.90	339.10	125.30	NO_D	16.70	NO_D

Tabla 49. Estación climatológica 15108 Santa María del Monte

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1962	NO_D	NO_D	NO_D	105.00	84.50	98.50	116.50	178.10	165.00	105.00	15.00	10.00
1963	0.00	0.00	47.00	29.00	67.00	173.00	212.50	159.00	106.00	163.50	0.00	5.00
1964	42.50	3.00	3.00	48.00	113.00	134.50	133.00	81.50	154.00	73.50	34.00	15.00
1965	9.50	25.50	6.00	56.50	79.50	146.00	167.20	258.60	95.00	65.50	20.50	11.00
1966	3.50	2.50	61.00	34.50	48.50	124.00	196.00	187.00	72.50	71.00	0.00	15.00
1967	53.50	1.00	34.50	42.50	61.50	156.50	188.00	209.50	153.50	58.00	19.00	9.00
1968	1.50	21.00	23.50	47.50	58.00	156.00	204.50	199.00	137.50	57.00	5.00	11.50
1969	7.00	0.00	3.50	0.00	34.50	89.50	116.50	283.00	169.40	42.00	0.00	0.00
1970	3.50	4.00	0.00	3.00	77.50	117.20	167.00	173.50	164.50	64.50	6.00	0.00
1971	6.00	0.00	55.50	30.00	94.50	170.00	118.00	110.50	169.00	60.00	2.00	5.00
1972	0.00	0.00	17.50	75.50	102.50	192.50	172.00	122.50	126.00	78.00	16.80	5.00
1973	0.00	0.00	0.00	43.00	152.50	122.50	173.90	204.00	NO_D	77.00	20.00	2.00
1974	4.50	10.50	28.50	29.50	23.50	150.00	178.00	113.00	83.50	23.50	15.50	10.00
1975	24.50	16.50	0.00	4.00	123.50	126.00	179.00	148.00	117.50	43.50	5.00	0.00
1976	6.00	3.00	16.50	61.50	54.50	111.50	157.10	149.50	121.50	120.90	13.00	19.00
1977	4.00	15.50	9.00	27.50	104.00	174.50	159.00	170.00	104.50	77.00	4.00	17.00
1978	10.00	28.50	35.50	9.50	49.00	162.00	239.50	147.00	131.00	69.50	14.00	13.00
1979	0.00	11.40	6.00	20.00	107.50	125.00	193.00	94.50	145.00	3.50	0.00	65.50
1980	124.50	1.00	0.00	40.80	87.00	114.00	147.50	205.50	107.00	72.00	11.50	5.00
1981	46.50	33.50	2.50	44.50	97.00	178.50	141.00	149.00	120.00	55.40	45.50	4.50
1982	0.00	17.50	6.00	41.50	147.00	70.50	169.40	103.30	108.50	64.80	7.30	13.10
1983	NO_D	NO_D	26.80	0.00	54.80	110.70	209.60	211.10	129.40	32.60	18.20	25.80
1984	7.30	0.00	2.50	0.00	100.40	210.50	159.30	133.70	186.50	61.80	2.20	0.00
1985	0.00	7.60	21.50	32.90	67.10	286.30	109.20	103.50	138.80	79.30	18.00	3.00
1986	0.00	0.00	0.00	76.80	148.60	229.40	99.80	72.20	52.90	105.20	18.00	11.80
1987	0.00	11.80	12.20	36.50	29.90	170.30	215.50	117.70	94.40	4.70	21.20	0.00
1988	6.50	2.20	73.50	3.50	24.30	88.00	1.50	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

1989	1.50	0.00	14.50	34.50	0.00	165.70	144.60	143.60	184.20	48.70	0.00	4.00
1990	13.50	7.30	11.50	54.20	136.20	161.40	178.20	130.00	119.50	126.30	0.00	19.20
1991	0.00	8.00	2.50	0.00	11.00	184.80	136.00	184.50	147.70	163.80	10.00	8.00
1992	107.50	34.10	0.00	29.50	100.60	75.70	152.50	142.00	71.90	65.50	26.00	17.50
1993	2.00	10.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	7.00	0.00
1994	6.50	0.00	0.00	45.50	42.00	159.80	70.70	128.20	80.50	39.80	0.00	0.00
1995	0.00	2.50	0.00	68.60	141.90	66.30	116.20	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	27.20
1996	1.50	0.00	0.50	9.00	80.00	48.50	109.60	36.10	188.70	70.10	8.90	50.30
1997	12.50	11.00	65.60	69.80	79.70	53.30	47.50	194.60	82.50	76.00	33.30	38.30
1998	38.90	3.50	0.00	0.00	1.00	57.10	219.20	204.40	194.80	146.10	0.00	0.00
1999	0.00	2.00	11.20	3.50	45.10	184.70	275.60	42.20	8.70	36.60	6.00	11.70
2000	0.50	0.00	0.00	11.80	101.80	185.90	84.50	99.90	148.70	75.90	109.50	24.00
2001	5.60	7.10	35.00	51.90	176.60	232.20	226.80	180.20	113.90	3.10	0.00	10.90
2002	27.70	10.40	10.30	11.80	36.20	141.20	147.80	166.30	145.70	135.40	43.70	7.90
2003	0.00	0.00	22.30	40.00	45.60	430.10	197.70	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 50. Estación climatológica 15130 Presa Valle de Bravo

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1969	4.50	0.00	5.40	0.00	16.40	126.00	164.40	280.40	202.90	69.90	5.70	4.40
1970	2.50	10.80	0.00	0.00	3.00	204.40	204.30	184.80	156.10	68.70	20.60	0.00
1971	1.50	0.00	24.50	4.90	54.40	179.80	236.70	198.20	270.40	112.50	28.70	4.80
1972	0.00	2.10	1.30	38.20	84.70	212.90	174.30	160.90	140.90	70.40	31.60	0.00
1973	1.10	0.00	0.00	12.20	108.60	138.40	181.90	165.30	185.80	99.20	8.90	0.00
1974	2.70	8.30	6.90	6.40	31.00	197.00	251.00	121.20	112.80	29.10	14.90	0.00
1975	57.60	0.00	0.00	0.00	107.20	168.40	234.80	214.20	151.40	45.10	NO_D	0.00
1976	0.00	10.20	5.50	10.80	11.90	95.30	204.60	NO_D	156.10	181.60	71.30	70.70
1977	3.80	0.30	0.00	7.60	86.30	165.60	98.50	127.60	149.90	42.00	1.30	2.90
1978	5.50	16.00	3.90	0.00	18.90	173.10	186.00	202.80	218.10	108.90	20.60	15.60
1979	0.00	11.70	0.00	5.80	74.70	118.90	162.60	192.40	98.90	18.00	0.00	41.10
1980	224.70	0.00	0.20	19.90	20.20	136.70	194.10	155.50	191.20	110.90	12.50	0.00
1981	44.30	11.90	0.20	19.80	25.20	179.80	171.20	236.80	143.40	143.10	7.00	0.10
1982	0.00	24.80	0.00	2.00	94.80	83.00	168.00	100.70	150.30	68.60	5.40	13.00
1983	33.60	23.20	14.40	0.00	57.70	143.50	198.80	117.30	148.30	33.40	20.20	6.90
1984	3.70	0.00	0.50	0.00	67.20	153.00	238.30	202.00	146.60	99.70	0.10	0.00
1985	0.00	0.00	1.00	0.30	21.70	261.50	172.50	163.40	113.10	115.40	21.90	9.30
1986	0.00	NO_D	0.00	4.60	76.30	166.40	103.40	85.10	145.30	172.00	24.60	21.30
1987	0.00	3.70	0.00	10.80	11.60	203.30	215.00	208.80	106.30	3.30	20.10	0.00
1988	0.30	0.00	46.80	0.00	15.50	138.10	185.00	324.10	160.90	43.70	0.00	0.00
1989	0.00	0.00	0.00	0.00	19.40	199.50	191.80	182.40	181.50	60.10	34.80	41.30
2002	32.30	6.00	0.00	47.40	51.40	138.50	106.00	129.20	137.90	73.20	28.20	0.00
2003	4.00	0.00	0.00	8.00	2.50	304.20	208.30	120.30	212.60	86.20	18.30	4.00
2005	7.00	4.60	32.50	0.00	2.00	126.70	196.20	167.50	193.30	99.00	3.00	2.00

Tabla 51. Estación climatológica 15131 Villa de Allende

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1961	13.00	0.00	4.00	4.00	20.50	216.00	163.50	262.00	119.50	24.00	18.00	0.00
1962	0.00	0.00	0.00	40.00	62.00	159.50	101.50	150.00	141.50	49.50	26.00	23.50
1963	0.00	0.00	10.50	0.00	59.50	247.00	184.50	127.50	143.00	106.00	0.00	0.00
1964	49.00	0.00	6.00	0.00	121.00	222.00	238.00	80.20	124.00	50.50	79.50	34.00
1965	7.50	37.50	0.00	58.50	95.00	244.00	130.00	207.50	132.50	51.00	61.00	3.00
1966	30.50	14.50	77.50	36.50	68.50	141.50	227.50	231.00	91.00	123.50	2.50	21.50
1967	147.50	3.00	18.00	44.00	85.50	173.80	219.50	238.50	294.50	84.00	51.50	38.00
1968	0.00	41.00	25.50	4.50	96.00	165.00	233.00	150.50	109.00	61.50	33.00	25.00
1969	10.50	0.00	12.50	0.00	26.00	82.50	186.50	222.00	152.50	91.50	20.00	5.00
1970	0.00	20.00	0.00	0.00	47.50	177.50	255.00	180.00	222.50	64.00	14.50	0.00
1971	12.00	0.00	67.00	8.50	91.50	157.00	225.50	226.50	191.50	30.00	114.50	16.00
1972	1.00	0.00	12.00	6.00	77.30	141.00	157.50	149.00	208.00	58.00	18.00	0.00

1973	0.00	0.00	0.00	48.00	124.00	190.50	196.00	277.50	140.00	106.00	33.00	2.00
1974	11.00	14.00	13.00	17.00	43.00	179.00	184.50	112.00	171.50	65.00	20.00	0.00
1975	77.50	14.50	0.00	0.00	151.00	246.50	263.00	185.00	152.50	33.00	27.00	0.00
1976	1.00	8.00	1.50	41.00	29.20	160.00	254.00	213.70	148.70	178.40	43.70	20.20
1977	7.00	9.80	0.00	6.80	67.50	228.40	178.60	194.50	106.90	42.20	12.00	4.50
1978	10.30	47.90	16.00	7.50	27.10	227.10	229.70	204.70	164.20	129.10	1.50	19.60
1979	0.00	16.10	0.00	26.90	101.30	120.90	NO_D	175.00	134.80	23.50	0.00	63.70
1980	232.80	0.50	2.70	38.80	72.80	160.80	142.50	240.70	137.30	73.10	67.00	0.10
1981	74.80	38.00	2.70	63.90	79.10	160.60	206.00	169.70	73.20	100.00	27.70	5.10
1982	0.00	34.30	6.00	9.70	63.60	108.80	228.30	124.20	54.50	123.40	8.40	14.30
1983	30.90	23.10	23.30	0.00	54.20	59.50	257.10	161.80	151.40	52.00	54.20	8.70
1984	10.10	3.70	7.70	0.00	88.50	164.10	294.30	199.30	143.80	101.40	8.40	0.20
1985	1.00	0.60	10.80	4.10	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 52. Estación climatológica 15160 Santiago del Monte

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1969	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	190.20	47.60	2.00	6.00
1970	0.00	17.10	0.00	0.00	46.40	213.80	107.30	139.20	198.20	57.00	9.00	5.00
1971	14.00	10.00	41.60	20.00	78.70	183.40	214.00	133.10	268.10	98.50	6.00	8.10
1972	0.00	0.00	17.10	29.20	48.70	185.80	113.70	144.70	168.30	82.90	9.70	4.00
1973	0.50	4.50	0.00	47.00	95.90	133.00	234.00	245.00	109.00	119.50	20.50	2.50
1974	10.00	14.10	21.50	41.00	56.00	132.50	187.00	118.00	138.00	62.00	34.00	3.00
1975	75.90	2.00	0.00	1.00	120.00	161.70	197.20	192.10	58.20	59.20	3.50	0.00
1976	1.20	0.00	10.00	32.40	51.30	160.90	171.30	157.00	172.70	135.30	15.50	41.30
1977	4.50	10.50	3.50	24.50	116.80	195.90	141.90	176.20	157.90	38.40	3.70	26.30
1978	7.20	42.60	20.50	17.90	73.10	181.80	268.40	7.20	110.70	101.00	14.70	9.50
1979	0.00	23.90	4.00	29.30	102.70	87.30	187.00	207.00	109.70	16.90	0.30	51.00
1980	194.90	0.00	0.00	109.20	51.30	101.90	151.70	239.30	139.00	118.90	79.60	0.00
1981	50.90	47.80	0.50	58.90	105.50	194.60	209.70	129.00	126.50	188.80	18.80	5.20
1982	0.00	13.60	8.50	30.00	73.10	59.60	178.50	153.10	74.70	92.30	3.00	12.90
1983	27.40	46.10	31.30	0.00	37.40	95.00	222.60	143.50	124.50	64.60	46.20	11.20
1984	NO_D	8.00	1.70	0.00	87.70	166.70	304.30	214.30	181.40	115.10	4.30	4.90
1985	0.00	18.50	2.00	28.50	94.90	231.60	185.70	159.90	169.10	104.50	20.20	NO_D
1986	0.00	25.20	0.00	NO_D	159.80	224.90	170.10	112.80	90.60	100.00	16.90	31.00
1987	NO_D	NO_D	NO_D	72.60	41.90	182.00	245.10	175.30	86.80	10.30	50.20	0.00
1988	7.00	15.50	59.80	1.00	3.50	188.40	240.70	135.60	166.90	45.10	16.70	0.00
1989	1.20	5.70	0.00	9.90	50.10	94.80	173.50	185.60	143.30	NO_D	NO_D	NO_D
1990	17.10	13.00	22.60	34.10	72.60	139.90	198.90	208.40	201.50	114.80	2.00	NO_D
1991	9.20	23.90	2.00	0.00	70.50	245.80	184.50	236.80	182.60	NO_D	42.90	29.10
1992	183.10	53.90	NO_D	NO_D	224.30	75.60	234.80	200.70	133.50	92.80	26.20	7.90
1993	NO_D	NO_D	0.00	0.00	0.00	151.80	186.00	153.50	204.20	33.80	8.90	0.00
1994	13.70	0.00	1.00	14.80	59.20	236.50	143.40	135.10	200.00	55.10	6.70	4.80
1995	17.00	9.50	3.20	63.20	91.60	247.30	202.50	129.50	92.50	33.00	37.90	59.20
1996	0.00	0.00	0.00	22.00	49.90	152.20	178.60	87.00	124.80	63.20	2.70	24.10
1997	5.10	0.00	81.20	36.60	87.30	196.50	205.50	126.30	123.20	24.40	6.30	10.80
1998	21.20	1.90	0.00	0.00	0.00	158.20	281.60	134.70	279.80	68.90	23.50	0.00
1999	7.40	0.00	1.90	1.20	61.40	162.60	173.20	198.50	79.70	32.20	3.30	1.60
2000	0.00	9.00	0.00	15.60	136.20	239.90	172.10	187.80	151.00	57.40	6.40	9.40
2001	8.10	2.60	49.70	163.20	97.50	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 53. Estación climatológica 15165 Valle de Bravo

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1961	13.00	0.00	0.00	0.00	0.00	204.00	265.00	179.00	196.00	51.00	10.00	0.00
1962	0.00	0.00	0.00	26.00	41.30	227.70	226.70	171.10	312.40	NO_D	12.50	0.00
1963	0.00	0.00	0.00	0.00	29.60	121.80	192.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1964	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	17.90	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1965	1.50	17.00	0.00	12.00	25.80	160.40	190.00	276.50	126.30	115.50	23.00	0.10
1966	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	111.10	173.40	339.60	147.20	155.00	0.00	19.00

1967	78.00	0.00	2.00	0.00	100.50	293.00	221.50	235.60	287.50	22.20	NO_D	0.30
1968	NO_D	NO_D	1.70	1.00	5.10	15.40	24.10	22.80	23.60	11.10	0.20	2.20
1969	1.00	2.50	4.00	0.00	NO_D	110.00	256.90	319.00	214.50	76.00	4.00	6.00
1970	3.00	7.80	NO_D	0.00	53.50	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1972	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	44.00	0.00
1973	1.50	0.00	0.00	31.00	116.50	173.00	342.00	234.00	172.50	203.50	32.00	1.50
1974	12.50	8.00	10.00	10.00	42.50	255.00	258.50	165.00	163.50	47.00	11.00	0.00
1975	73.00	1.00	0.00	0.00	100.50	219.50	288.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1976	0.00	12.00	5.00	9.50	24.00	167.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 54. Estación climatológica 15174 Palos Mancornados

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1964	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	304.10	220.50	144.80	183.50	87.70	30.70	94.60
1965	5.20	28.40	0.00	29.50	69.60	88.90	58.80	160.20	81.30	40.70	17.00	18.00
1966	0.00	0.00	18.30	4.00	21.00	64.80	65.90	97.20	42.00	55.00	0.00	4.00
1967	10.00	6.00	13.00	52.60	64.50	85.30	84.00	131.20	88.00	31.00	16.00	0.00
1968	0.00	16.00	8.40	26.00	117.00	171.60	176.00	95.00	85.50	55.00	2.80	38.50
1969	19.00	0.00	6.50	0.00	37.60	61.60	108.20	212.50	147.50	21.00	2.10	5.70
1972	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	63.00	105.00	NO_D	NO_D	57.20	2.80
1973	5.80	4.00	0.00	62.40	135.80	225.40	201.10	283.30	139.10	137.80	49.70	4.70
1974	10.00	17.00	38.40	27.80	52.90	208.80	226.90	178.40	163.50	36.60	18.20	2.60
1975	128.70	0.00	0.00	0.00	96.40	138.60	413.00	168.20	125.10	92.70	8.00	0.00
1976	0.00	27.00	5.40	54.30	39.70	90.90	329.10	180.10	180.50	141.20	48.00	75.00
1977	6.50	1.00	2.50	26.20	125.50	180.40	239.20	211.90	113.20	51.70	21.80	40.30
1978	18.60	53.60	26.00	12.30	41.50	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	31.20
1979	0.00	27.00	0.00	20.80	68.40	88.20	184.70	161.80	109.00	20.20	11.50	73.10
1980	231.30	0.00	2.20	31.40	88.00	157.80	150.50	224.80	171.40	95.80	66.60	1.50
1981	57.00	77.20	5.50	25.60	77.00	215.30	201.20	132.90	119.10	103.80	7.50	7.20
1982	0.00	17.50	0.00	46.40	97.80	78.10	170.20	224.00	118.50	59.10	1.60	30.00
1983	56.80	40.10	NO_D	0.00	53.90	100.70	225.40	120.10	177.60	49.70	38.50	3.80
1984	23.00	7.00	1.70	0.00	139.40	208.60	233.80	172.20	212.00	123.70	2.00	3.80
1985	1.40	5.80	12.50	11.50	101.00	263.40	185.50	130.50	98.50	42.20	38.40	14.00
1986	0.00	3.30	NO_D	2.10	5.60	135.30	176.50	165.40	87.20	156.90	48.10	3.00
1990	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	316.60	173.90	141.70	43.10	6.30	0.00
1992	93.50	24.50	0.00	47.50	159.50	108.50	295.00	273.50	324.40	326.00	43.50	NO_D
1993	16.50	15.00	0.00	3.50	0.00	250.60	188.80	156.50	142.50	29.50	3.00	0.00
1994	0.00	0.00	0.00	32.60	81.00	183.00	175.00	144.00	168.00	221.50	0.00	0.00
1995	0.00	11.00	14.00	30.00	11.50	118.50	129.80	120.50	85.50	43.80	14.50	21.00
1996	0.00	0.00	0.00	11.00	50.50	153.60	128.50	133.50	184.00	76.00	0.00	16.00
1997	19.50	5.00	99.00	23.00	96.00	131.50	179.00	191.00	118.00	84.00	35.50	24.50
1998	28.50	1.00	0.00	0.00	2.00	130.90	176.50	163.50	283.60	110.50	20.50	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	2.00	17.00	140.60	155.00	245.80	76.50	96.00	2.00	2.00
2000	0.00	0.00	0.00	29.00	58.50	51.00	95.50	142.00	91.00	82.50	15.00	NO_D
2002	35.50	16.00	8.00	17.00	87.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 55. Estación climatológica 15201 Trojes

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1974	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	133.40	163.90	150.20	18.10	25.10	9.80
1975	48.90	0.20	10.00	20.70	71.80	196.20	50.30	123.20	151.20	62.00	2.70	0.00
1976	0.00	2.50	23.40	46.00	65.50	96.60	241.90	188.00	168.50	198.30	34.10	29.10
1977	6.10	12.50	37.60	32.90	60.60	145.20	100.50	149.30	127.60	54.10	16.40	21.90
1978	0.00	17.90	24.40	30.20	23.10	142.20	195.30	113.00	96.70	NO_D	NO_D	NO_D
1979	NO_D	NO_D	5.30	17.10	76.10	133.30	128.20	140.60	109.70	20.90	8.60	31.70
1980	76.50	16.40	19.60	18.90	98.30	80.50	132.30	196.80	87.90	68.20	25.30	0.60
1981	27.60	21.40	0.90	56.80	90.20	125.00	137.00	138.40	126.30	62.50	9.80	14.90
1982	0.00	30.00	39.60	51.20	72.00	74.20	127.10	153.40	120.10	61.20	0.00	14.70
1983	16.80	6.50	11.50	0.00	19.60	90.50	175.20	199.90	87.10	40.60	25.60	9.40
1984	13.00	10.70	0.00	0.50	50.70	151.20	168.80	133.20	115.30	110.80	1.70	12.40

1985	7.50	5.20	30.50	30.60	39.60	197.80	91.20	126.50	117.70	NO_D	20.90	43.90
1986	0.00	0.00	0.00	73.90	139.90	238.20	193.60	73.40	77.10	65.60	7.20	5.50
1987	0.00	5.30	10.00	19.70	NO_D	122.30	203.20	132.50	82.50	0.00	21.00	NO_D
1988	5.00	1.50	48.30	15.10	20.00	107.80	203.00	175.20	99.90	11.40	44.00	7.80
1989	6.40	0.00	13.90	19.10	23.90	89.50	169.80	190.50	101.70	73.20	15.90	NO_D
1990	27.10	11.50	2.00	30.30	82.60	131.10	204.60	188.70	110.50	77.60	12.90	9.80
1991	2.20	1.00	10.00	17.40	71.80	244.90	179.70	146.70	105.30	97.50	10.00	3.50
1992	27.80	5.80	0.00	8.00	85.20	56.50	194.70	235.20	163.50	29.50	45.60	0.00
1995	26.10	43.40	3.70	13.30	74.00	253.70	158.90	153.70	60.00	8.50	56.80	44.50
1996	0.00	0.00	0.30	4.20	60.70	117.50	171.00	90.40	76.70	94.50	4.80	40.20
1997	32.50	3.90	30.60	42.80	115.20	115.60	122.60	141.70	143.70	42.20	6.50	12.90
1998	10.50	0.00	0.00	0.00	7.70	86.00	233.00	181.40	299.30	23.40	16.60	7.30
1999	0.70	4.50	18.00	4.00	35.10	184.40	92.60	245.80	71.10	51.70	12.90	0.40
2000	0.00	0.10	0.20	28.60	168.30	283.80	138.60	89.20	195.60	62.30	36.60	2.80
2001	13.30	7.30	25.30	67.40	103.80	112.60	157.90	186.70	82.60	11.50	4.80	13.70
2002	14.80	11.40	23.00	29.60	15.90	90.80	158.90	174.50	222.10	79.50	32.10	NO_D
2003	NO_D	0.00	7.20	22.20	61.10	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Tabla 56. Estación climatológica 15241 San Pedro Tenayac

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1978	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	12.00
1979	0.00	5.00	0.00	3.00	48.00	137.80	194.60	152.00	178.00	14.00	2.00	40.00
1980	113.00	0.00	0.00	6.00	3.30	145.60	155.60	156.50	96.50	78.70	7.50	0.00
1981	44.10	15.60	0.00	16.00	12.30	207.70	188.80	138.00	175.00	93.90	25.00	0.00
1982	0.00	18.00	1.60	3.00	134.90	92.00	142.80	79.00	157.00	98.70	13.00	2.00
1983	20.60	20.00	7.00	0.00	42.20	130.60	261.10	158.50	217.00	80.50	40.90	4.00
1984	5.00	3.00	0.00	0.00	58.80	192.60	297.10	207.30	185.00	133.30	1.00	0.00
1985	0.00	0.00	21.00	0.00	31.00	373.00	240.00	221.00	143.00	117.00	34.10	12.00
1986	0.00	NO_D	0.00	15.00	104.00	233.00	106.20	125.50	221.60	107.60	48.00	0.00
1987	0.00	4.00	198.90	16.00	16.00	230.00	197.20	134.60	178.90	41.00	5.20	0.00
1988	0.00	0.00	36.60	0.00	165.30	0.00	212.80	239.40	231.10	101.40	20.90	5.00
1989	181.00	0.00	0.00	0.00	0.00	156.20	270.00	200.10	165.00	109.20	2.00	NO_D
1990	5.40	10.00	8.00	0.00	114.90	215.60	209.00	138.20	252.80	128.80	8.00	10.00
1995	12.00	0.00	0.00	33.00	0.00	191.00	199.20	249.60	135.50	26.30	49.40	25.90
1996	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	92.30	0.00	19.20
1997	2.00	0.00	33.60	7.00	66.00	242.40	153.20	180.20	190.10	97.20	79.70	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	238.70	157.60	171.20	261.10	152.40	79.30	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	47.00	130.60	93.50	228.80	226.40	180.90	18.30	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	65.20	181.70	186.40	129.50	210.70	126.40	25.00	NO_D

Tabla 57. Estación climatológica 15244 Muyeje

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1978	11.10	28.20	25.40	11.70	55.90	187.60	209.10	142.10	207.10	218.30	5.10	18.70
1979	3.20	28.60	6.20	15.30	28.10	115.20	192.40	130.50	156.90	3.80	17.70	25.40
1980	94.00	3.80	0.30	36.60	51.40	170.10	185.90	244.00	153.90	65.30	29.00	2.10
1981	45.30	18.50	13.80	47.30	75.80	233.00	219.40	166.80	74.00	114.10	5.90	32.40
1982	0.00	10.50	16.70	23.80	77.10	65.60	147.30	94.50	33.30	49.90	1.30	14.80
1983	34.30	12.00	7.80	0.00	70.20	43.80	319.20	186.90	186.10	27.30	22.90	7.90
1984	14.70	12.80	0.00	0.00	44.00	205.30	287.80	170.80	183.30	141.60	2.40	7.70
1985	7.80	5.80	9.10	48.90	64.40	152.20	244.70	147.50	67.10	37.90	14.30	2.70
1986	0.00	0.00	0.00	39.30	NO_D	294.70	78.70	124.40	114.30	72.80	11.20	2.30
1987	0.30	10.20	6.50	40.40	37.20	117.60	254.10	128.70	30.60	72.80	0.50	0.00
1988	9.30	8.00	35.50	1.90	40.80	38.50	75.90	180.10	75.50	46.70	5.70	0.00
1989	0.30	30.30	2.60	8.40	23.30	56.70	110.80	161.60	159.10	3.10	6.20	29.70
1990	7.10	26.60	1.40	22.60	74.50	52.80	166.40	161.50	134.60	124.40	18.20	21.40
1991	13.50	4.50	0.00	0.00	16.60	103.80	221.10	127.90	184.70	43.70	10.60	31.20
1992	109.50	9.00	0.30	20.30	88.80	35.80	338.60	196.20	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

1993	1.00	6.80	3.50	0.00	24.20	78.70	87.30	151.90	143.10	32.10	0.00	0.00
1994	4.20	0.00	9.60	61.80	11.80	308.10	94.00	459.70	56.30	24.90	12.60	0.00
1995	6.40	8.00	6.40	29.30	63.80	226.70	84.30	256.40	85.10	37.80	23.80	16.50
1996	0.00	1.90	0.00	9.90	6.80	71.50	123.70	120.60	151.70	95.10	0.00	2.60
1997	0.00	9.40	40.60	97.00	81.00	169.30	314.70	131.30	56.30	NO_D	7.10	4.30
1998	9.80	6.50	0.00	0.00	0.40	93.20	96.60	137.40	251.90	97.90	43.80	0.00
1999	0.00	9.40	0.30	0.20	16.40	160.20	162.00	200.40	76.50	105.80	4.50	13.80
2000	0.00	2.30	2.50	1.10	NO_D	179.70	99.80	153.90	90.70	22.40	25.10	9.70
2001	13.10	16.30	14.80	7.30	35.60	119.60	77.00	139.80	248.30	43.20	1.20	0.50
2002	43.70	9.20	7.50	15.40	10.90	112.80	297.70	112.80	132.50	127.00	NO_D	NO_D

Tabla 58. Estación climatológica 15276 San José del Contadero

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1980	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	34.50	8.60
1981	42.20	56.60	5.90	73.10	122.30	184.00	139.10	178.00	107.00	54.20	9.30	40.00
1982	30.00	176.90	2.00	36.80	109.30	113.30	146.10	84.50	150.30	18.30	NO_D	17.60
1983	NO_D	NO_D	28.00	0.00	31.90	122.10	228.30	NO_D	101.60	15.00	NO_D	8.00
1984	37.50	NO_D	5.50	0.00	132.90	138.10	159.60	113.10	219.20	30.40	2.30	0.00
1985	0.00	NO_D	12.10	31.90	101.20	238.40	189.50	118.90	104.10	NO_D	NO_D	NO_D
1986	0.00	32.50	7.00	NO_D	215.30	292.50	108.60	NO_D	NO_D	NO_D	30.00	0.00
1987	0.00	15.00	NO_D	43.90	50.00	149.00	145.30	156.10	103.70	95.70	NO_D	NO_D
1989	3.00	0.00	2.00	28.00	NO_D	122.20	217.20	144.40	295.50	NO_D	NO_D	NO_D
1993	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	1.20	158.30	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D
1994	0.00	0.00	1.00	47.80	73.50	206.80	97.60	168.30	132.00	78.20	15.70	2.00
1995	1.70	23.30	20.20	36.60	40.80	172.10	162.90	141.00	126.10	69.50	44.50	83.00
1996	0.00	5.70	0.00	NO_D	34.20	136.50	95.70	134.00	135.60	57.00	0.00	36.00
1997	0.00	0.00	0.00	10.60	1.20	25.20	NO_D	NO_D	NO_D	57.40	23.70	20.50
1998	80.00	0.00	0.00	0.00	2.50	87.40	253.80	397.20	177.50	92.30	102.60	18.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	31.50	219.60	NO_D	NO_D	95.00	37.70	0.00	12.00
2000	8.50	5.50	1.00	0.00	60.50	116.00	276.50	292.20	80.00	46.90	17.50	10.50
2001	NO_D	NO_D	0.00	124.50	420.90	381.20	263.90	151.00	68.80	8.50	8.90	29.70
2002	42.50	NO_D	NO_D	45.00	79.50	229.50	251.50	143.80	123.80	90.00	NO_D	24.00
2003	30.00	0.00	0.00	8.50	44.00	247.00	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D

Fuente: Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III, 2008)
NO_D: Dato no registrado por el operador.

Isoyetas generadas a partir de los datos de precipitación de las 14 estaciones climatológicas.

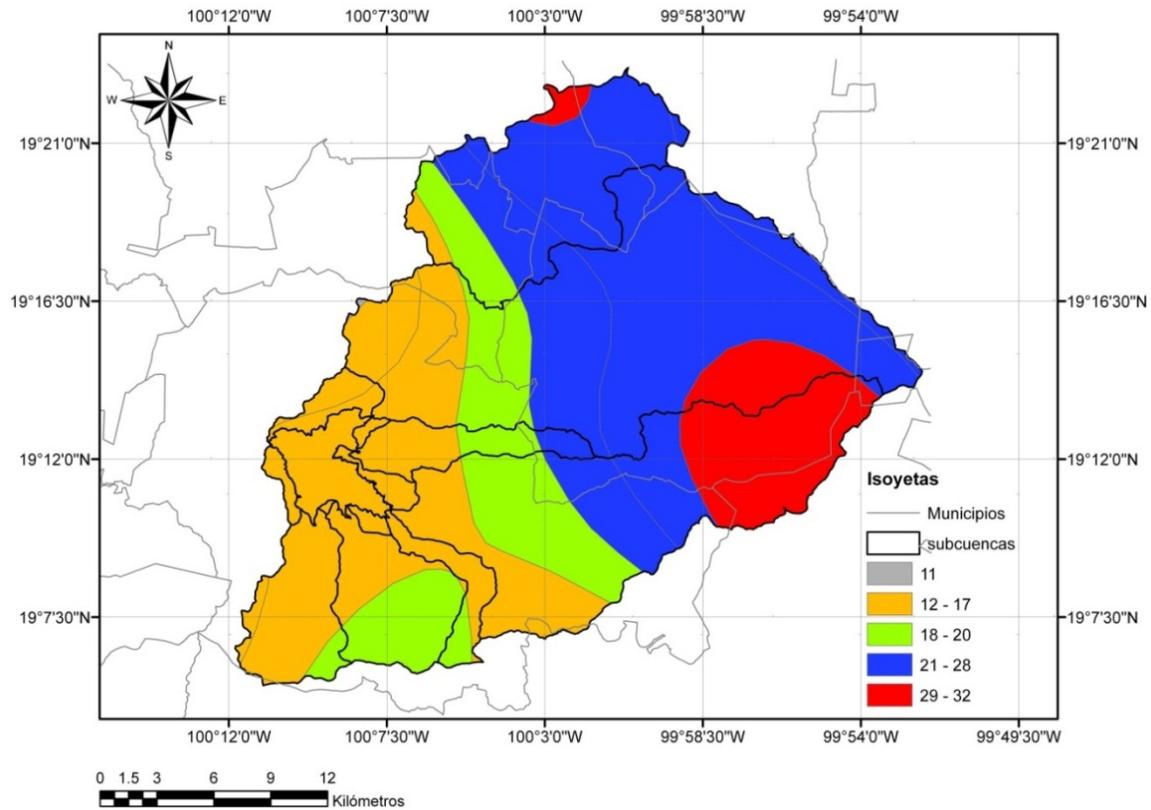


Figura 24. Isoyetas del mes de enero

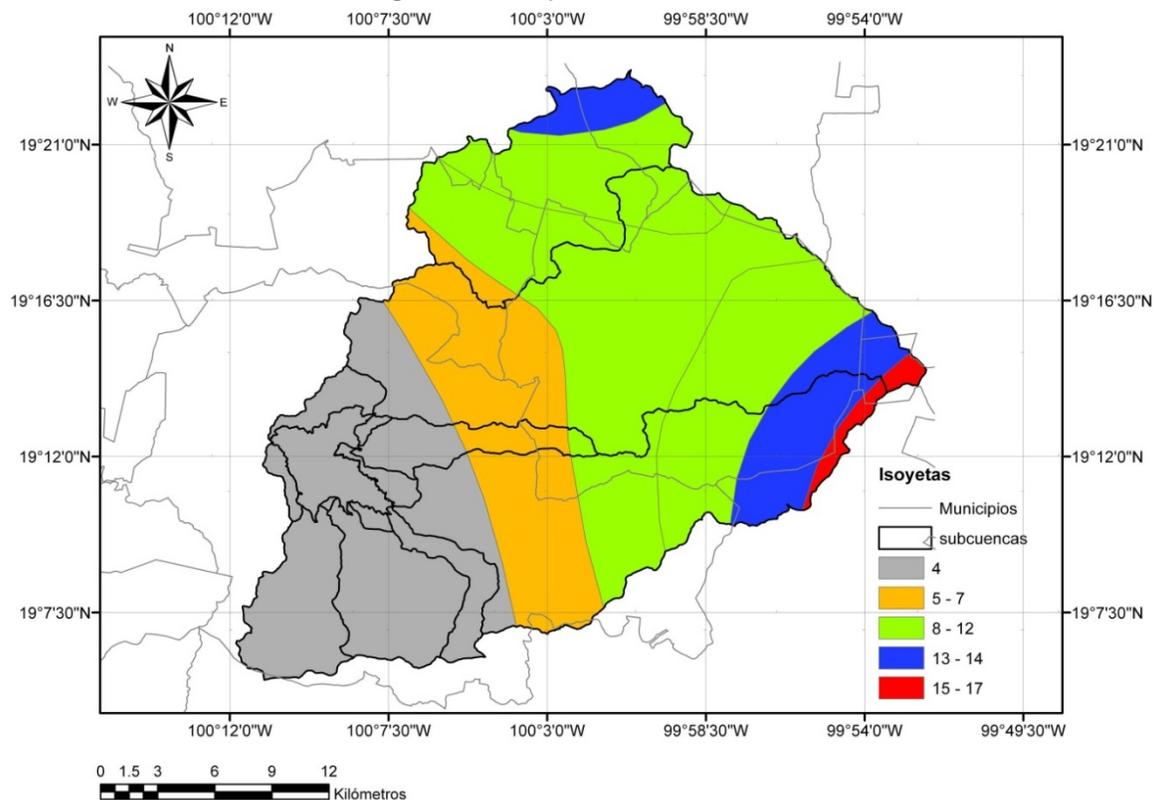


Figura 25. Isoyetas del mes de febrero

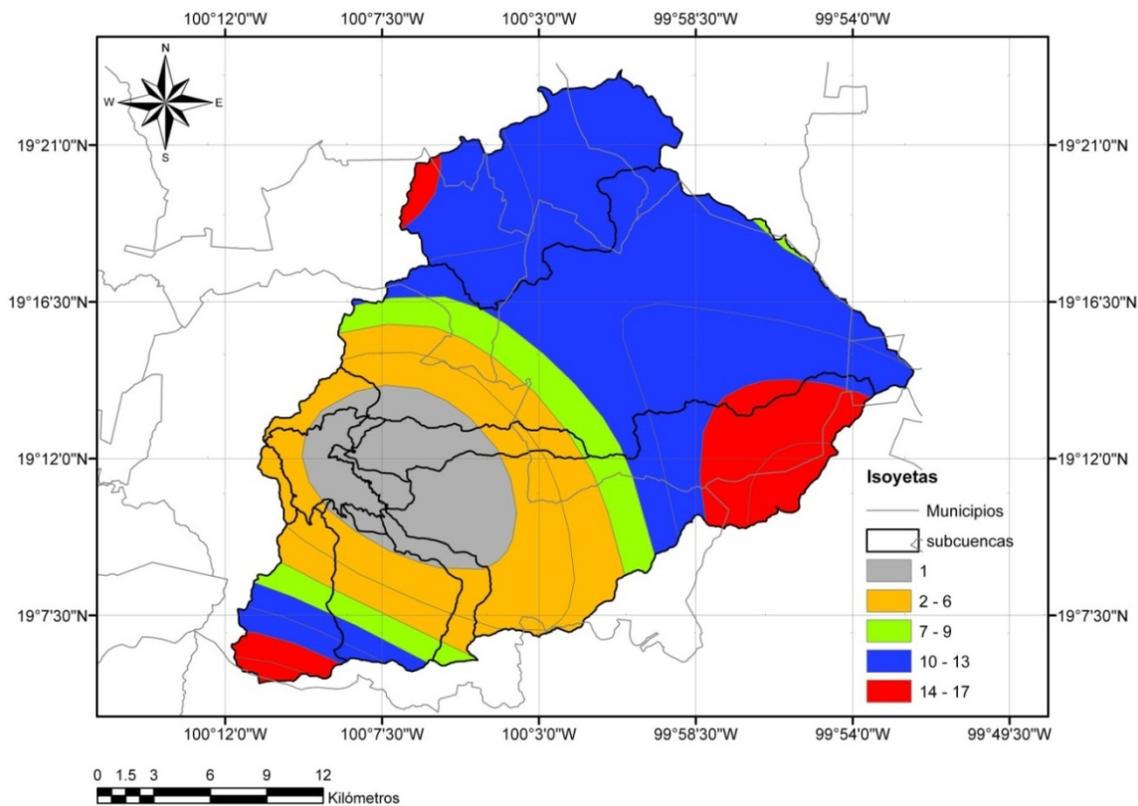


Figura 26. Isoyetas del mes de marzo

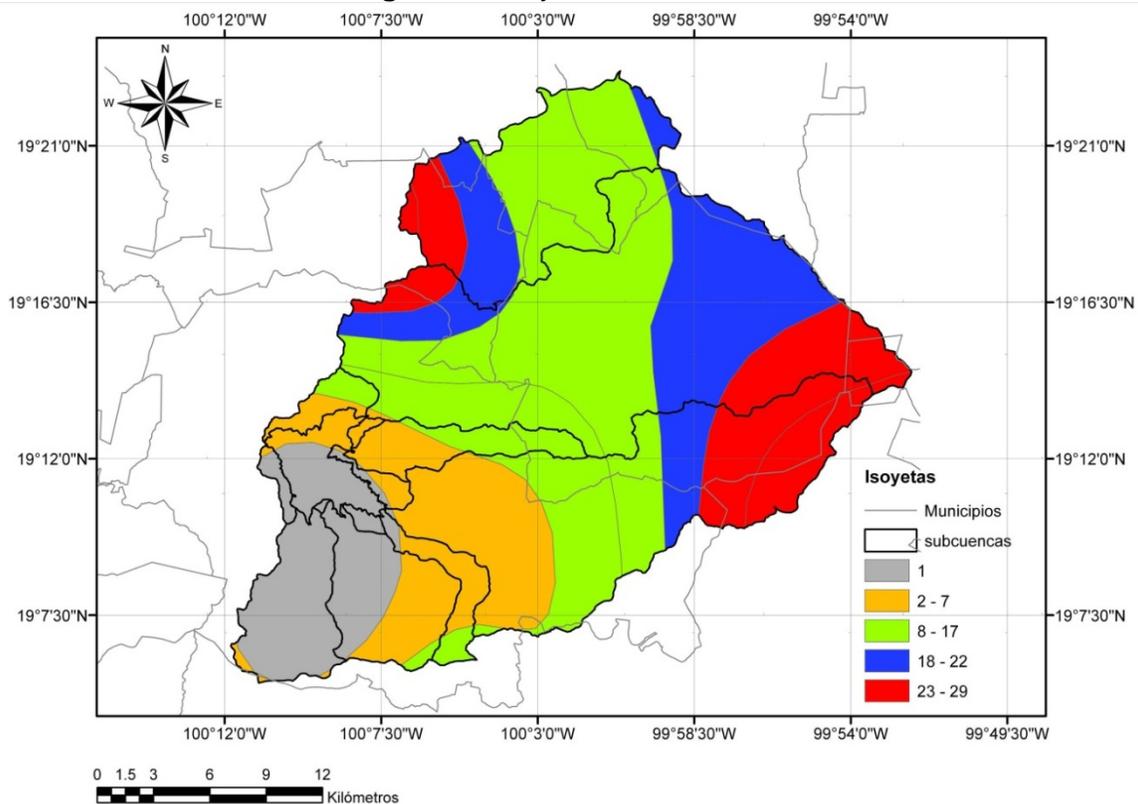


Figura 27. Isoyetas del mes de abril

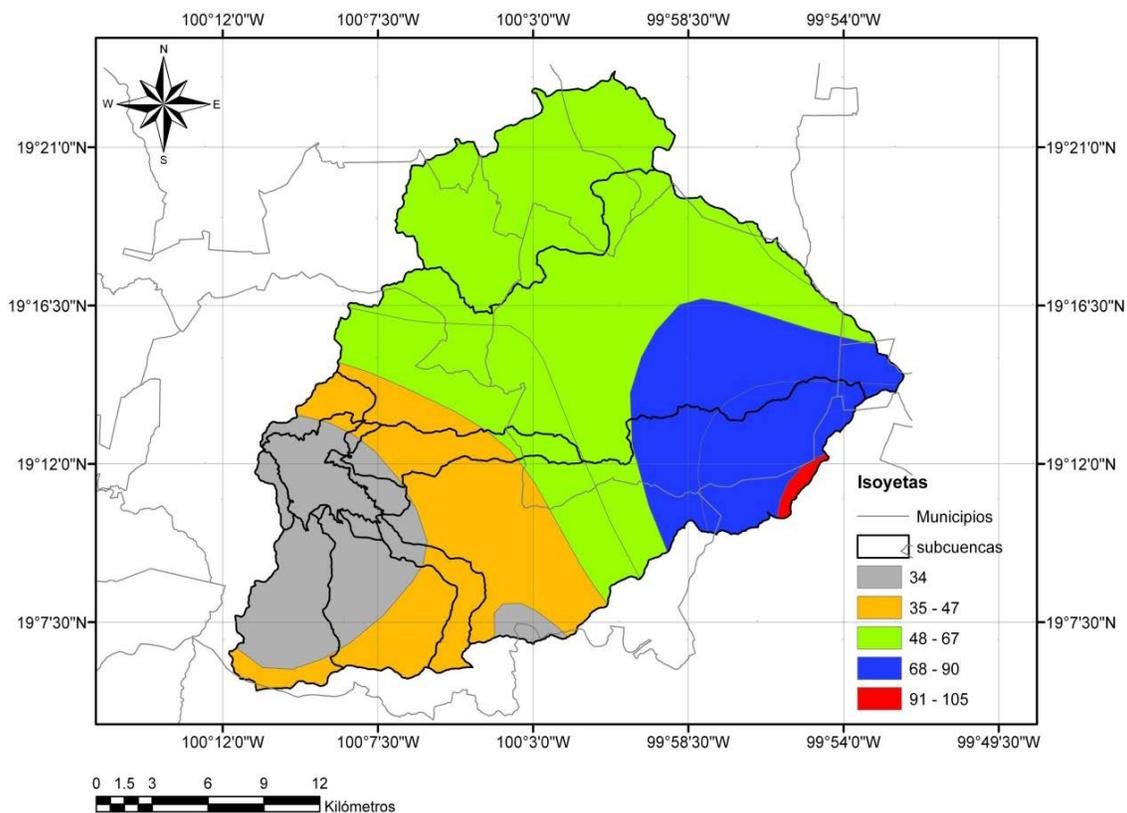


Figura 28. Isoyetas del mes de mayo

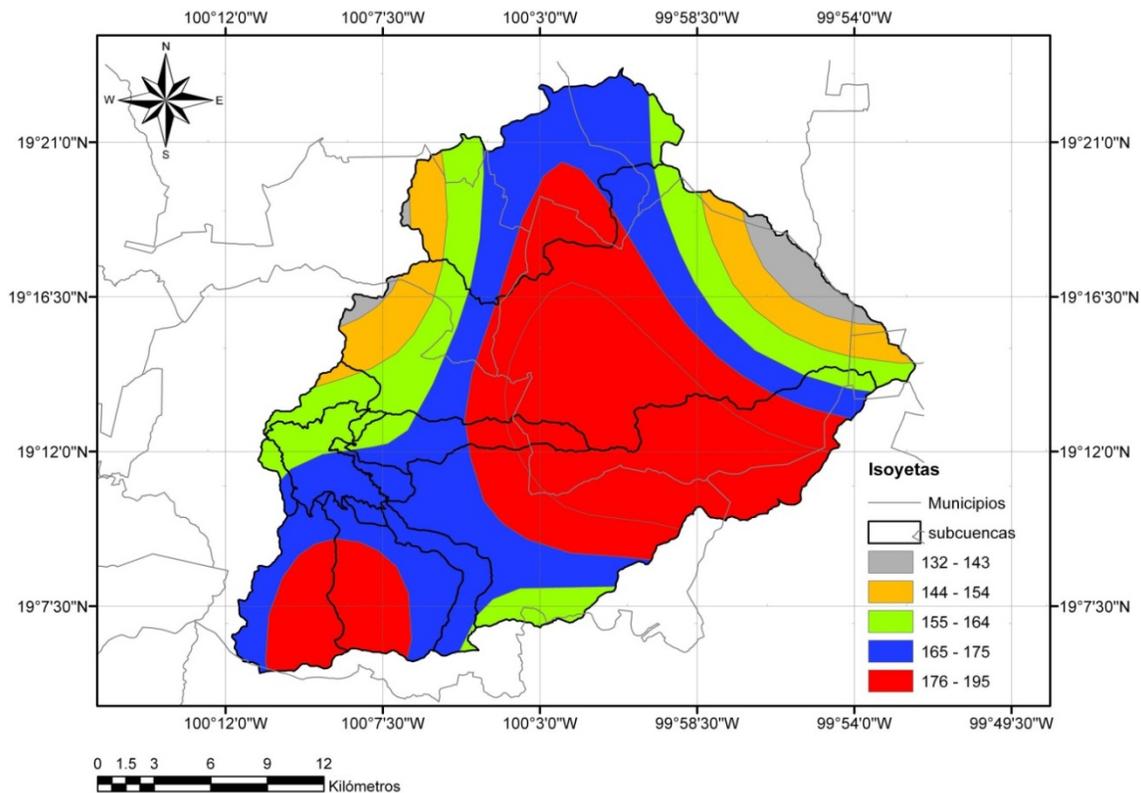


Figura 29. Isoyetas del mes de junio

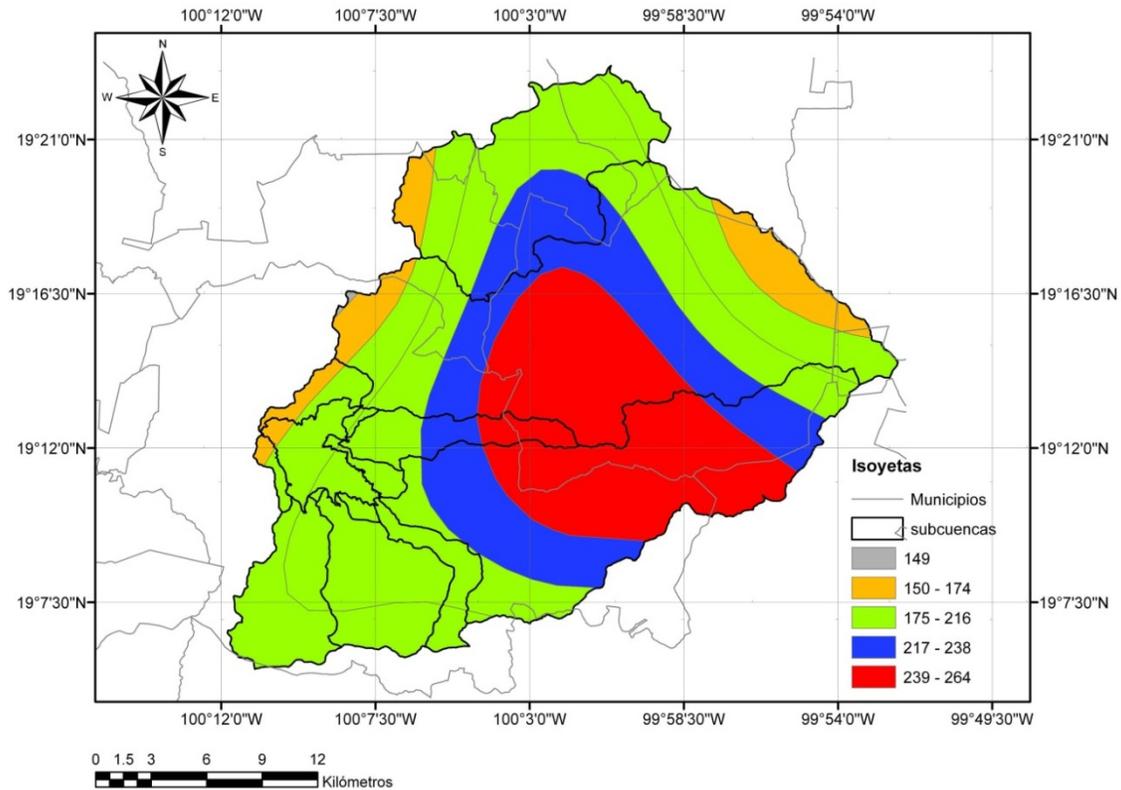


Figura 30. Isoyetas del mes de julio

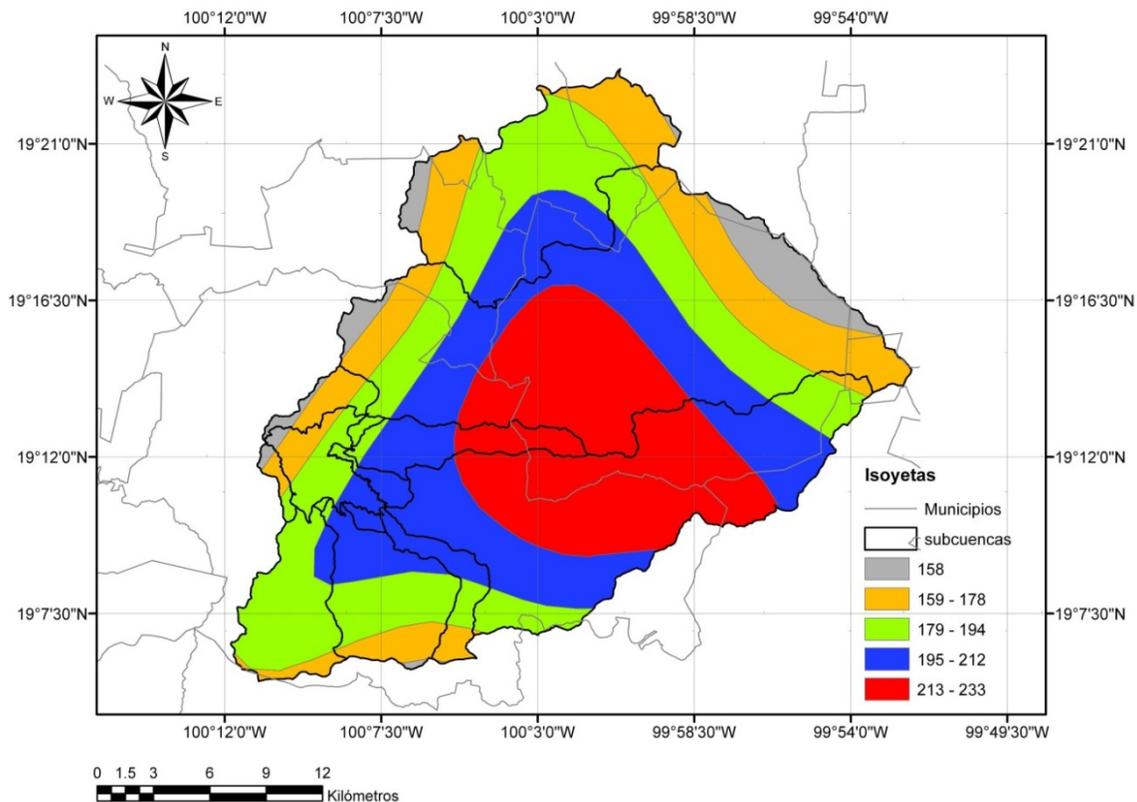


Figura 31. Isoyetas del mes de agosto

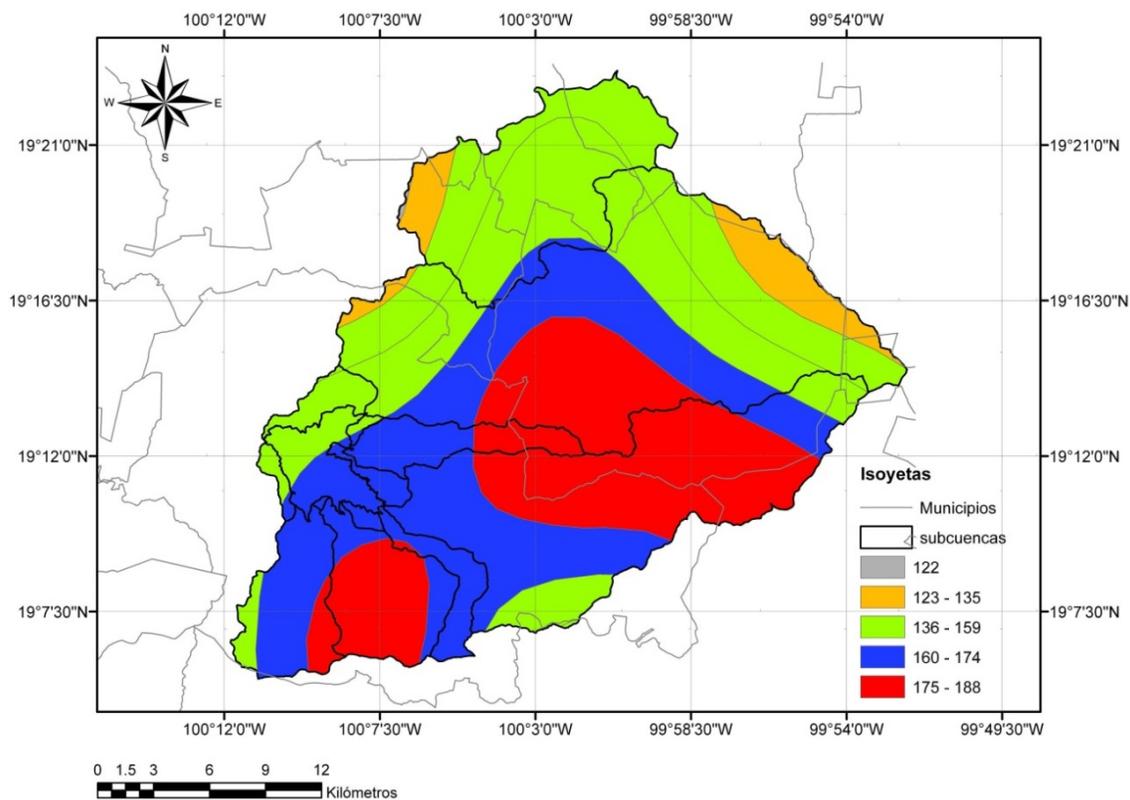


Figura 32. Isoyetas del mes de septiembre

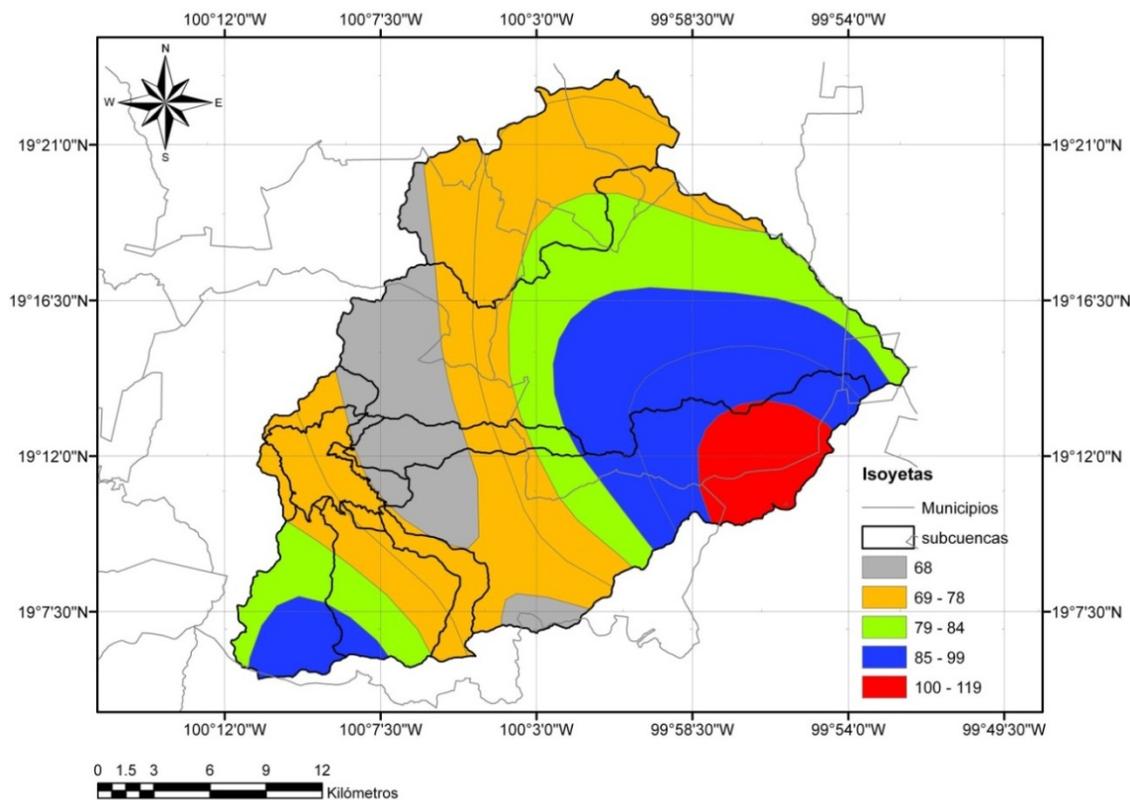


Figura 33. Isoyetas del mes de octubre

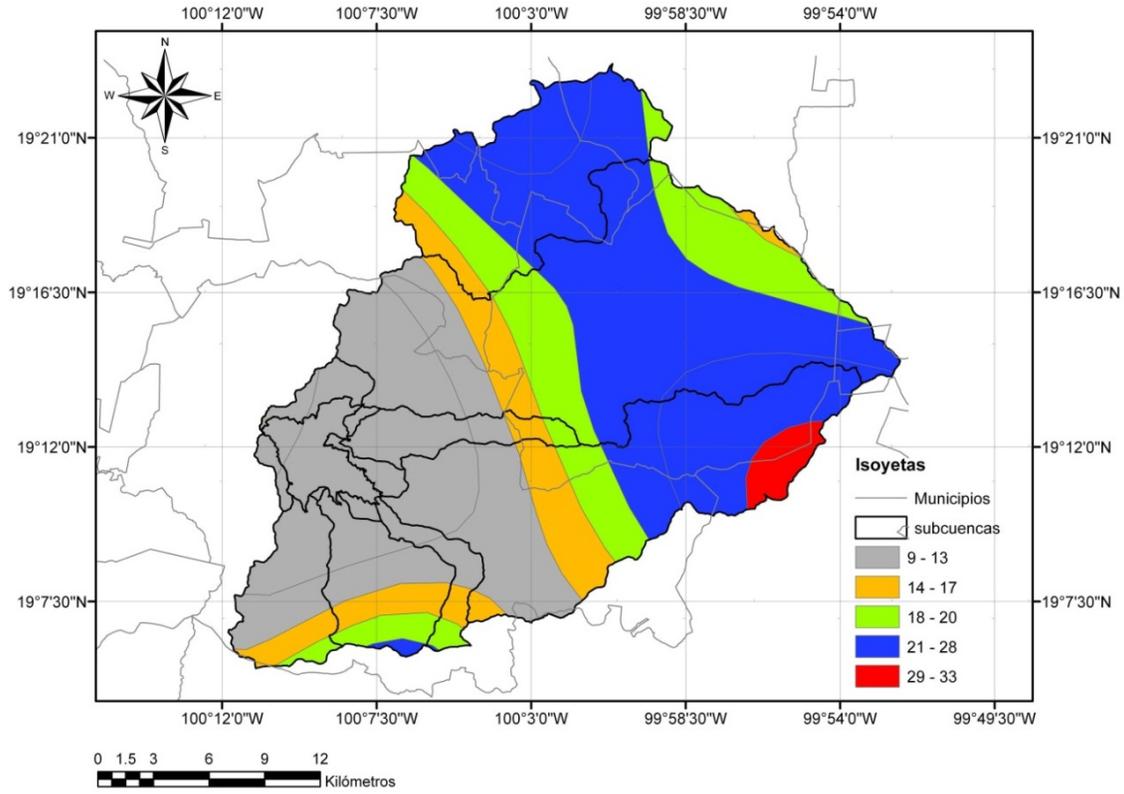


Figura 34. Isohyetas del mes de noviembre

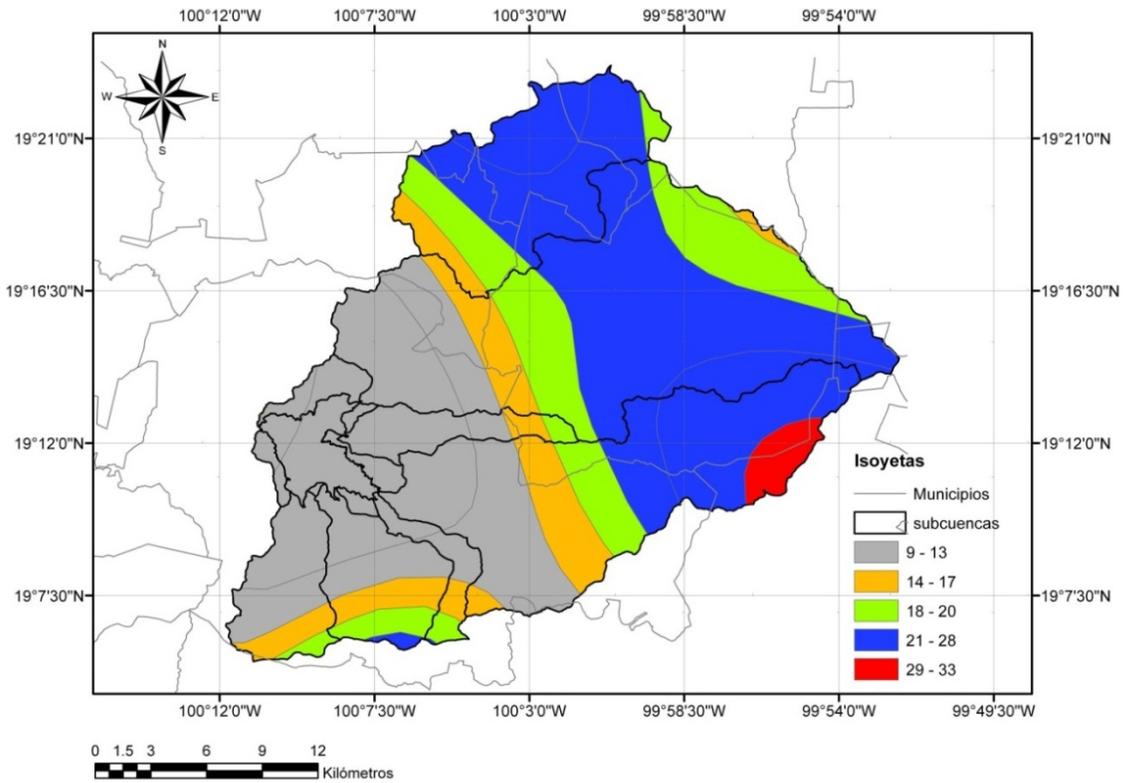


Figura 35. Isohyetas del mes de diciembre

Anexo V. Proyección de la carga externa en la presa Valle de Bravo año 2020

Con el objeto de comparar y utilizando la misma metodología de *estimación indirecta (modelación)*, se estimó el aporte de carga externas por fuente de contaminación en la presa Valle de Bravo para el año 2020; considerando las siguientes proyecciones:

- 1 Proyección de la población año 2020
- 2 Proyección de coberturas de alcantarillado sanitario y agua para consumo
- 3 Proyección del gasto de operación de PTAR-Amanalco
- 4 Proyección de uso de suelo
- 5 Proyección de las actividades porcícolas y trutícolas

Para las fuentes puntuales se estimó una población de 86 924 habitantes distribuida en 82 localidades en toda la cuenca (Conapo, 2006), con estos datos de población, dotación promedio estatal de agua potable por habitante del Estado de México (236 L/hab/d; CAEM, 2008), porcentaje de generación de agua residual (Conagua, 2007), proyección de porcentaje de cobertura de agua para consumo y alcantarillado sanitario (Valle de Bravo 90% de agua potable y 85% de drenaje sanitario y Amanalco 85% de agua potable y 70% drenaje sanitario; INEGI, 2007) y proyección del gasto de operación de la PTAR-Amanalco (11.25 L/s) se obtuvo el volumen de descarga de agua residual en toda la cuenca. La aportación de contaminantes para las fuentes puntuales año 2020 se muestra en la Tabla 59.

Para las fuentes difusas se utilizaron las proyecciones de actividades porcícolas y trutícolas y suelos con diferentes usos. Se consideró un crecimiento de 5% de cada actividad pecuaria, 5% de zona urbana, 5% bosques, 5% agricultura y una disminución del 15% de pastizales. Tomando como buena esta consideración se obtuvo un volumen de descarga de agua residual en toda la cuenca. La aportación de contaminantes debido a fuentes difusas año 2020 se muestra en la Tabla 60.

Tabla 59. Aporte de contaminantes 2020 por fuentes puntuales a la presa Valle de Bravo

Subcuenca	Carga de contaminantes 2020 (t/año)			
	N _T	P _T	DBO	SST
Río Amanalco	35.24	9.23	130.06	133.61
Río Molino	12.96	3.24	64.8	64.8
Río San Diego	3.56	0.89	17.8	17.8
A. El Carrizal	0.14	0.03	0.68	0.68
A. Yerbabuena	1.07	0.27	5.36	5.36
A. Las Flores	3.75	0.94	18.75	18.75
Las Laderas	21.01	5.25	105.04	105.04
Total	77.72	19.86	342.49	346.04

Tabla 60. Aporte de contaminantes 2020 por fuentes difusas a la presa Valle de Bravo

Subcuenca	Carga de contaminantes 2020 (t/año)			
	N _T	P _T	DBO	SST
Río Amanalco	88.65	25.48	602.57	8,673.05
Río Molino	49.68	12.61	399.90	3,424.04
Río San Diego	7.18	2.00	65.40	508.16
A. Las Flores	5.22	2.00	54.71	403.84
A. El Carrizal	4.83	1.44	51.78	295.79
A. Yerbabuena	2.98	0.67	24.73	183.97
Las Laderas	4.35	1.37	41.88	314.22
Total	162.88	45.57	1,240.96	13,803.07

El aporte total de cargas externas año 2020 en la presa Valle de Bravo resultaron en: 65.43 t/año de P_T, 240.60 t/año de N_T, 1 583.45 t/año de DBO y 14 149.11 t/año de SST.

Haciendo una comparación de los resultados de las evaluaciones de carga externa para los años 2010 y 2020 (Tabla 61), se puede observar que las aportaciones obtenidas para el año 2020 no presentan una diferencia significativa con el paso del tiempo. Si bien es cierto que para este año la población es mayor, también se utilizaron proyecciones de coberturas de los servicios de alcantarillado sanitario, agua para consumo y saneamiento, a estas consideraciones se le atribuye la aportación similar.

Tabla 61. Evaluación de cargas de contaminantes para los años 2010 y 2020

Parámetros	Carga de contaminantes (t/año)	
	2010	2020
P _T	65.54	65.43
N _T	245.31	240.60
DBO	1,607.51	1,583.45
SST	14,116.68	14,149.11