



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA DEL
ARCEDIANO Y PROPUESTA DE SANEAMIENTO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A:

ING. CARLOS ESTEBAN CORZO JUÁREZ

TUTOR:

DRA. ANNE M. HANSEN HANSEN



2009

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA

Secretario: DR. OSCAR FUENTES MARILES

Vocal: DRA. ANNE M. HANSEN HANSEN

1^{er}. Suplente: M. en I. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

2^{do}. Suplente: DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA - CAMPUS MORELOS

TUTOR DE TESIS:

DRA. ANNE M. HANSEN HANSEN

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada especialmente a mis padres **Isabel Juárez Martínez** y **Carlos Corzo Zebadúa** por todo el amor y comprensión que me han brindado en todo este tiempo, sin su apoyo no hubiera logrado este paso.

A mi hermana **Karla** por ser mi gran amiga.

A toda mi **familia** por su ejemplo, principios y apoyo.

A ti tía **Loty**

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería – Campus Morelos y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

A mis primos, Gabriel y Verónica, Marco y Carolina, por brindarme su cariño y apoyo.

A la Dra. Anne Hansen Hansen por ser mi tutor principal durante el estudio de maestría y por su ayuda incondicional como directora de esta tesis.

A mis tutores M. en I. Ana Elisa Silva Martínez, Dr. Oscar Fuentes Mariles, Dr. Pedro Martínez Pereda y Dr. Víctor Luna Pabello, por sus comentarios y aportaciones para la realización de esta tesis.

A mis nuevos amigos, Yliana Hernández, Zaida Rincón, Sandra Ortíz, Claudia Escobar, Marcella Gastélum, Fabiola Arellano, Mariana Villada, Diana Navarro, Henri Márquez, Edy García, Arturo Hernández y Luis Carlos González.

A mis grandes amigos de Chiapas que me apoyaron desde la distancia.

También agradezco al Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco y al Biól. Marco Antonio Mijangos Carro por su ayuda para la realización de esta tesis.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	v
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación.....	7
1.3 Objetivo general	7
1.4 Objetivos específicos	7
1.5 Zona de estudio.....	8
2 MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Contaminación de cuerpos de agua.....	18
2.1.1. Aguas residuales municipales.....	18
2.1.2. Aguas residuales industriales.....	19
2.1.3. Descargas pecuarias.....	22
2.1.4. Escurrimientos agrícolas	23
2.2 Efectos producidos por la contaminación de cuerpos de agua	24
2.2.1. Fuente de abastecimiento	25
2.2.2. Riego Agrícola.....	26
2.2.3. Eutroficación	26
2.2.4. Uso Recreativo.....	27
2.2.5. Acumulación de Sedimentos.....	27
3 METODOLOGÍA	29
3.1 Estimación de aportes de contaminantes por fuentes no puntuales	29
3.1.1. Uso del suelo	29
3.1.2. Desechos pecuarios.....	41
3.2 Estimación de aportes de contaminantes por fuentes puntuales	42
3.2.1. Descargas industriales.....	43
3.2.2. Descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales.....	46

3.2.3.	Descargas de aguas residuales municipales sin tratar	48
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.1	Estimación de escurrimientos.....	51
4.2	Estimación de cargas	52
4.3	Estimación de cargas aguas abajo.....	67
4.4	Reducción de contaminantes	72
4.4.1.	Modificación en la alimentación del ganado.....	72
4.4.2.	Reuso de excretas	75
4.4.3.	Tratamiento de excretas.....	77
4.4.4.	Pretratamiento de efluentes industriales	78
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
6	REFERENCIAS.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Municipios asentados en la cuenca del Río Santiago..... 12

Tabla 1.2. Superficie por estado de la cuenca del río Verde 13

Tabla 1.3. Municipios asentados en la cuenca del Río Verde 16

Tabla 2.1. Industrias en las cuencas por giro 20

Tabla 2.2. Características típicas de las aguas residuales de giros industriales 21

Tabla 2.3. Principales actividades económicas 22

Tabla 3.1. Localización y descripción de los puntos de drenaje 31

Tabla 3.2. Concentraciones típicas de DBO, NT, PT y Ni por uso de suelo (mg/L)..... 40

Tabla 3.3. Concentraciones típicas de DBO, NT y PT por ganado porcino 41

Tabla 3.4. Concentraciones típicas de DBO, NT y PT en excretas bovinas 42

Tabla 3.5. Porcentaje de industriales localizadas por giro y cuenca..... 43

Tabla 3.6. Volumen de AR industriales por municipio 44

Tabla 3.7. Concentraciones típicas de DBO, NT y Ni por industria (mg/L) 45

Tabla 3.8. Caudal tratado por planta de tratamiento..... 46

Tabla 3.9. Concentración típica de DBO₅, NT y PT por tipo de planta de tratamiento (mg/L) 47

Tabla 3.10. Concentraciones típicas de DBO₅, NT y PT en aguas residuales municipales (mg/L) 48

Tabla 3.11. Número de habitantes y caudales de agua residual por municipio 49

Tabla 4.1. Datos de precipitación y escurrimiento por subcuencas para la cuenca del Arcediano 51

Tabla 4.2. Carga total anual de DBO, NT, PT y Ni por fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca del Arcediano (t/año) 52

Tabla 4.3. Contribución de DBO, NT, PT y Ni por tipo de fuente en la cuenca del Arcediano (%) 54

Tabla 4.4. Carga anual de níquel por giro industrial en la cuenca del Arcediano (t/año)55

Tabla 4.5. Distribución de carga anual de DBO, NT, PT y Ni por fuente y cuenca (t/año) 57

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) 59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localización de la cuenca Arcediano 9

Figura 1.2. Cuenca del río Santiago 10

Figura 1.3. Municipios en la cuenca Río Santiago..... 11

Figura 1.4. Delimitación de la cuenca Río Verde..... 14

Figura 1.5. Municipios en la cuenca Río Verde 15

Figura 3.1. Modelo de Elevación Digital de la cuenca del Arcediano 32

Figura 3.2. Hidrología de la cuenca del Arcediano 33

Figura 3.3. Localización de puntos de salida o drenaje 34

Figura 3.4. Delimitación de Subcuencas 35

Figura 3.5. Polígonos de Thiessen para la cuenca del Arcediano 37

Figura 3.6. Uso del suelo y vegetación..... 39

Figura 4.1. Carga anual de materia orgánica y nutrientes por fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca del Arcediano 53

Figura 4.2. Carga anual de níquel por fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca del Arcediano 53

Figura 4.3. Carga total de DBO por municipios asentados en la margen del río Santiago 68

Figura 4.4. Carga total de NT por municipios asentados en la margen del río Santiago 68

Figura 4.5. Carga total de PT por municipios asentados en la margen del río Santiago 69

Figura 4.6. Carga total de Ni por municipios asentados en la margen del río Santiago 69

Figura 4.7. Carga de DBO por municipios asentamos en la margen del río Verde 70

Figura 4.8. Carga de NT por municipios asentados en la margen del río Verde 71

Figura 4.9. Carga de PT por municipios asentados en la margen del río Verde 71

Figura 4.10. Carga de Ni por municipios asentados en la cuenca del río Verde 71

RESUMEN

La cuenca del Arcediano esta conformada por las cuencas hidrológicas del río Santiago y la del río Verde (principal afluente del Santiago). En la salida de la cuenca se ubicará la presa Arcediano, la cual tendrá como objetivo dotar de agua (previa potabilización) al segundo centro urbano más poblado de México, la Zona Conurbada de Guadalajara (ZCG). Sin embargo, las cuencas de los ríos Verde y Santiago reciben las descargas de contaminantes provenientes tanto de aguas residuales crudas como de los escurrimientos superficiales generadas en ellas. Entre estos contaminantes destacan la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nutrientes como el nitrógeno y el fósforo y el metal níquel (Ni).

En base a lo anterior el objetivo de esta tesis es analizar la problemática de contaminación de la cuenca del Arcediano, estimar los riesgos de contaminar el agua y formular propuestas de solución.

Se estimó la carga anual de DBO, nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y Ni para fuentes puntuales y no puntuales a lo largo de la cuenca. Para la determinación de cargas se emplearon valores llamados concentraciones típicas, los cuales asocian contribuciones de contaminantes a una determinada fuente u origen incorporados ya sea por los escurrimientos superficiales o en los volúmenes generados de agua residuales.

Los resultados indican que en la cuenca del Arcediano se descargan anualmente 675 280 t de DBO, 132 317 t de NT, 56 309 t de PT y 0.5 t de Ni. El porcentaje de contribución de DBO, NT, PT y Ni por fuentes fue la siguiente: las fuentes puntuales contribuyen con el 16%, 8%, 4% y 70% respectivamente y las fuentes no puntuales con el 84%, 92%, 96% y 30% respectivamente. Con respecto a estas últimas las descargas pecuarias aportan el 83% de DBO, 91% de NT y 96% de PT presentándose con mayor peso en la cuenca del río Verde. El 70% total del Ni generado en la cuenca tiene como origen las descargas industriales, las cuales se encuentran asentadas en la cuenca del río Santiago. Los giros industriales con mayor contribución de Ni a la cuenca del

Arcediano son la química, petroquímica y textil; generando de manera conjunta aproximadamente el 50% del total.

Se determinó la contribución por municipio obteniendo que los mayores a portadores de DBO, NT y PT a la cuenca del Arcediano son: Arandas, San Juan de los Lagos, Tepatlán de Morelos, Lagos de Moreno y Acatic. Para Ni, los municipios que mayor contribuyen son: El Salto, Poncitlán e Ixtlahuacán de los Membrillos.

La captación y tratamiento de las aguas residuales municipales que descargan al embalse del Arcediano, no serán suficientes para evitar la contaminación en la misma. Siendo necesario optar por sistemas no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales municipales de aquellos municipios asentados más cerca del embalse.

Para reducir la contaminación por excretas pecuarias se propone establecer un control en la dieta o alimento y reuso controlado como abono en la agricultura. En cuanto a las descargas industriales es necesario reforzar el inventario del mismo e implementar el pretratamiento de las aguas residuales antes de su incorporación al sistema de alcantarillado municipal.

ABSTRACT

The watershed of the Arcediano this conformed by the hydrologic river basins of the Santiago and the Verde (main tributary of Santiago). In the exit of the watershed the imprisoned a Arcediano dam will be located, who will have to objective supply with water (previous purification) to the second urban center more colonising of Mexico, the Zone Conurbada de Guadalajara (ZCG). Nevertheless, the river basins of the Verde and Santiago as much receive the discharged of crude wastewater polluting agents as of the superficial drainings generated in them. Between these polluting agents they emphasize the biochemical demand of oxygen (BDO), nutrients like nitrogen and the phosphorus and the nickel metal (Ni).

On the basis of previous the objective of this thesis it is to analyze the problematic of contamination of the Arcediano watershed, to estimate the risks of contaminating water and formulating of solution.

It was considered the anual load of BDO, total nitrogen (NT), total phosphorus (PT) and Ni for point sources and non-point sources throughout the basin river. For the determination of loads were used values called event mean concentrations, which associate polluting contributions with a certain source either origin or by the superficial drainings or in the generated volumes of wastewater.

The results indicate that in the Arcediano watershed the annually unload 675 280 t BDO, 132 317 t of NT, 56 309 PT t and 0,5 t of Ni. The contribution percentage of BDO, NT, PT and Ni by sources was the following: point sources contribute with 16%, 8%, 4% and 70% respectively and nonpoint sources with 84%, 92%, 96% and 30% respectively. With respect to this last animal waste contribute with 83% of BDO, 91% of NT and 96% of PT appearing with greater weight in the river basin of the Verde river. The 70% total of Ni generated in basin river has like origin the industrial discharged, which are based in the river basin of the Santiago river. The type of industry with greater Ni contribution to basin river of the Arcediano are chemistry, petrochemical and textile; generating of joint way approximately 50% of the total.

Municipality contribution by was determined obtaining that the majors carriers from BDO, NT and PT to the Arcediano watershed are: Arandas, San Juan of the Lagos, Tepatitlán de Morelos, Lagos de Moreno and Acatic. For Ni, the greater contribute municipalities are: El Salto, Poncitlán and Ixtlahuacán de los Membrillos.

The collecting and treatment of the municipal wastewaters that downstream to Arcediano dam, will not be sufficient to avoid the contamination. Will be necessary to decide nonconventional systems for the treatment of municipal wastewaters of those based municipalities near the dam.

In order to reduce the contamination by manure sets out a diet or food control and recycled controlled as fertilization in agriculture. It is necessary for industrial discharged to reinforce the inventory and to implement the pretreatment of wastewaters before its incorporation to the municipal sewage system.

1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de la población vive en regiones cercanas a las fuentes de agua. Como consecuencia de ello, las aguas costeras, los ríos, los lagos, los humedales, los acuíferos y demás sistemas de aguas interiores se han visto sometidos a consumos desproporcionados por parte de los seres humanos (UNESCO-WWAP, 2006). Situación que junto con las crecientes descargas de aguas residuales, tanto domésticas como industriales y agropecuarias, provocan un incremento en el vertido de contaminantes a los ríos y, posteriormente, a los lagos y presas. Esto propicia el deterioro de la calidad del agua de estos cuerpos, lo cual limita su aprovechamiento (Bravo, 1995) y favorece a la degradación de las cuencas.

La cuenca del Arcediano abarca una superficie de 25 568 km² aproximadamente. Su área de aportación se encuentra conformada por las cuencas del río Santiago y la del río Verde. Se extiende por cinco estados de la República Mexicana: Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Jalisco. Es en este último estado, parte baja de la cuenca, donde se construirá la presa Arcediano la cual tendrá como fin abastecer de agua potable a la segunda área más poblada del país, la Zona Conurbada de Guadalajara (conformada por los municipios de Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá, El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán y el propio municipio de Guadalajara).

Los ríos Verde y Santiago reciben las descargas de aguas residuales sin tratar generadas por los diversos usos de este recurso (UdeG, 2004). En la actualidad al río Santiago, desde su origen en el lago de Chapala hasta su paso por la Zona Conurbada de Guadalajara (ZCG), recibe los efluentes de aguas residuales crudas generadas por las poblaciones que se encuentran asentadas en su cercanía, así como las descargas del corredor industrial de El Salto. Cabe mencionar que además de las propias, también recibe las aguas contaminadas del río Verde en la confluencia de ambos ríos, siendo primordialmente los vertidos producto de la actividad pecuaria, ya que esta se desarrolla con gran intensidad en diversos municipios de la cuenca.

La presa Arcediano forma parte del “Programa de saneamiento y abastecimiento de la Zona Conurbada de Guadalajara” propuesto por la Comisión Estatal del Agua del estado de Jalisco (CEA), antes CEAS (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento), el cual considera la construcción de una presa de almacenamiento para satisfacer el déficit de agua actual y futura de la ZCG. En lo que respecta a las actividades de saneamiento, se plantea la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, tanto para la ZCG como para las poblaciones de la cuenca del río Santiago y la del río Verde dentro del estado de Jalisco (CEA, 2007).

La EPA (2000) señala que los contaminantes mayormente vertidos en los embalses que se encuentran localizados dentro o cerca de zonas urbanas son: materia orgánica, nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) y metales pesados, provenientes de distintas fuentes. Este proceso se manifiesta en los embalses artificiales con suma rapidez, ya que estos cuerpos de agua se convierten en los receptores finales de dichos contaminantes (López, 1997).

Con la finalidad de estimar los riesgos de contaminar el agua que se almacenará en la futura presa Arcediano, en esta tesis se abordan las cuencas hidrológicas del río Verde y Santiago, en dos fases: primera, se determinarán las cargas de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y níquel (Ni) de fuentes puntuales y no puntuales; segunda, una vez obtenida esta información se plantearán posibles soluciones de control de descargas de estos contaminantes, de acuerdo a su fuente u origen, para con ello contribuir a recuperar o conservar los cuerpos de agua que descarguen a el futuro embalse y así mismo asegurar el desarrollo sustentable del recurso hídrico en la cuenca del Arcediano.

1.1 Antecedentes

La ZCG ha tenido un crecimiento importante en los últimos años al pasar de una población en el año 1990 de 3.08 (CEA, 2007) a 4.1 millones de habitantes aproximadamente en el año 2005 (CEA, 2006). Esta situación se ha reflejado en el incremento de la demanda de agua potable, lo cual aunado al estado crítico de las actuales fuentes de abastecimiento: Lago de Chapala y los acuíferos Atemajac y

Toluquilla, es fundamental disponer de una nueva fuente de abastecimiento (Von Bretrab, 2003; CEA, 2006).

Ante esto el gobierno de Jalisco, a través de la CEA, planteó su posición en el año 2003 de construir una represa para aprovechar el potencial hidrológico de las cuencas de los ríos Verde y Santiago (Aguirre, 2004). Dicha obra hidráulica permitirá abastecer $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$ a la ZCG durante 30 años (CEA, 2006).

El proyecto para el abastecimiento de agua potable a la ZCG, comprende la construcción de una presa (Presa Arcediano); la que se ubicará aproximadamente a 800 m aguas abajo de la confluencia de los ríos Verde y Santiago (noreste de la ciudad de Guadalajara) en la barranca de Huentitlán, cerca de la población denominada Arcediano (UdeG, 2004).

Como parte de los estudios para el proyecto Arcediano la CEA Jalisco emprendió (a través de consultores), a partir del año 2002 y hasta el 2006, diversos trabajos para identificar y conocer la calidad de los sedimentos y del agua de los ríos Verde y Santiago. A continuación se presentan los resultados de dichos estudios (CEA, 2007):

En los años 2002-2003 se llevó a cabo la evaluación de la calidad del agua a nivel de cuenca de los ríos Verde y Santiago en el estado de Jalisco, fue realizada por la empresa AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V. Para este estudio se establecieron 12 sitios de muestreo sobre los cauces de los ríos Verde y Santiago y 10 sitios en afluentes. Fueron realizadas 10 campañas de muestreo, 5 en lluvia y 5 en estiaje. Se tomaron muestras de agua para el análisis de temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, DBO_5 , DQO, coliformes fecales, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos volátiles, fosfatos, fósforo orgánico, fósforo disuelto, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos. Adicionalmente para los sitios Arcediano en el Santiago y Loma Larga en el río Verde se incluyó también la determinación de 7 parámetros fisicoquímicos (turbiedad, color, cloruros, sulfatos, SAAM, fenoles y cianuros), 12 metales (aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo total, cromo hexavalente, hierro, manganeso, mercurio, plomo y zinc), 4 hidrocarburos aromáticos (benceno, etilbenceno, tolueno y xileno) y 10

plaguicidas (Aldrin, Dieldrín, Clordano, DDT, Gamma-HCH, Hexaclorobenceno, Heptacloro, Epóxido de heptacloro, Metoxicloro y 2,4-D), incluidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000). Los resultados señalaron:

- a) Las concentraciones de coliformes fecales sobrepasan los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) como fuente de abastecimiento (DOF, 1989) y la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) agua para uso y consumo humano, sin embargo, este problema sería resuelto por la planta potabilizadora
- b) Los metales que exceden los CE-CCA-001/89 como fuente de abastecimiento (DOF, 1989) y la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) agua para uso y consumo humano, son aluminio, hierro y manganeso sin embargo, este problema sería resuelto por la planta potabilizadora
- c) El nitrógeno amoniacal rebasa el límite de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) agua para uso y consumo humano. Los nitritos y fosfatos están por arriba de los valores establecidos en los CE-CCA-001/89 como fuente de abastecimiento (DOF, 1989). La demanda bioquímica de oxígeno, aun que no se encuentra contemplada por los CE-CCA-001/89 y la NOM-127-SSA1-1994, fue considerada como alta

Entre las recomendaciones establecidas se señala la necesidad de realizar un diagnóstico de origen de nutrientes para proponer medidas preventivas y correctivas a problemas de eutroficación.

De igual forma entre los años 2003-2004 a la empresa AICISA (Aqua Innova Consultoría e Ingeniería S.A. de C.V.) se le fue encargada la elaboración del estudio Identificación, muestreo y análisis de las descargas contaminantes de los ríos Santiago y Verde, en el estado de Jalisco. La caracterización de la calidad del agua se realizó a las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, descargas municipales crudas y a las corrientes de las cuencas del río Zula (afluente del río Santiago) y la cuenca del río Verde. Quedando excluidos los monitores del río Santiago y las descargas de origen industrial y agropecuarias.

Los parámetros analizados fueron todos los que se incluyen en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997). El muestreo de campo fue realizado entre diciembre de 2003 y febrero de 2004. Los resultados indican:

- a) Concentraciones altas de coliformes fecales, materia orgánica y nutrientes en la mayoría de las descargas y en las corrientes analizadas
- b) En lo que respecta a metales pesados y cianuros en ningún caso las concentraciones excedieron los valores máximos fijados por la normatividad.

La Universidad de Guadalajara (UdeG) realizó un estudio de caracterización de los lodos de los ríos Verde y Santiago (UdeG, 2004). Dicho estudio tenía como objetivo obtener un diagnóstico de la situación tanto de metales pesados como compuestos orgánicos de los lechos y aguas de los ríos Verde y Santiago. El muestreo que se llevó a cabo para la realización de este estudio fue único y del tipo puntual. Los resultados fueron los siguientes:

- a) En agua se presentan concentraciones de manganeso mayores a los límites permisibles marcados en la NOM-127-SSA1-1996 (DOF, 2000)
- b) Para sedimentos se identificaron metales pesado, de los cuales, el manganeso presenta concentraciones que podrían comprometer la calidad del agua para protección de la vida acuática de la guía canadiense (CCME, 2002) en ambos ríos

En el 2006 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) desarrolló un estudio con el objetivo de estimar los riesgos de contaminar el agua que se almacenará en la presa Arcediano (Hansen *et al.*, 2006).

Se realizó una campaña de muestreo, en la semana del 8 al 13 de mayo, de agua y sedimentos en cinco sitios sobre el cauce del río Santiago para el análisis de parámetros fisicoquímicos, metales, bifenilos policlorados (BPCs), hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) y plaguicidas organoclorados (POCs). Las conclusiones del estudio fueron las siguientes:

- a) Los únicos metales que sobrepasan los límites de los CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) como fuente de abastecimiento en al menos un sitio de muestreo, son aluminio, hierro y manganeso. Aunque estos metales pueden ser removidos en plantas potabilizadoras.
- b) Las concentraciones de fosfatos en agua rebasan los límites establecidos en los CE-CCA-001/89 como fuente de abastecimiento (DOF, 1989)
- c) Las concentraciones de níquel y de manganeso en sedimentos rebasan los criterios ecológicos para protección de la vida acuática de la guía canadiense (CCME, 2002). Debido a la inexistencia de normatividad aplicable para este rubro en México, los resultados obtenidos se compararon con los criterios recomendados por la guía canadienses para protección a la vida acuática. Sin embargo bajo ciertas condiciones ambientales, como la resuspensión de sedimentos por avenidas, podrían liberarse ambos metales adsorbidos por los sedimentos a la columna de agua
- d) No se identificaron contaminantes orgánicos tóxicos en agua y sedimento que puedan comprometer la calidad del agua como fuente de abastecimiento

Entre las recomendaciones formuladas por este estudio se establece que para prevenir la eutroficación del agua, se debe evaluar la aportación de nitrógeno y fósforo por fuentes tanto puntuales como dispersas.

En general las conclusiones de los estudios descritos en los párrafos anteriores son muy similares. Señalando problemas relacionados con materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), coliformes fecales y metales (aluminio, hierro, manganeso, níquel) que pueden afectar la calidad del agua como fuente de abastecimiento. Sin embargo, aluminio, hierro, manganeso y coliformes fecales pueden controlarse al ser removidos en plantas potabilizadoras. Por lo tanto, los contaminantes *problemáticos* quedan reducidos a nitrógeno, fósforo, materia orgánica y níquel.

1.2 Justificación

En el primer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (WWDR1, por sus siglas en inglés) se indicaba que un entorno libre de contaminación es esencial para el bienestar del ser humano y el desarrollo sostenible, haciendo hincapié en que los ecosistemas acuáticos son una parte integral de nuestras vidas ya que nos ayudan a satisfacer una multitud de necesidades (WWAP, 2003). Entre dichas necesidades se incluye al agua para el consumo humano.

En base a los resultados obtenidos de estudios de calidad del agua, señalados anteriormente, los contaminantes que pueden comprometer la calidad del agua como fuente de abastecimiento en el futuro embalse son: nitrógeno, fósforo, materia orgánica y níquel.

Para establecer medidas de control y en su caso la rehabilitación de la calidad del agua de los embalses que como el del Arcediano presentan problemas de contaminación, se deben cuantificar las aportaciones de dichos contaminantes de las diferentes fuentes, tales como agropecuarios y descargas de aguas residuales municipales e industriales. Este balance de contaminantes puede dar las pautas para implementar las medidas más apropiadas de control y tratamiento.

1.3 Objetivo general

Analizar la problemática de contaminación de la cuenca del Arcediano, estimar los riesgos de contaminar el agua y formular propuestas de solución.

1.4 Objetivos específicos

- Estimar los aportes de demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno, fósforo y níquel provenientes de fuentes puntuales y no puntuales de agua, en la cuenca del embalse
- Estimar el riesgo de contaminar el futuro embalse, asociado a la contaminación del agua en los ríos Verde y Santiago
- Proponer alternativas de saneamiento adecuadas a la problemática de la zona de estudio

1.5 Zona de estudio

La cuenca del Arcediano esta integrada dentro de la Región Hidrológico-Administrativa VIII “Lerma-Santiago-Pacifico”. La cuenca se encuentra entre los 101°18’-103°36’ de longitud Oeste y 20°18’-22°42’ latitud Norte (Figura 1.1). Tiene una superficie aproximada de 25 568 km², la cual incluye las cuencas del río Santiago (desde su inicio en el Lago de Chapala hasta el sitio del proyecto de la presa Arcediano) y la del río Verde Grande o simplemente río Verde.

Cuenca Río Santiago-Guadalajara

Para este estudio se comprende el tramo del río Santiago desde su inicio en el lago de Chapala hasta el sitio del proyecto (800 m después de la confluencia con el río Verde). La superficie de esta cuenca se encuentra en territorio del estado de Jalisco. El tramo en estudio del río Santiago tiene una longitud de aproximadamente 100 km (Figura 1.2), la parte inicial se ubica en una planicie agrícola que se prolonga aproximadamente hasta el municipio de Juanacatlán y en la ultima parte del tramo el cauce se interna en una barranca que va desde el municipio de El Salto a la confluencia con el río Verde. La altitud al inicio del río Santiago es de 1 528 m.s.n.m., mientras que en la confluencia con el río Verde se tiene la elevación de 990 m.s.n.m. (AyMA, 2006a). Los municipios que se encuentran asentados de manera total o parcial son 23, los cuales se muestran en la Figura 1.3 y se señalan en la Tabla 1.1.

Iniciando en el lago de Chapala, la primera aportación que recibe el río Santiago es la del río Zula, el cual es recibido por la margen derecha a la altura de la ciudad de Ocotlán. El río Zula es uno de los tributarios más importantes que recibe el río Santiago en esta región, aunque por las estructuras de manejo hidráulico, las aportaciones del Zula se consideran directamente hacia el lago de Chapala (AyMA, 2006a).

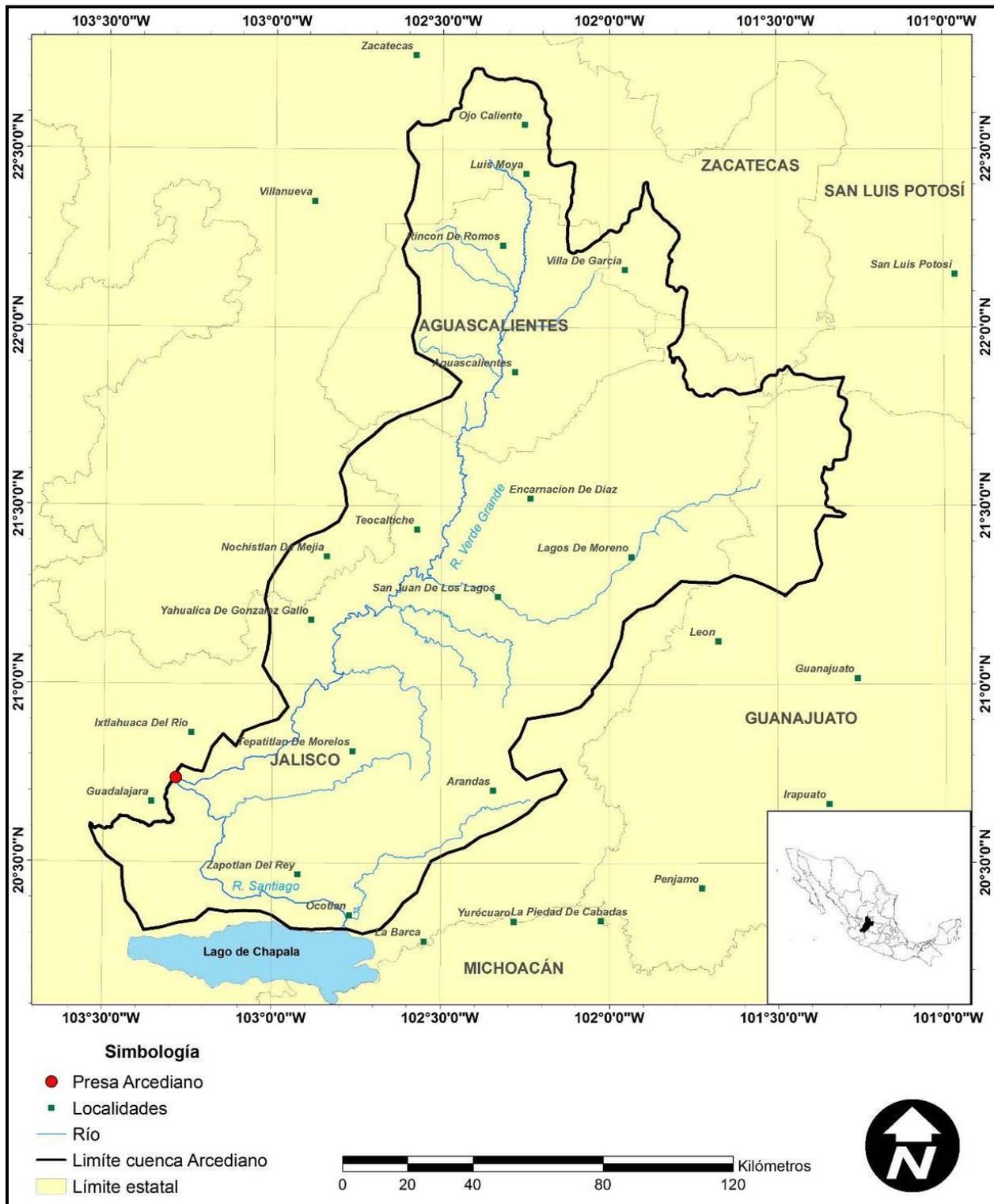


Figura 1.1. Localización de la cuenca Arcediano

El río Santiago inicia su trayecto en el municipio de Ocotlán, posteriormente cruza el municipio de Poncitlán y de Zapotlán del Rey, los cuales son delimitados por el cauce. De igual manera sucede más adelante, donde el río cruza una pequeña porción del municipio de Chapala en su colindancia con el municipio de Juanacatlán, al que también cruza y que a su vez colinda con los municipios de Ixtlahuacán de los Membrillos, una pequeña porción de Tlajomulco de Zúñiga, y El Salto. La parte final del tramo en estudio se ubica en los municipios de Zapotlanejo y Tonalá, existiendo colindancia por el río entre ambos, además de también una colindancia previa entre Tonalá y Juanacatlán (AyMA, 2006a).

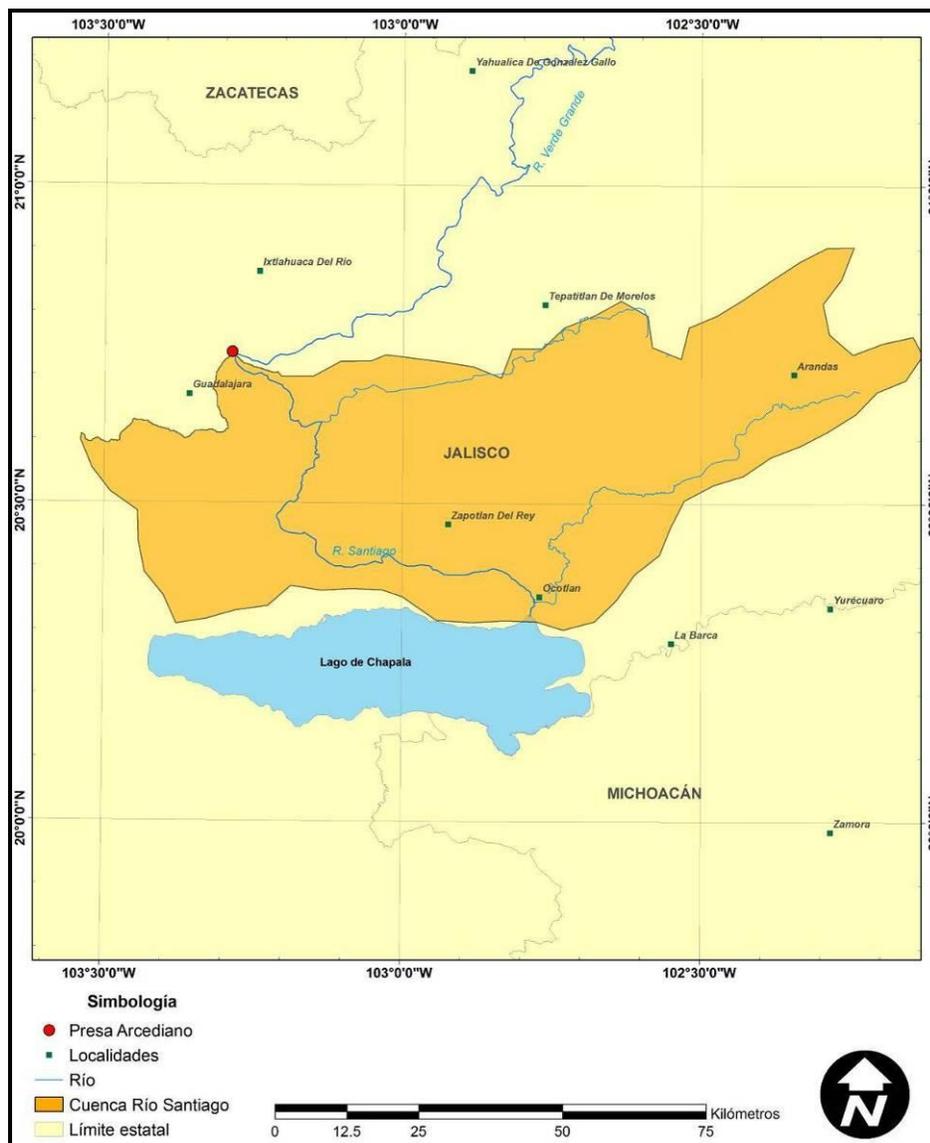


Figura 1.2. Cuenca del río Santiago

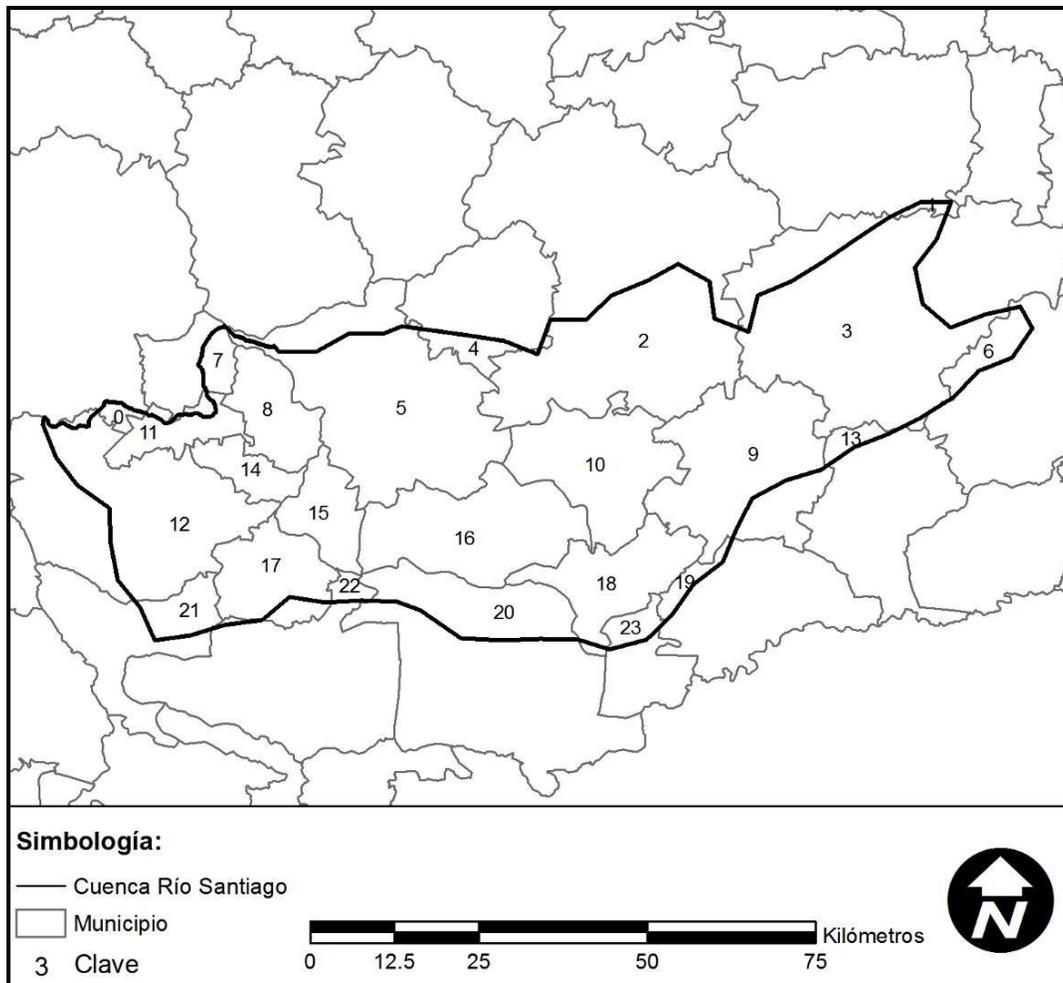


Figura 1.3. Municipios en la cuenca Río Santiago

Continuando aguas abajo, adelante de la población de Poncitlán, se tienen dos aportaciones por la margen derecha del río Santiago: el arroyo Agua Fría y el arroyo La Cañada, éste fluye cerca de la población de Zapotlán del Rey. Después de estas corrientes, las aportaciones al río Santiago son en la mayoría escurrimientos intermitentes, hasta recibir una aportación cerca de La Capilla por su margen izquierda que es el arroyo Los Sabinos; más adelante recibe, aguas arriba de la población de El Salto y por la margen izquierda, la aportación del arroyo El Ahogado, cuya importancia estriba en que es el dren de la cuenca del mismo nombre en que se asienta la parte sur de la Zona Conurbada de Guadalajara, además de otras localidades cercanas a dicha urbe (AyMA, 2006).

Tabla 1.1. Municipios asentados en la cuenca del Río Santiago

Clave	Municipio	Superficie Territorial en la cuenca (km ²)	% Superficie del municipio. en la cuenca
4	Acatic	50.64	14.99
3	Arandas	695.55	61.30
9	Atotonilco el Alto	410.87	81.48
13	Ayotlán	29.35	6.77
22	Chapala	26.10	4.15
14	El Salto	87.60	100.00
7	Guadalajara	42.32	28.37
17	Ixtlahuacán de los Membrillos	184.62	87.45
23	Jamay	37.45	23.40
6	Jesús María	65.29	9.99
21	Jocotepec	75.31	23.48
15	Juanacatlán	137.28	100.00
19	La Barca	32.95	7.98
18	Ocotlán	234.33	97.85
20	Poncitlán	219.35	26.08
1	San Miguel el Alto	10.52	1.35
2	Tepatitlán de Morelos	552.73	39.05
12	Tlajomulco De Zúñiga	456.12	65.31
11	Tlaquepaque	96.11	86.15
8	Tonalá	163.11	100.00
10	Tototlán	336.41	100.00
16	Zapotlán del Rey	398.12	100.00
5	Zapotlanejo	593.21	83.56
	Total	5 053.99	

La siguiente confluencia importante se ubica aguas abajo de la población de Puente Grande, en la zona en que el Santiago se interna en la barranca, donde recibe, por la margen derecha, la aportación del río La Laja. Después de esta confluencia, recibe por la margen derecha las aportaciones de los ríos Zapotlanejo y Calderón, los cuales descargan en un punto compartido por ambos afluentes; el río Zapotlanejo aporta mayor caudal y conduce la descarga de la población del mismo nombre, el río Calderón ve interrumpido su caudal en la presa Calderón. Finalmente, se tienen diversas

aportaciones por ambos márgenes del río Santiago, la mayoría de las recibidas por la margen izquierda provienen de la ciudad de Guadalajara: Tonalá, Coyula, San Gaspar de Las Flores, Osorio, San Andrés, entre otros, hasta finalmente recibir por su margen derecha al río Verde (AyMA, 2006a).

Cuenca Río Verde

El río Verde se ubica dentro de la Región Hidrológica No. 12 “Lerma-Santiago”. Su longitud rebasa los 200 km desde su origen hasta su confluencia con el río Santiago, al cual se incorpora por su margen derecha en las inmediaciones de la llamada Barranca de Oblatos que delimita a la ciudad de Guadalajara en su parte nororiente (AyMA, 2006b).

El cauce del río Verde fluye en tres estados del occidente de México, nace en el estado de Zacatecas, cruza el de Aguascalientes y recorre una parte del estado de Jalisco hasta su confluencia con el río Santiago. El Río Verde inicia aproximadamente a 40 km al sur de la ciudad de Zacatecas, donde se le conoce como río San Pedro, cambia de nombre a río Aguascalientes una vez que ingresa a este estado y hasta la confluencia con el río de Lagos y desde ahí adquiere el nombre de río Verde hasta su parte final. En términos de su cuenca, ésta se extiende también por el estado de Guanajuato (AyMA, 2006b) y una pequeña parte de San Luis Potosí, ver Figura 1.4. El área que drena es de aproximadamente 20 633 km² la cual está repartida como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Superficie por estado de la cuenca del río Verde

Estado	Superficie (km²)	% Superficie
Aguascalientes	4 228	20.49
Guanajuato	1 621	7.85
Jalisco	11 867	57.52
San Luis Potosí	70	0.34
Zacatecas	2 847	13.80
Total	20 633	100

La cuenca se divide en tres partes, que se denominan cuenca alta, cuenca media y cuenca baja. La cuenca alta abarca desde el nacimiento del río en el estado de Zacatecas, incluyendo su desarrollo a lo largo del estado de Aguascalientes y

concluyendo en el estado de Jalisco, en el sitio de la confluencia del río Verde con el río Lagos, en esta parte se localizan una fracción de las superficies de los estados de Aguascalientes y Guanajuato, así como del estado de Zacatecas (AyMA, 2006b).

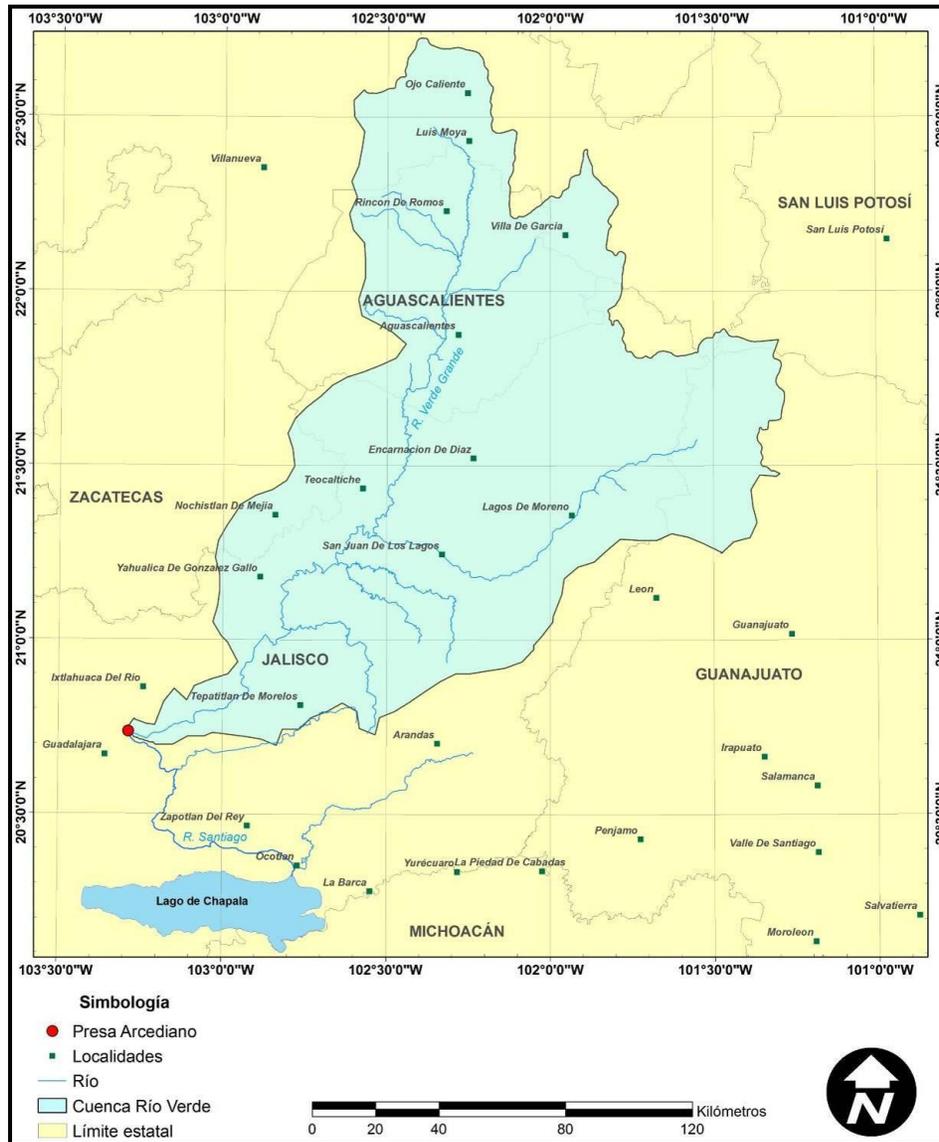


Figura 1.4. Delimitación de la cuenca Río Verde

La cuenca media comprende del sitio de la confluencia del río Verde con el río Lagos hasta la confluencia del mismo con el río Valle, en el estado de Jalisco, abarcando además una fracción del estado de Zacatecas. La cuenca baja del río Verde se localiza a partir del sitio de la confluencia del río Valle y hasta el sitio donde el Verde confluye

con el río Santiago, lugar denominado El Purgatorio, esta parte de la cuenca se localiza enteramente en el estado de Jalisco (AyMA, 2006b).

El tramo del río Verde que será efecto de estudio en este trabajo resulta ser la cuenca en su totalidad, es decir, desde su nacimiento en el estado de Zacatecas hasta su confluencia con el río Santiago en el estado de Jalisco. Los municipios que se asientan total o parcialmente en la cuenca del Río Verde son un total de 49 (Figura 1.5). En la Tabla 1.3 se en listan dichos municipios, así como el porcentaje de su superficie dentro de la cuenca.

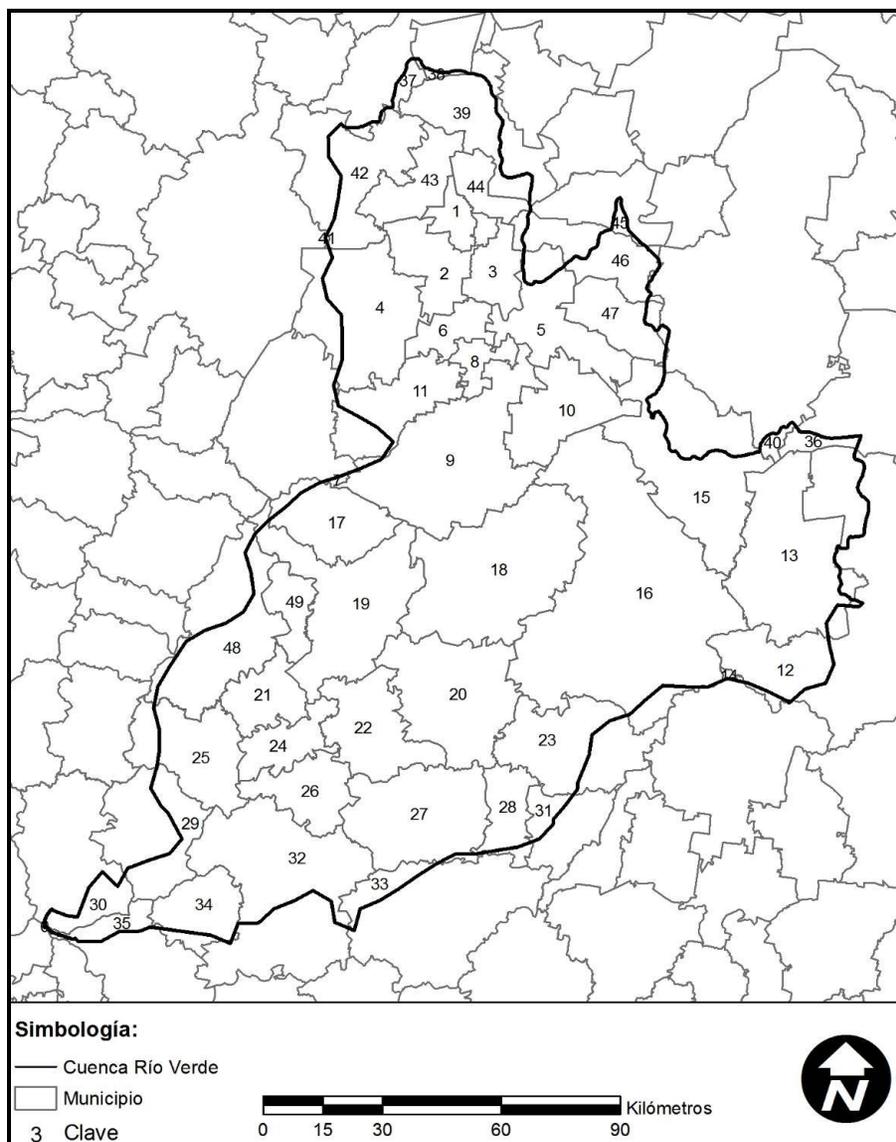


Tabla 1.3. Municipios asentados en la cuenca del Río Verde

Clave	Municipio	Estado	Sup. Territorial en la cuenca (km ²)	Sup. Territorial en la cuenca (%)
9	Aguascalientes	Aguascalientes	1 156.56	98.96
5	Asientos	Aguascalientes	472.08	86.19
7	Calvillo	Aguascalientes	14.07	1.51
1	Cosío	Aguascalientes	128.90	100.00
10	El Llano	Aguascalientes	500.85	100.00
11	Jesús María	Aguascalientes	365.47	73.21
6	Pabellón de Arteaga	Aguascalientes	199.33	100.00
2	Rincón de Romos	Aguascalientes	372.93	100.00
8	San Francisco de los Romo	Aguascalientes	134.07	100.00
4	San José de Gracia	Aguascalientes	654.97	76.50
3	Tepezalá	Aguascalientes	228.84	99.98
14	León	Guanajuato	11.52	0.94
13	Ocampo	Guanajuato	949.23	93.11
12	San Felipe	Guanajuato	659.85	22.22
34	Acatic	Jalisco	287.21	85.01
33	Arandas	Jalisco	134.17	11.82
24	Cañadas de Obregón	Jalisco	268.93	100.00
29	Cuquíó	Jalisco	289.47	45.86
18	Encarnación de Díaz	Jalisco	1 248.58	100.00
30	Ixtlahuacán del Río	Jalisco	151.54	18.47
22	Jalostotitlán	Jalisco	513.09	100.00
16	Lagos de Moreno	Jalisco	2 394.65	96.50
21	Mexicacán	Jalisco	286.51	100.00
15	Ojuelos de Jalisco	Jalisco	809.04	69.84
31	San Diego De Alejandría	Jalisco	89.53	25.90
20	San Juan de los Lagos	Jalisco	839.35	100.00
28	San Julián	Jalisco	229.12	87.84
27	San Miguel el Alto	Jalisco	766.28	98.26
19	Teocaltiche	Jalisco	903.86	97.81

Tabla 1.2. Municipios asentados en la cuenca del Río Verde (Cont.)

Clave	Municipio	Estado	Sup. Territorial en la cuenca (km ²)	Sup. Territorial en la cuenca (%)
32	Tepatitlán de Morelos	Jalisco	862.74	60.95
23	Unión de San Antonio	Jalisco	474.47	65.75
26	Valle De Guadalupe	Jalisco	347.96	100.00
17	Villa Hidalgo	Jalisco	404.74	90.73
25	Yahualica de González Gallo	Jalisco	449.31	80.33
35	Zapotlanejo	Jalisco	116.68	16.44
36	Villa de Arriaga	San Luis Potosí	70.42	8.18
49	Apulco	Zacatecas	200.90	100.00
43	Cuauhtémoc	Zacatecas	318.63	100.00
42	Genaro Codina	Zacatecas	468.17	59.44
37	Guadalupe	Zacatecas	70.26	8.73
46	Loreto	Zacatecas	259.46	60.71
44	Luis Moya	Zacatecas	176.69	99.88
48	Nochistlán de Mejía	Zacatecas	551.23	63.52
45	Noria de Ángeles	Zacatecas	28.81	7.18
39	Ojocaliente	Zacatecas	401.90	62.24
40	Pinos	Zacatecas	53.00	1.69
38	Trancoso	Zacatecas	17.07	7.93
47	Villa García	Zacatecas	298.95	92.07
41	Villanueva	Zacatecas	1.64	0.08
	Total		20 633	

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Contaminación de cuerpos de agua

La calidad del agua puede ser alterada como consecuencia de las actividades humanas o naturales que producen efectos adversos que cambian su valor físico, químico y biológico. Entonces, cualquier alteración de estas, que provoque un efecto inaceptable de su utilidad o valor ecológico es considerada como contaminación del agua, y un contaminante es el factor o la sustancia que provoca esa alteración.

El origen de la contaminación de cuerpos de agua se realiza por descargas puntuales y no puntuales o también llamadas difusas. Las primeras concentran en un sitio a los contaminantes, estas se encuentran bien definidas tales como los sistemas aguas residuales municipales e industriales. Mientras que la segunda es producida por las aguas de lluvia, identificándolas como escurrimientos superficiales que acarrean contaminantes naturales y los resultantes de la actividad humana, siendo los depósitos finales los lagos, ríos, costas, pantanos, humedales y aguas subterráneas (Arreguín *et al.*, 2000).

A continuación se mencionan las fuentes de contaminación del sitio el Arcediano, así como las características de cada una de ellas.

2.1.1 Aguas residuales municipales

Sobre las cuencas de estudio se encuentran asentadas localidades, las cuales generan aguas residuales domésticas que son descargadas en el sistema de alcantarillado.

Los contaminantes asociados, se puede decir que son esencialmente de tipo orgánico y biológico. Además de los anteriores se debe añadir la presencia de productos químicos de tipo doméstico (productos de limpieza e higiene) y los denominados productos farmacéuticos y de uso personal. Sin olvidar que un contaminante primordial de este tipo de aguas es el fecal por lo tanto se encuentra muy asociado a la presencia de microorganismos patógenos; así mismo, como a dar origen a la presencia de nitratos.

Es también frecuente encontrar componentes inorgánicos debido a vertidos no controlados (Metcalf & Eddy, 1994).

Como consecuencia del uso de detergentes en polvo o líquidos para múltiples usos en el hogar, la contaminación doméstica es la causa principal del aumento de los derivados del fósforo en las aguas usadas; estas sustancias, junto con los nitratos, son responsables de los fenómenos de eutrofización acelerada de los cuerpos de aguas superficiales. El uso de detergente para lavar la ropa o de líquidos desengrasantes puede tener consecuencias nocivas cuando los usuarios se multiplican por miles y millones, como ocurre en las grandes aglomeraciones urbanas. Sin restar importancia, a los vertidos en el drenaje de sustancias químicas, gasolina, aceites usados y otros productos similares (Mugica *et al.*, 1996).

2.1.2 Aguas residuales industriales

Otro tipo de descargas presentes en las cuencas de estudio son las de origen industrial; donde actualmente, la estructura de la región comprende desde grandes empresas hasta micro, pequeños y medianos establecimientos empresariales (Hernández, 2004). La mayor parte de estos flujos se vierten finalmente a las corrientes naturales de agua en forma de agua de desecho o agua residual, siendo el municipio de El Salto donde se concentra el mayor número de industrias.

Generalmente las descargas de aguas residuales provenientes de las industrias contienen aguas residuales de enfriamiento, de enjuague y de proceso y frecuentemente aguas de desecho de los baños de los empleados y de lavado del equipo y los espacios de trabajo (Maturano, 1998).

La composición de los efluentes es muy variable de una industria a otra y puede incluir sustancias tóxicas o difícilmente degradables. Aparte de estas sustancias y sus altas concentraciones, los riesgos más grandes de los efluentes industriales pueden provenir de la presencia de hidrocarburos y de detergentes, aunque también las descargas de materia orgánica pueden producir serios incidentes.

En la Tabla 2.1 se presentan las industrias establecidas por giro en las cuencas de estudio. En la Tabla 2.2 se describen las características típicas de aguas industriales por giro.

Tabla 2.1. Industrias en las cuencas por giro

Cuenca	Giro	Industrias en la cuenca (%)
Río Santiago	Petroquímica	35.8
	Química	13.4
	Alimenticia	10.4
	Metalmecánica	10.4
	Automotriz	4.5
	Metalurgia	4.5
	Química y farmacéutica	4.5
	Comp. y eq. eléctricos y electrónicos	3.0
	Servicios	3.0
	Celulosa y papel	1.5
	Minera-cantera	1.5
	Petróleo	1.5
	Destilación	1.5
Textil	4.5	
Río Zula	Alimenticia	26.9
	Destilación	65.5
	Metalmecánica	3.8
	Petroquímica	3.8
Río Verde	Alimenticia	100

Fuente: Hansen *et al.*, 2006

Tabla 2.2. Características típicas de las aguas residuales de giros industriales

Giro Industrial	Características del agua residual
Industria textil	Alta alcalinidad, DBO, temperatura y sólidos suspendidos
Lavandería	Alta turbiedad, detergentes, alcalinidad y sólidos orgánicos
Alimentos enlatados	Alta en sólidos suspendidos, materia orgánica disuelta y coloides
Derivados de leche	Alta en materia orgánica disuelta, principalmente proteínas, grasa y lactosa
Cervecería y destilería	Alta en sólidos orgánicos disueltos que contienen nitrógeno y almidones fermentados
Carnes (en general)	Alta materia orgánica disuelta y suspendida, sangre, proteínas y grasas
Establos	Alta en sólidos suspendidos orgánicos y DBO
Ingenios azucareros	Alta en materia orgánica disuelta y suspendida con azúcares y proteínas
Encurtidos	pH variable, alta en sólidos suspendidos, color, materia orgánica
Pescado procesado	Muy alta en DBO, sólidos orgánicos totales y olores
Refrescos envasados	Alto pH, alta en sólidos suspendidos y DBO
Panaderías	Alta en DBO, grasa, harina, azúcares y detergentes
Agua envasada	Contiene minerales, sólidos suspendidos y productos de lavado
Ácidos	Bajo pH y bajo contenido de materia orgánica
Detergentes	Alta en DBO y jabones saponificados
Almidones de maíz	Alta en DBO y materia orgánica disuelta (almidón principalmente)
Explosivos	TNT, color, olor, ácidos orgánicos, alcohol, algodón, metales, ácidos y aceites
Plaguicidas	Alta en ácidos y materia orgánica con elementos de benceno
Fosfatos y fósforo	Arcillas, limos, aceites, bajo pH, alta en sólidos suspendidos, fósforos, silicatos y fluoruros
Formaldehído	Normalmente alta DBO, HCHO, tóxicos para bacterias en altas concentraciones
Plásticos y resinas	Ácidos, sustancias cáusticas, materia orgánica disuelta

Fuente: Guzmán, 1997

2.1.3 Descargas pecuarias

Las actividades pecuarias son otra fuente importante de contaminación de los cuerpos de agua. En el estado de Jalisco y en muchos municipios de la zona de estudio esta actividad es muy importante. La cría de animales genera efluentes con grandes cantidades de materia orgánica y organismos patógenos (ricas en excremento, orina y restos de comida). Siendo el lavado y desinfección de corrales, así como el lavado de animales las actividades que originan el desecho de los contaminantes.

Los contaminantes más comunes originados por las actividades anteriores son: materia orgánica disuelta, materia orgánica en suspensión, grasas y aceites, detergentes y alcalinidad (Maturano, 1998).

En la Tabla 2.3 se presentan los municipios, su principal actividad económica y el sector económico al que pertenecen. Observándose que la actividad económica resaltante es la ganadería.

Tabla 2.3. Principales actividades económicas

Municipio	Principal actividad económica	Sector económico
Acatic	Ganadería	Primario
Encarnación de Díaz		
San Julián		
Unión de San Antonio		
Cañadas de Obregón	Agricultura	Primario
Jamay		
Mexicacán		
Ponciltán		
Teocaltiche		
Tototlán		
Valle de Guadalupe		
Zapotlán del Rey		
Arandas	Manufactura	Secundario
El Salto		
Ixtlahuacán de los Membrillos		

Fuente: Hansen *et al.*, 2006

Tabla 2.3. Principales actividades económicas (Cont.)

Municipio	Principal actividad económica	Sector económico
Jalostotitlán	Manufactura	Secundario
Juanacatlán		
Lagos de Moreno		
Ocotlán		
San Miguel el Alto		
Villa Hidalgo		
Zapotlanejo		
Atotonilco el Alto	Agricultura y ganadería	Primario
	Comercio	Terciario
Chapala	Comercio y restaurantes	Terciario
Tepatitlán de Morelos	Comercio y servicios	Terciario
Tonalá	Comercio	Terciario
San Juan de los Lagos	Comercio, restaurantes y hoteles	Terciario
Yahualica de González Gallo		

Fuente: Hansen *et al.*, 2006

2.1.4 Esgurrimientos agrícolas

Otra de las actividades que genera contaminantes a los cuerpos de agua son las aguas de escurrimiento agrícola. Al igual que la ganadería esta actividad tiene un peso en la economía de los municipios de interés.

Estos escurrimientos en su recorrido llevan consigo dos principales contaminantes:

Fertilizantes. Algunas tierras son productivas de modo natural, otras para serlo, requieren de la aplicación de técnicas modernas, adición de agua, materia orgánica y fertilizantes. Las especies vegetales actuales, de gran rendimiento, requieren un fertilizante apropiado; particularmente a base de nitrógeno y de fósforo.

El problema es que, por una parte, los vegetales necesitan cierto tiempo para asimilar el nitrógeno y, por otra, los fertilizantes nitrogenados son muy solubles en agua; de hecho, las plantas asimilan estos fertilizantes disueltos en agua. Esto provoca que, si ha sido reciente su aplicación, una lluvia fuerte acarree el fertilizante, lo que hace que los terrenos lo pierdan y se tenga que hacer nuevas aplicaciones. Además, los fertilizantes

nitrogenados y fosforados casi siempre se aplican en exceso, lo que provoca un aumento de nitratos y fosfatos en los cuerpos receptores de las aguas que escurren de los campos agrícolas.

Plaguicidas. Los plaguicidas suelen ser distribuidos generosamente en los campos cultivados en donde son lavados por la lluvia y/o en riego, para llegar a alguna corriente. Algunas de estas sustancias tienen la propiedad llamada “persistencia” consistente en una resistencia a perder su estructura original (necesariamente tóxica) y por consiguiente, acumularse en el agua y aun en los tejidos orgánicos.

2.2 Efectos producidos por la contaminación de cuerpos de agua

Como se mencionó anteriormente, cualquier cuerpo de agua es capaz de asimilar cierta cantidad de contaminantes sin mostrar efectos serios debido a los factores de dilución y autpurificación que están presentes. Si hay contaminantes adicionales, se altera la naturaleza del cuerpo de agua receptor y deja de ser adecuado para sus diferentes usos, ocasionando así la contaminación del cuerpo de agua. Los contaminantes del agua pueden ocasionar efectos adversos a corto y largo plazo.

Efectos inmediatos o a corto plazo.

Estéticos. Algunos ejemplos son:

- La acumulación de espuma de los detergentes en las descargas de aguas domésticas
- Las natas de productos insolubles provenientes de industrias
- Las botellas de plástico o poliestireno que flotan en la superficie

Ecológicos. Entre ellos destacan:

- La mortandad de peces
- La desaparición o modificación de la vegetación cercana a los cuerpos de agua

Efectos a largo plazo.

Los efectos a largo plazo ocasionados por los contaminantes en el agua pueden ser de dos tipos:

- Presencia y acumulación de tóxicos en sedimentos
- Eutroficación acelerada

2.2.1 Fuente de abastecimiento

Existen los efectos menos molestos o que no ponen en peligro la salud del hombre y que no presentan o causan algún problema ambiental, como son: agua café rojiza que sale de la llave, manchas negra que quedan sobre la ropa cuando esta se lava con agua rica en manganeso, los depósitos incrustados que dejan las aguas calcáreas en las cacerolas o en las tuberías.

También están los efectos negativos sobre la salud del hombre. Estos pueden ser muy diversos así que nos enfocaremos a los más importantes:

Efectos de la contaminación biológica

Se llama contaminación biológica del agua a la presencia en el medio acuático de microorganismos patógenos en concentración suficiente como para garantizar su reproducción o sobrevivencia dentro del organismo humano. Por definición, en el agua potable se debe mantener la concentración de agentes biológicos potencialmente patógenos por debajo del límite establecido en las normas. La contaminación biológica del agua puede causar el desarrollo de un conjunto muy amplio de patologías.

Entre las patologías infectocontagiosas cuya transmisión se realiza por intermedio del agua contaminada, las más importantes suelen ser la hepatitis infecciosa, la amibiasis, la oxiuriasis, la ascariasis, la tricocefalosis, la shigellosis, la teniasis y la cisticercosis.

Entre las infecciones que resultan de la ingestión de agua contaminada con bacterias se encuentra una enfermedad que, por su carácter epidémico y su alta mortalidad (en especial en la etapa adulta), actualmente destaca sobre las demás: el cólera.

Efectos de la contaminación química.

La presencia de sustancias químicas en el agua ocasiona graves enfermedades en las personas que consumen las aguas contaminadas con estas sustancias. Los efectos sobre la salud son muy variados y van desde los efectos inmediatos causados por sustancias altamente tóxicas como los cianuros, hasta efectos que aparecen a largo plazo como los causados por los metales pesados.

2.2.2 Riego Agrícola

El agua residual “cruda” es ampliamente utilizada por los campesinos, expuestos a riesgos ocupacionales y facilitando, además, la transmisión de infecciones entre los consumidores de cultivos (Cifuentes *et al.*, 1999).

En sí, el problema relacionado con las actividades agrícolas, es el uso intensivo e inadecuado de fertilizantes y pesticidas, los cuales han hecho que la tierra se agote o tenga problemas de salinización. En muchos casos directamente, o por filtración, los drenes de riego reciben cantidades importantes de fertilizantes y pesticidas, además de aguas negras en exceso lo que agrava la situación agrícola pues el agua destinada al riego presenta un alto contenido de coliformes, convirtiéndola en impropia para su destino primario (López *et al.*, 2001).

2.2.3 Eutroficación

La palabra eutrofización procede etimológicamente del 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 macrófitos en función de la carga de nutrientes (Guzmán, 1997).

Los cuerpos de agua se pueden clasificar de forma simplificada en tres grandes tipos:

- Oligotróficos. Sistemas acuáticos de bajo contenido de nutrientes y producción vegetal mínima

- Mesotróficos. Sistemas acuáticos con características intermedias entre oligotrófico y eutrófico
- Eutróficos. Sistemas acuáticos de alto contenido de nutrientes y producción vegetal excesiva

La eutroficación puede producir problemas en ciertos usos como son: suministro de agua potable por alteración de sus propiedades organolépticas (olor, sabor), corrosión del equipo hidroeléctrico y distintos trastornos en los procesos de tratamiento potabilizador por disminución del contenido de oxígeno, acumulación del amoníaco en la columna de agua y resuspensión de ciertos metales (Fe, Mn) del sedimento bajo condiciones anóxicas. Aunque es un proceso que, de forma lenta, puede tener un origen natural, hoy en día es, fundamentalmente, de carácter cultural, acelerado por el aporte continuo de nutrientes de origen antropogénico (Salas y Mario, 2001).

2.2.4 Uso Recreativo

Entre las principales actividades están la natación y la pesca. Sin embargo, las descargas de aguas, sobre todo las domésticas, pueden causar niveles de contaminación altos que las eliminen. La presencia de olores, latas, botellas de plástico, sólidos orgánicos suspendidos, espumas y natas; propician el malestar de los usuarios. También hay que tomar en cuenta las enfermedades que estas aguas pueden ocasionar a los bañistas debido a la ingesta accidental.

2.2.5 Acumulación de Sedimentos

Presencia de tóxicos en sedimentos. A largo plazo, los depósitos de sustancias tóxicas que se forman en el fondo de los ríos pueden tener consecuencias nefastas para la fauna, la flora y para el hombre. Los sedimentos, tienen la propiedad de almacenar sustancias tóxicas, las cuales en un momento determinado pueden movilizarse, es decir disolverse en agua. Los sedimentos pueden formar grandes capas en el fondo de los cuerpos de agua, especialmente en las presas; esto provoca que, al interior del sedimento, se lleven a cabo una serie de procesos químicos y bioquímicos que causan la liberación de tóxicos. En estas condiciones también se puede fermentar la materia

orgánica, produciendo metano, amoníaco y ácido sulfhídrico, esta sustancia es altamente tóxica para muchas especies acuáticas.

Otro fenómeno importante que presentan los sedimentos es que pueden oxidarse, lo que consume una cantidad importante de oxígeno.

3 METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología que se empleó para estimar la carga de DBO, NT, PT y Ni en la cuenca. Se calculó la masa de contaminantes de fuentes puntuales y no puntuales.

3.1. Estimación de aportes de contaminantes por fuentes no puntuales

Para estimar las cargas de DBO, NT, PT y Ni, en este estudio se consideró como fuentes no puntuales a los escurrimientos provenientes de:

- El tipo de *Uso del suelo y vegetación* presente en la zona de estudio
- Desechos pecuarios

A continuación se describe la metodología que se empleó para estimar las cargas a cada una de estas fuentes.

3.1.1. Uso del suelo

Para la realización de los cálculos de las cargas se incorpora la utilización de la siguiente fórmula general:

$$M = CV$$

Donde:

M = Carga (masa)

C = Concentración (masa/volumen)

V = Volumen de agua (volumen)

La idea de este método es básicamente la implementación de valores llamados Concentraciones Típicas Promedio (CTP), las cuales asocian contribuciones de contaminantes a un determinado uso del suelo incorporados en los escurrimientos superficiales en una determinada área.

Los pasos para el desarrollo de este método son los enlistados, de una forma general, a continuación:

- Delimitación del área de estudio, determinando el área drenada total de la cuenca
- Determinación del escurrimiento superficial
- Determinación de los usos de suelo así como las concentraciones (CTP) asociadas a cada tipo de uso de suelo establecido dentro de las cuencas en estudio
- Usar la ecuación general, establecida anteriormente, para determinar las cargas de fuentes no puntuales

En la aplicación de estos pasos se requirió la implementación del sistema de información geográfico (SIG) ArcView como una herramienta en el proceso de captura, análisis y generación de información (mapas principalmente).

Delimitación de cuencas y subcuencas

Para la delimitación de la cuenca Arcediano se procesó y analizó información de carácter espacial. La información consistió en recopilación de la cartografía existente (cuencas hidrológicas, hidrografía superficial, división municipal y estatal). Para ello se consultó y descargó información de los sitios de Internet de CONABIO (2007) y SEMARNAT (2007). Todos los mapas fueron adquiridos en formato digital a escala 1: 250 000. Debido a que la cartografía fue adquirida en sitios gratuitos, la calidad de estas no es muy alta.

En lo que se refiere a la delimitación de las cuencas (río Santiago y río Verde) se empleó la herramienta *Editor* del programa ArcView para mejorar la calidad de cada una de las cuencas. Siendo el caso particular de la cuenca del río Santiago, la cual se delimitó ya que la zona de estudio comprende solamente la parte del Alto Santiago (nacimiento del río Santiago en el Lago de Chapala hasta 800 m después de la confluencia con el río Verde).

La cuenca del Arcediano es el marco de estudio general, pero para el análisis de la estimación de cargas fue necesario trabajar a nivel de subcuencas para conocer de manera más particular la situación y el lugar que ocupan en la contribución de cargas a lo largo de la cuenca.

Para realizar la delimitación de las subcuencas se empleó la herramienta *ArchHydro*. Dicha herramienta, para llevar a cabo su función, necesita de determinados datos de entrada como son: el modelo digital de elevación del terreno (DEM, por sus siglas en inglés, Figura 3.1), red de corrientes fluviales (Figura 3.2) y la ubicación geográfica de las estaciones hidrométricas. La elaboración de las subcuencas consistió en determinar el área de aporte que le corresponde a cada estación hidrométrica dentro de la zona de estudio. El proceso parte de determinar el área de drenaje de la cuenca, con la ayuda del DEM, para establecer la dirección que siguen las corrientes fluviales en la superficie y ver la conectividad, si existe, del flujo. Una vez determinada al área de drenaje se establecen los puntos de salida para cada subcuenca (para este caso se han adoptado como dichos puntos a las estaciones hidrométricas, Figura 3.3) y la red de ríos. Teniendo todos los datos necesarios se procede a aplicar la herramienta *ArchHydro* para realizar la delimitación de subcuencas (Figura 3.4).

En la Tabla 3.1 se muestra la localización y descripción de los sitios seleccionados como puntos de salida o drenaje para la demarcación de las subcuencas hidrológicas.

Tabla 3.1. Localización y descripción de los puntos de drenaje

Clave	Nombre	Corriente	Latitud Norte	Longitud Oeste
12472	Arcediano	Río Santiago	20° 44' 30"	103° 16' 50"
12937	Zula	Río Zula	20° 24' 00"	102° 43' 00"
12545	El Niágara III	Río Aguascalientes	21° 46' 45"	102° 22' 30"
12422	Cuarenta II	Río Lagos	21° 29' 20"	101° 45' 10"
12358	Ajojucar	Río Aguascalientes	21° 33' 48"	102° 26' 22"
12370	San Gaspar	Río Lagos	21° 17' 05"	102° 29' 50"
12504	La Cuña	Río Verde	21° 00' 19"	102° 49' 16"

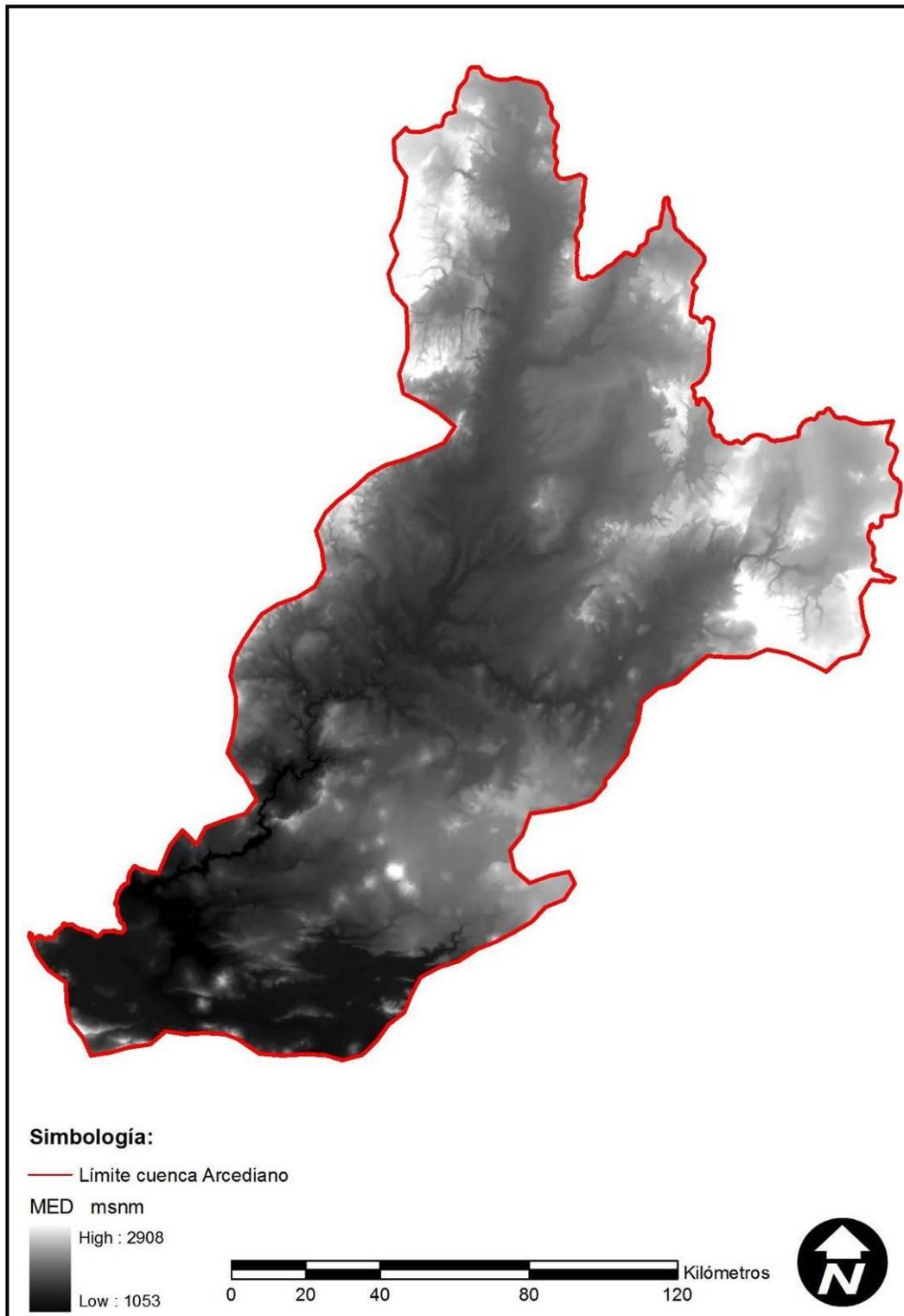


Figura 3.1. Modelo de Elevación Digital de la cuenca del Arcediano

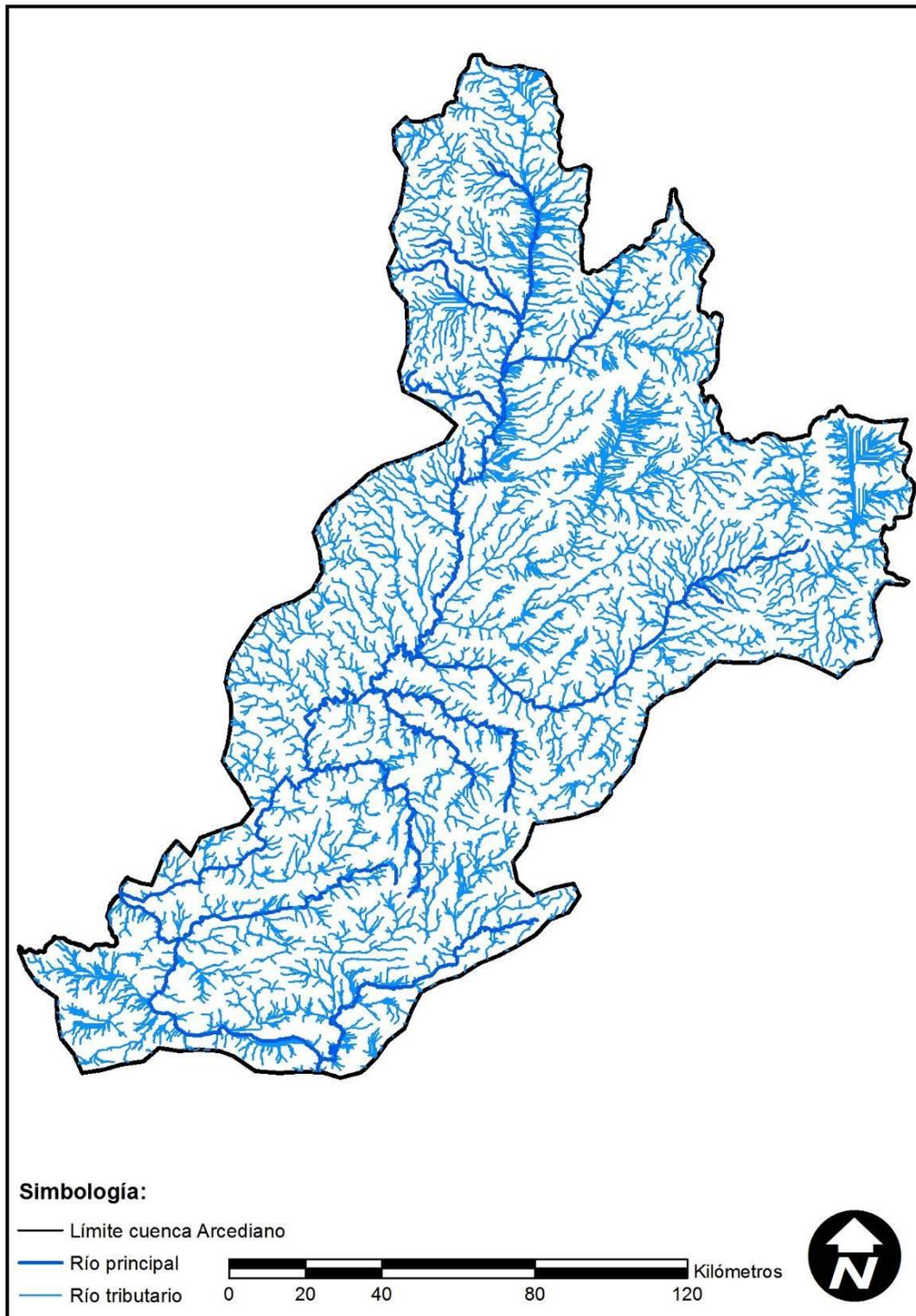


Figura 3.2. Hidrología de la cuenca del Arcediano

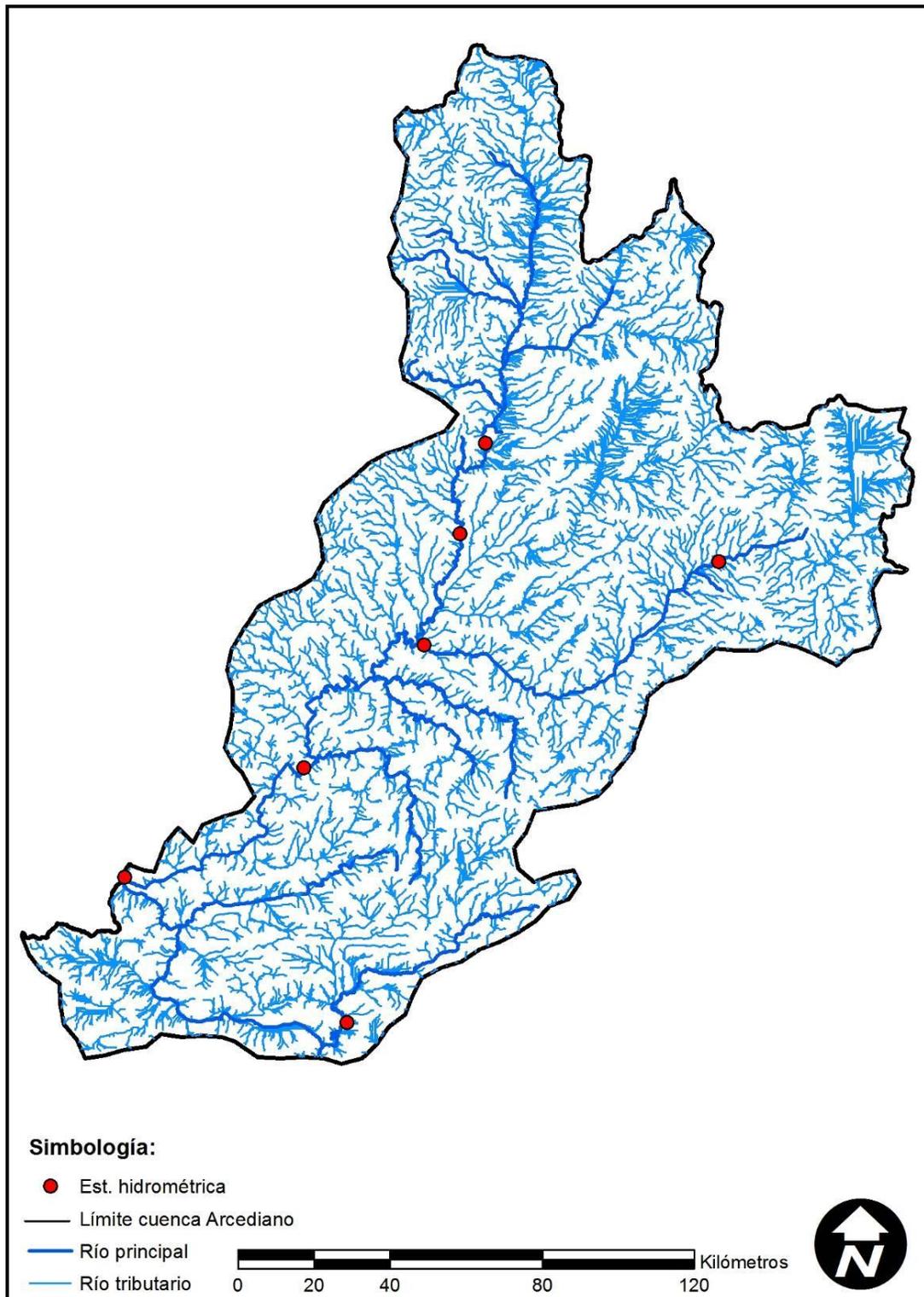


Figura 3.3. Localización de puntos de salida o drenaje

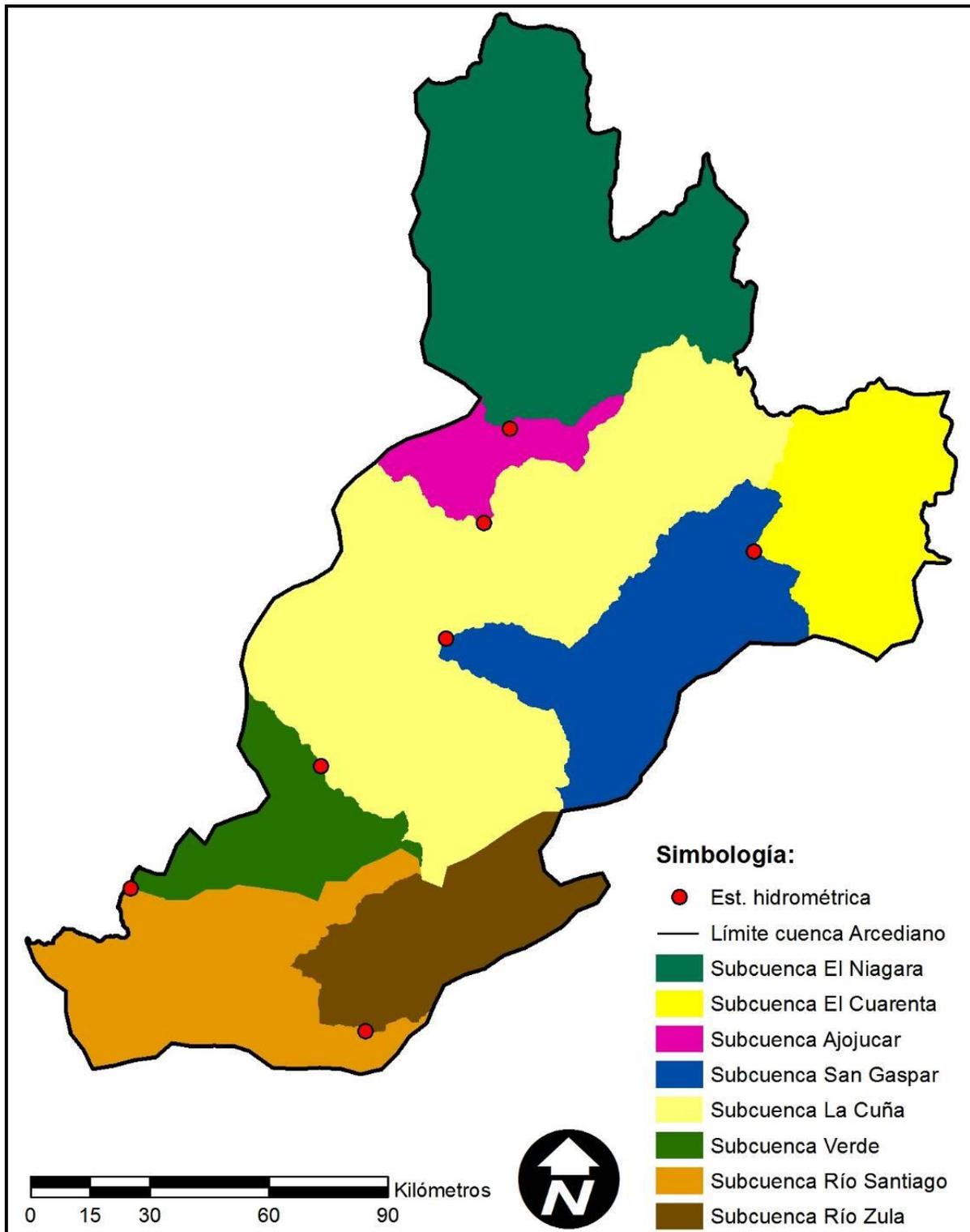


Figura 3.4. Delimitación de Subcuencas

Determinación del escurrimiento superficial

Una vez delimitadas las subcuencas fue necesario determinar el escurrimiento superficial promedio para cada una de ellas. Para ello se empleó una relación precipitación-escurrimiento. A continuación se describe el tratamiento que se le dió a los datos de lluvia y escurrimiento, para posteriormente determinar el volumen de escurrimiento debido a la precipitación:

- a). Se determinó la precipitación media anual (PMA) para cada subcuenca; para ello se identificaron y localizaron las estaciones climatológicas dentro de la cuenca del Arcediano con ayuda del extractor rápido de información climatológica (Eric III). Se localizaron un total de 139 estaciones meteorológicas.

El Eric III (IMTA, 2005) contiene información de la base climatológica nacional tal como se encontraba hasta Agosto del 2005 en el Sistema de Monitoreo Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Dicha base de datos está compuesta de información consistente en reportes diarios de estaciones, con las siguientes variables climatológicas: temperatura observada, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, evaporación, tormenta, granizo, niebla y cobertura del cielo.

La mayoría de las estaciones contienen datos que corresponden de 1960 a 2003, aunque algunas estaciones contienen información anterior y/o superior a dicho periodo. Para el caso particular de este proyecto sólo se requirió de los datos de precipitación.

Se seleccionaron un total de 80 estaciones las cuales tuvieran un registro de datos de los últimos 13 años (1990-2002). Para algunas estaciones fue necesario homogenizar sus datos ya que su serie de tiempo no se encontraba completa, para ello se empleaba una correlación entre la estación con datos faltantes con la que se encontrara más cercana. Una vez obtenido el dato de precipitación anual (PA) para cada estación se aplicó el método de los Polígonos de Thiessen (Aparicio, 2001) para determinar la PMA en cada una de las subcuencas, posteriormente se obtuvo el dato para la cuenca del Arcediano (Figura 3.5).

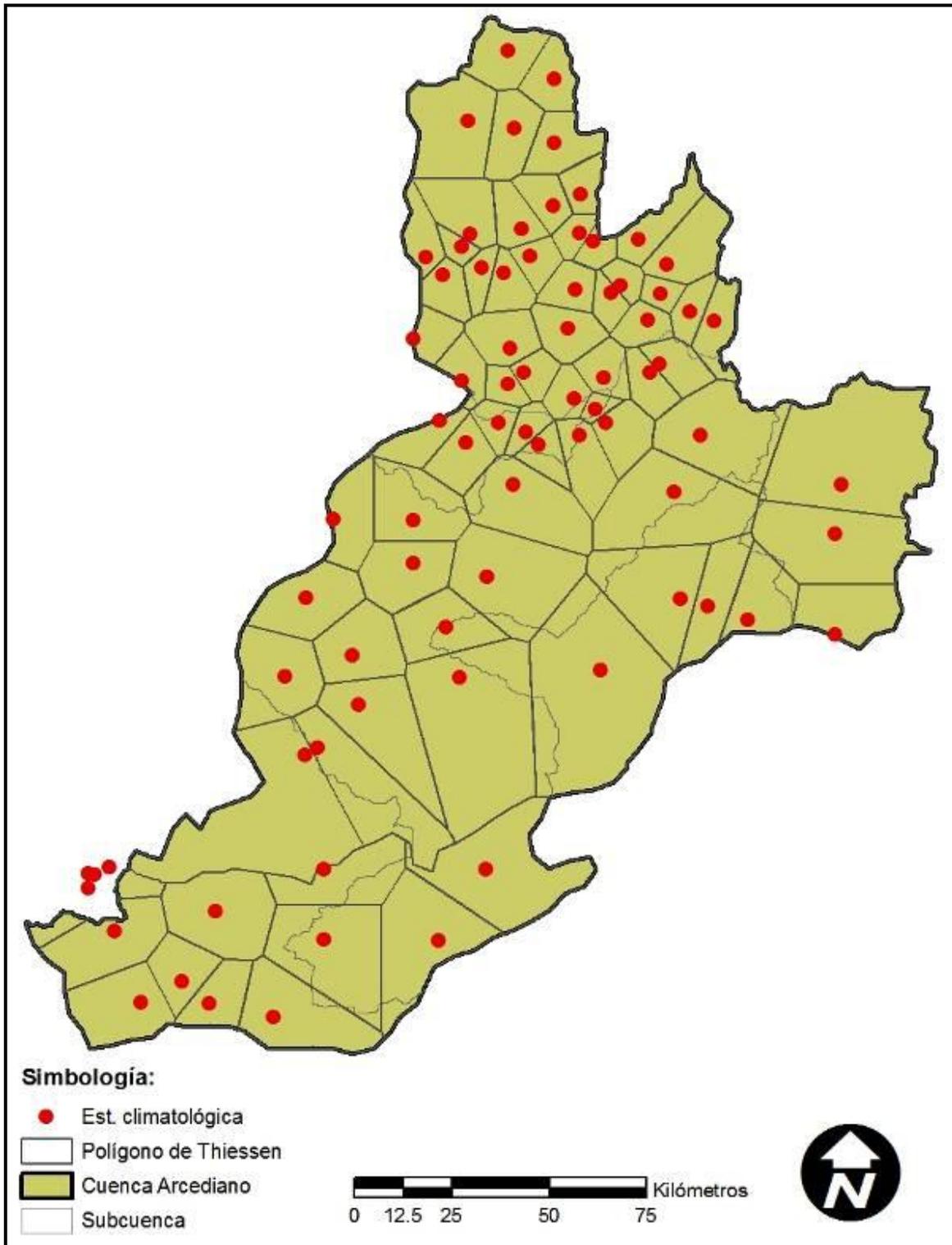


Figura 3.5. Polígonos de Thiessen para la cuenca del Arcediano

b). Se determinó el escurrimiento medio anual (EMA) de cada subcuenca, para esto se identificaron y localizaron las estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del Arcediano, la localización se efectuó con los datos geográficos de la página de espacio digital de SEMARNAT (2007). Los datos correspondientes a la hidrometría se obtuvieron del banco de datos de aguas superficiales (BANDAS). Se localizaron un total de 56 estaciones hidrométricas.

El BANDAS (CONAGUA-IMTA, 2006) contiene información de datos de escurrimientos diarios de cada estación. La base cuenta con registros de 1930 hasta el 2002. Se seleccionaron un total de ocho estaciones con datos de 1990-2002 (Tabla 3.1 y Figura 3.3). De igual forma que en el apartado anterior para algunas estaciones fue necesario completar los datos faltantes en la serie de tiempo, para ello se utilizó una correlación entre los datos de PA y escurrimiento anual (EA) para determinar los datos faltantes.

c). Se determinó una ecuación para determinar el escurrimiento en cualquier parte de una subcuenca, en función de la precipitación.

Los datos obtenidos de PMA y EMA para cada subcuenca fueron divididos por su respectiva área resultando en mm/año. Estos valores son llevados a una gráfica para determinar su relación. La ecuación obtenida indica el escurrimiento superficial generado en cualquier parte de la subcuenca a partir del dato de precipitación.

No se olvide que los datos de PMA para cada subcuenca fueron obtenidos por los polígonos de Thiessen, en el cual considera un polígono como el área de influencia de cada estación meteorológica la cual tiene un dato de precipitación siendo el mismo en cualquier parte de su área de influencia.

Uso del suelo

Para la determinación del uso del suelo en la cuenca del Arcediano se obtuvo la carta geográfica de *Uso de suelo y vegetación 2000* de Internet (SEMARNAT, 2007). Dicho mapa se sobrepuso al de la cuenca en estudio para así determinar el tipo de cobertura existente (Figura 3.6). Las categorías de uso del suelo identificadas en la cuenca del Arcediano son: Asentamiento humano, agricultura, pastizal, matorral y bosque.

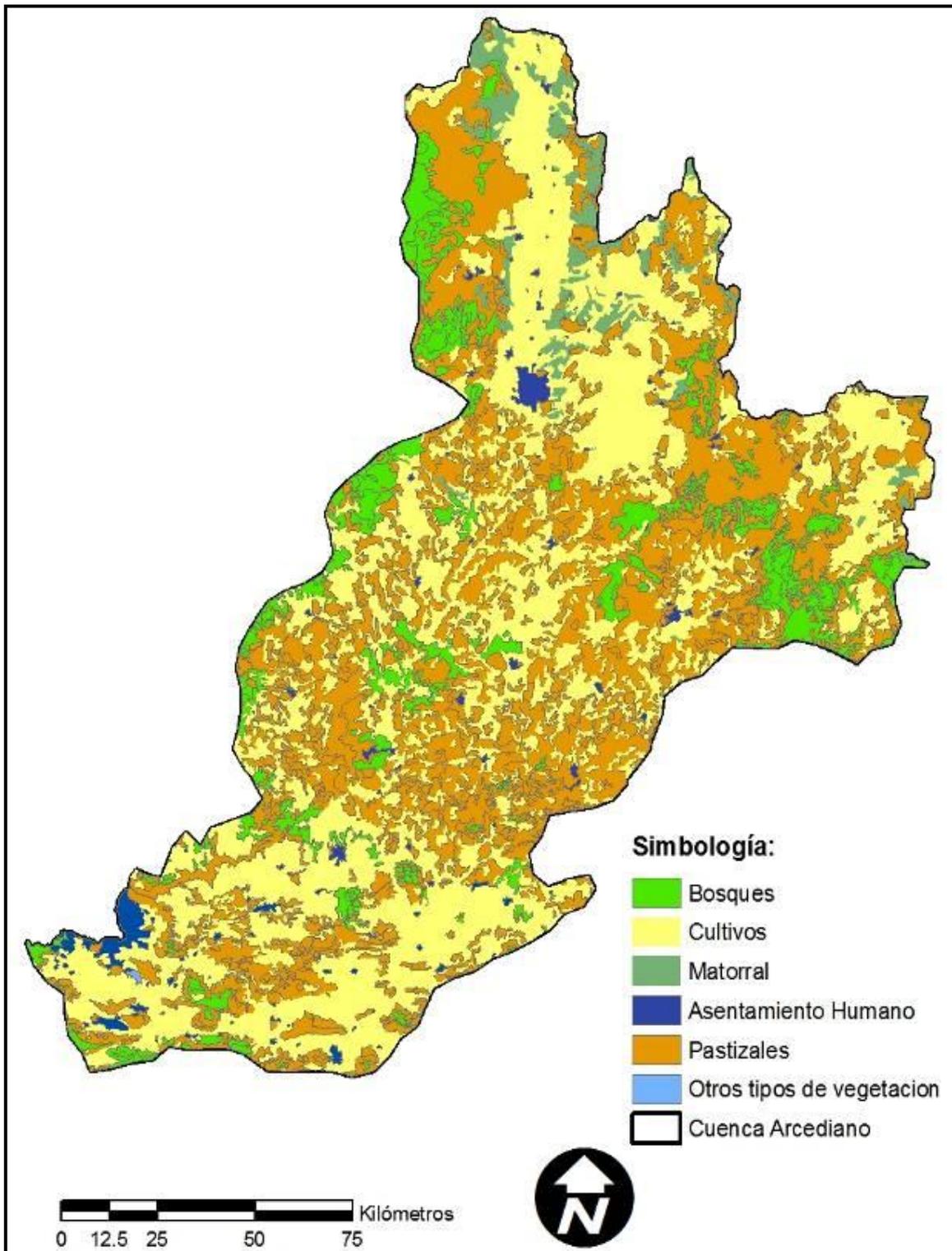


Figura 3.6. Uso del suelo y vegetación

Concentraciones Típicas Promedio (CTP)

La mayoría de CTPs han sido obtenidas para sitios específicos, por lo tanto, el mejor uso de estos valores será el de obtener dichas concentraciones para el sitio que este siendo estudiado, o emplear los ya establecidos para zonas con similares usos de suelo (Benaman *et al.*, 1996) o mejor aún, que presenten similitud en su clima. Salas *et al.* (2001) señala que los cuerpos de agua de Latinoamérica y el Caribe presentan un clima 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 Salto Grande en Argentina. Es por ello que para este estudio se utilizaron los CTPs determinados para el estado de Texas, siendo además que en este estado existen similitudes en los usos de suelo con los que se presentan en la cuenca de estudio. En la Tabla 3.2 se muestran las concentraciones típicas para DBO, NT, PT y Ni presentes en los escurrimientos según el tipo de uso del suelo.

Tabla 3.2. Concentraciones típicas de DBO, NT, PT y Ni por uso de suelo (mg/L)

Uso del Suelo	Demanda bioquímica de oxígeno	Nitrógeno Total	Fósforo Total	Níquel
E. Urbano	9.00 ²	2.10 ²	0.37 ²	0.0073 ³
Agricultura	4.00 ²	1.56 ²	0.36 ²	SD
Bosque	6.00 ²	0.83 ²	0.06 ²	SD
Matorral	0.50 ¹	0.20 ¹	0.01 ¹	SD
Pastizal	6.00 ²	1.51 ²	0.12 ²	SD

SD – Sin datos

E. Urbano - Asentamiento Urbano

Fuentes:

¹EPA, 2001

²Benaman *et al.*, 1996

³Saunders y Maidment, 1996

La estimación de cargas se realizó en base a el volumen de escurrimiento superficial obtenido anteriormente y a los valores correspondiente de CTP's de la Tabla 3.2. Aplicando una constante de conversión de unidades ($K= 10^{-6}$) es posible obtener la carga final anual (t/año) de cada uno de los contaminantes en estudio.

Para determinar las cargas por municipios, se consultó el mapa de división municipal y uso del suelo. Sobreponiendo ambos mapas y el de subcuencas se delineó el área municipal que conforma a cada subcuenca. En función del área y del uso del suelo compartido se estableció la carga por municipio.

3.1.2. Desechos pecuarios

Se consultaron las bases de datos de los cuadernos estadísticos de INEGI para los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí y Zacatecas (INEGI, 2008a, 2008b, 2008c, 2008d y 2008e) para obtener su inventario ganadero. De ellas se obtuvo la producción bovina y porcina para cada uno de los municipios en estudio.

Para estimar la carga orgánica 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). En la Tabla 3.3 se presentan las concentraciones típicas de DBO, NT y PT consideradas para la determinación de carga de contaminantes generadas por porcinos.

Tabla 3.3. Concentraciones típicas de DBO, NT y PT por ganado porcino

Parámetro		kg/UPA*d
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno	0.250
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl	0.050
PT	Fósforo Total	0.013

Fuente: Taiganides *et al.*, 1996

En cuanto a la estimación de carga por estiércol bovino, se consideraron las concentraciones típicas de la Tabla 3.4, tomando como referencia el promedio del peso animal y la finalidad de la producción del bovino (leche o carne).

Tabla 3.4. Concentraciones típicas de DBO, NT y PT en excretas bovinas

Animal	Masa (kg)	Estiércol (kg/d)	DBO (g/d)	NT (g/d)	PT (g/d)
Ganado lechero	68	5	117	27	10
	113	9	194	45	20
	227	18	389	91	37
	453	36	770	186	75
	634	51	1 078	258	105
Ganado de carne	227	18	362	77	57
	453	36	724	154	133
	340	27	543	118	86
	567	45	906	195	144

Fuente: Jones y Sutton, 2003

3.2. Estimación de aportes de contaminantes por fuentes puntuales

Las fuentes puntuales que contribuyen al aporte de contaminantes incluidas en este estudio son las siguientes:

- Descargas industriales
- Descargas de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's)
- Descargas de aguas residuales (AR) municipales sin tratar o crudas

A continuación se describe la metodología que se empleo para estimar la contribución de cargas para cada una de estas fuentes.

3.2.1. Descargas industriales

Se consulto la base de datos del inventario industrial formulado por Hansen *et al* (2006). Dicho inventario considera 94 industrias localizadas en 12 municipios que cuentan con información completa para la estimación de cargas. El 71% de las industrias se encuentran en municipios con afluente al río Santiago, el 1% con afluente al río Verde y el 28% al río Zula.

La caracterización de las descargas industriales se realizó de acuerdo al giro, el cual se encuentra agrupado en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Porcentaje de industriales localizadas por giro y cuenca

Cuenca	Giro	Industrias en la cuenca (%)
Río Santiago	Petroquímica	25.8
	Química	9.6
	Alimenticia	15.0
	Metalmecánica	8.6
	Automotriz	3.2
	Metalurgia	3.2
	Química y Farmacéutica	3.2
	Comp. y eq. eléctricos y electrónicos	2.2
	Servicios	2.2
	Celulosa y Papel	2.2
	Minera-cantera	1.1
	Petróleo	2.2
	Destilación	19.4
	Textil	3.2
Río Verde	Alimenticia	100.0

El volumen de las descargas de aguas residuales industriales por municipio utilizado para la estimación de cargas de contaminantes se presenta en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Volumen de AR industriales por municipio

Municipio	Volumen (m ³ /año)
Arandas	2 108 746
Atotonilco	368 631
Chapala	32 850
El Salto	3 655 709
Ixtlahuacán de los Membrillos	2 049 967
Jamay	5 400
Lagos de Moreno	365.00
Ocotlán	882 743.67
Poncitlán	954 819.40
Tepatitlán de Morelos	375 136
Tototlán	91 980
Zapotlanejo	7 300
Total general	10 533 648

El cálculo de la carga de contaminantes se realizó con base a concentraciones típicas promedio para giros industriales (Hansen *et al.*, 1995 y Jiménez, 2001) (Tabla 3.7). Es importante señalar que debido a la variación de los métodos de producción industrial, los resultados son sólo una aproximación del comportamiento de cada giro.

Tabla 3.7. Concentraciones típicas de DBO, NT y Ni por industria (mg/L)

Parámetro	Establecimiento de servicios	Alimenticia	Destiladora/Vitivinícola	Electromecánica	Madera y derivados	Metal - mecánica	Metalúrgica	Minera y cantera	Petroquímica	Plaguicida	Química y farmacéutica	Textil
DBO	400	2 271	2 022	SD	210	38	893	SD	85	209	502	732
NT	85	114.5	102.5	SD	89	50	184	SD	18	54	65	30.17
Ni	0.04	SD	SD	0.28	0	0.04	0.21	0.28	0.04	SD	0.06	0.08

SD-Sin datos

3.2.2. Descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales

Para estimar la carga debida a esta fuente se consultó el Inventario nacional de plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación (CONAGUA, 2008). Se identificaron un total de 29 plantas para los municipios del estado de Jalisco, de las cuales 22 descargan puntualmente en los cuerpos de agua de interés. Se consideró solamente el estado de Jalisco ya que, las descargas ahí generadas tendrían más impacto que las ubicadas aguas arriba. Además, las plantas de los estados de Guanajuato, San Luís Potosí y Zacatecas no se tienen identificadas puntualmente, es decir, sus efluentes no descargan directamente en los ríos Santiago y Verde.

Dicha base de datos proporciona el caudal tratado por planta (Tabla 3.8), estos valores fueron utilizados para la determinación de cargas.

Tabla 3.8. Caudal tratado por planta de tratamiento

Nombre de la planta	Municipio	Proceso	Caudal tratado (L/s)
Arandas	Arandas	Lodos Activados	110
Santiaguito de Velazquez	Arandas	RAFA	4
Zoológico de Guadalajara	Guadalajara	Lodos Activados	20
Atequiza-Atotonilquillo	Ixtlahuacán de los Membrillos	Lagunas Aireadas	25
Jalostotitlán	Jalostotitlán	Filtros Biológicos	50
Josefino de Allende	Jesús María	RAFA	3
Juanacatlán	Juanacatlán	Zanjas de Oxidación	22
Lagos de Moreno	Lagos de Moreno	Lodos Activados	145
Ocotlán	Ocotlán	Zanjas de Oxidación	190
Labor Vieja	Ocotlán	RAFA	2.5
Ojuelos	Ojuelos de Jalisco	RAFA	3
Poncitlán	Poncitlán	Lagunas Aireadas	35
Cuitzeo	Poncitlán	Lodos Activados	7
El Salto	El Salto	Lodos Activados	32
Parque Industrial	El Salto	Lodos Activados	4
Mirandillas	San Miguel el Alto	RAFA	2
San Miguel el Alto	San Miguel el Alto	Filtros Biológicos	60
Belén del Refugio	Teocaltiche	Lodos Activados	7

RAFA – Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Tabla 3.8. Caudal tratado por planta de tratamiento (Cont.)

Nombre de la planta	Municipio	Proceso	Caudal tratado (L/s)
Teocaltiche	Teocaltiche	Lodos Activados	40
Tepatitlán	Tepatitlán de Morelos	Filtros Biológicos	200
Tototlán	Tototlán	Lodos Activados	19
Zapotlanejo	Zapotlanejo	Lodos Activados	73
<i>Total</i>			1 054

La estimación de contaminantes se realizó con los valores promedio de las caracterizaciones de efluentes realizadas por las consultoras AICISA (2004) y AyMA (2006a; 2006b). En la Tabla 3.9 se presentan las concentraciones típicas para la determinación de cargas por tipo de planta.

Tabla 3.9. Concentración típica de DBO₅, NT y PT por tipo de planta de tratamiento (mg/L)

Tipo de planta	DBO	NT	PT
Lodos Activados	19.17	11.93	9.96
RAFA	27.00	34.44	14.45
Filtros Biológicos	173.90	38.71	5.99
Zanjas de Oxidación	39.94	19.25	11.15
Lagunas Aireadas	99.38	15.03	9.80

La estimación de la carga anual de contaminantes se realizó en base a los caudales tratados en las PTARs (Tabla 3.8) y a las concentraciones promedio presentadas en la Tabla 3.9.

3.2.3. Descargas de aguas residuales municipales sin tratar

La estimación de las cargas de contaminantes generada por descargas municipales sin tratar se realizó con base en la selección de aquellas localidades que se encuentran ubicadas dentro de la cuenca del Arcediano y las cuales carecen del servicio de tratamiento de sus aguas residuales.

Para determinar la ubicación de las localidades se consultó la base de datos del SNIM (Sistema Nacional de Información Municipal) (INAFED, 2006). Se procesó la información de carácter espacial en el programa ArcView y se determinó mediante un mapa que localidades eran motivo del presente estudio. Esta información sirvió para determinar el volumen de aguas residuales generadas por municipio para la posterior obtención de cargas.

Se determinó el número de habitantes dentro de la zona de estudio por municipio con los datos de INEGI (2006) y del SNIM.

Con los datos de población, cobertura de agua potable y alcantarillado (CEA, 2008), dotación media de agua potable (ORVA Ingeniería, S.A. de C.V.) y aportación de aguas residuales (CONAGUA, 1994) se determinó el volumen de agua residual generada por municipio. A estos datos se les restó, si era el caso, el volumen que es tratado en la PTAR (Tabla 3.11)

Las concentraciones típicas promedio de DBO₅, NT y PT necesarias para determinar la determinación de cargas se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Concentraciones típicas de DBO₅, NT y PT en aguas residuales municipales (mg/L)

Parámetro	Concentración
Demanda bioquímica de oxígeno	200
Nitrógeno Total	40
Fósforo Total	10

Fuente: FAO, 1992

Con las concentraciones típicas de la Tabla 3.10 y los caudales de agua residual señalados en la Tabla 3.11 se estimó la carga anual de NT y PT generada.

Tabla 3.11. Número de habitantes y caudales de agua residual por municipio

Cuenca	Municipio	Población en cuenca (hab)	Cobertura de agua potable (%)	Cobertura de alcantarillado (%)	Vol. de AR generada (L/s)	Vol. de AR tratada (L/s)	Vol. de AR cruda (L/d)
Río Santiago	Arandas	76 183	98.15	93.56	170.04	114.00	4 841 688.18
	Atotonilco el Alto	46 462	99.01	94.68	105.86	0.00	9 146 404.25
	El Salto	111 436	97.68	94.49	249.99	36.00	18 488 732.53
	Guadalajara	1 600 940	96.27	96.16	3 602.19	20.00	309 500 799.08
	Ixtlahuacan de los Membrillos	17 565	98.93	97.08	41.00	25.00	1 382 625.35
	Juanacatlán	11 902	99.57	96.64	27.84	22.00	504 253.10
	Ocotlán	89 340	98.50	96.67	206.77	192.50	1 232 595.70
	Poncitlán	29 357	98.17	91.70	64.23	42.00	1 921 096.24
	Tepatitlán de Morelos	126 625	98.66	95.95	291.35	235.00	4 868 412.70
	Tlajomulco de Zuñiga	167 679	93.09	91.66	347.75	0.00	30 045 562.23
	Tlaquepaque	563 006	97.29	96.13	1 279.81	0.00	110 575 640.49
	Tonalá	408 729	96.76	95.42	917.23	0.00	79 248 311.80
	Tototlán	19 710	99.50	93.59	44.61	19.00	2 212 814.77
	Zapotlán del Rey	16 274	99.04	93.79	36.74	0.00	3 174 539.78
	Zapotlanejo	53 036	98.35	92.44	117.19	73.00	3 818 416.89
Río Verde	Acatic	18 551	99.40	94.28	42.26	0.00	3 650 838.14
	Cañadas de Obregón	3 978	95.31	84.43	7.78	0.00	672 232.23
	Cuquío	4 871	99.12	81.02	9.51	0.00	821 434.85
	Encarnación de Díaz	47 397	96.80	89.26	99.54	0.00	8 600 077.96
	Ixtlahuacán del Río	3 813	99.54	91.30	8.42	0.00	727 697.86
	Jalostotitlán	28 642	98.18	91.79	62.34	50.00	1 066 455.88

Dotación media de agua potable = 280 L/hab/d

Aportación de AR al sistema de alcantarillado = 75% de la dotación

Tabla 3.11. Número de habitantes y caudales de agua residual por municipio (Cont.)

Cuenca	Municipio	Población (hab)	Cobertura de agua potable (%)	Cobertura de alcantarillado (%)	Vol. de AR generada (L/s)	Vol. de AR tratada (L/s)	Vol. de AR cruda (L/d)
Río Verde	Mexicacán	6 084	99.51	91.76	13.50	0.00	1 166 617.89
	San Juan de los Lagos	57 104	98.54	92.49	126.50	0.00	10 929 320.52
	Teocaltiche	36 976	99.74	88.15	79.02	47.00	2 766 215.73
	Valle de Guadalupe	6 052	99.66	91.53	13.42	0.00	1 159 317.95
	Villa Hidalgo	17 291	96.18	89.56	36.20	0.00	3 127 794.87
	Yahualica de González Gallo	22 232	97.07	88.99	46.68	0.00	4 033 033.96
	Zapotlanejo	2 791	98.35	92.44	6.17	0.00	532 927.20

Dotación media de agua potable = 280 L/hab/d

Aportación de AR al sistema de alcantarillado = 75% de la dotación

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se describen los resultados de estimación de escurrimientos en las cuencas de los ríos Verde y Santiago, las cargas para DBO, nutrientes y níquel. Se discuten los resultados obtenidos, identificando las fuentes de contaminantes con mayores contribuciones en la cuenca del Arcediano.

4.1 Estimación de escurrimientos

Los resultados de estimación de escurrimientos se presentan por cuenca y subcuenca en la Tabla 4.1. Se obtuvo un escurrimiento anual de 1 173 Hm³. El 27% de escurrimiento total en la cuenca corresponde al río Santiago, mientras que el volumen restante escurre en el río Verde. Al desviar las descargas de aguas residuales de la ciudad de Guadalajara, el volumen escurrido en el río Santiago se reduciría en 65 Hm³/año (CEA, 2007). Se estima que el 78% del escurrimiento total resultante, o 868 Hm³/año, entra a la presa.

Tabla 4.1. Datos de precipitación y escurrimiento por subcuencas para la cuenca del Arcediano

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	PMA (mm)	EMA _{Cp} (Hm ³)
Río Santiago	Río Zula	1 962	798	100
	Río Santiago	2 973	858	214
Río Verde	Presa El Niágara	5 462	478	29
	Presa El Cuarenta	2 327	465	27
	Presa Ajojucar	816	532	45
	San Gaspar	2 939	630	106
	La Cuña	7 619	637	510
	Río Verde	1 470	788	142
Total Cuenca Arcediano		25 568	648	1 173

PMA- Precipitación Media Anual

EMA_{Cp}- Escurrimiento Medio Anual por Cuenca propia

4.2 Estimación de cargas

A continuación se describen los resultados estimados de cargas puntuales y no puntuales en la cuenca en tres niveles; primeramente a nivel de la cuenca del Arcediano, la segunda parte se desarrolla para las cuencas fluviales del Santiago y Verde y finalmente de forma municipal. Esta última parte fue establecida ya que en el Artículo 115 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos señala que les corresponde a los ayuntamientos el saneamiento de sus aguas residuales, además son los encargados de garantizar los servicios de agua potable y alcantarillado (DOF, 2004).

- Cuenca del Arcediano

En la Tabla 4.2, Figura 4.1 y Figura 4.2 se observan los resultados totales de carga anual de DBO, NT, PT y Ni obtenidos para fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca. De ella se aprecia que la mayor contribución de materia orgánica y nutrientes le corresponde a las descargas de origen no puntual, por lo contrario a lo que se refiere a níquel las de tipo puntual son las principales.

Tabla 4.2. Carga total anual de DBO, NT, PT y Ni por fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca del Arcediano (t/año)

Fuente	DBO	NT	PT	Ni
Puntual	107 420	10 642	2 234	0.33
No puntual	567 860	121 675	54 075	0.14
Total cuenca Arcediano	675 280	132 317	56 309	0.5

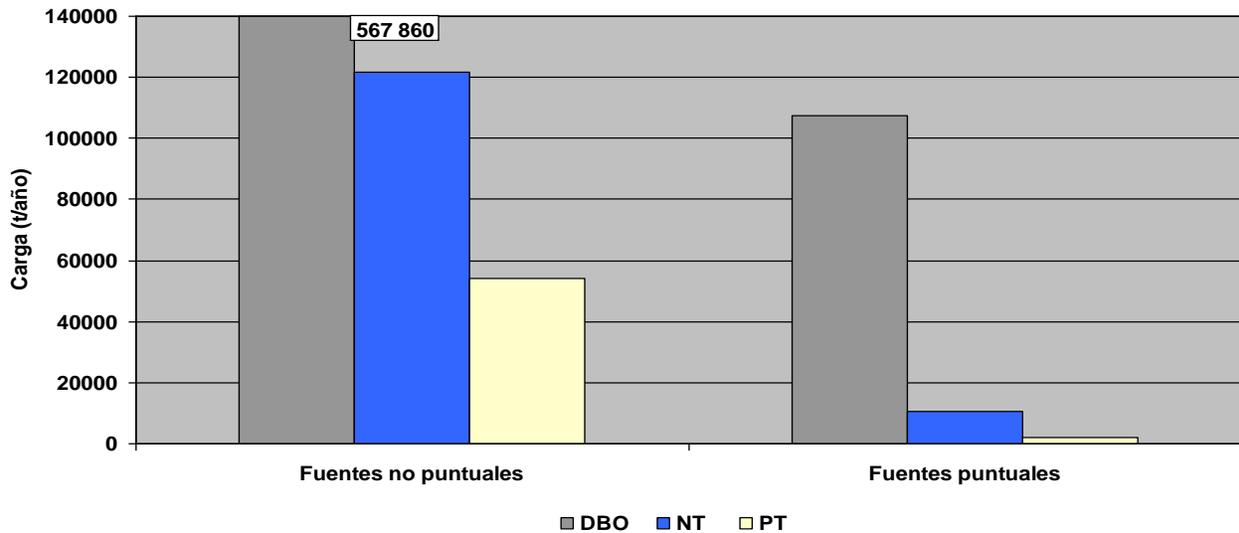


Figura 4.1. Carga anual de materia orgánica y nutrientes por fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca del Arcediano

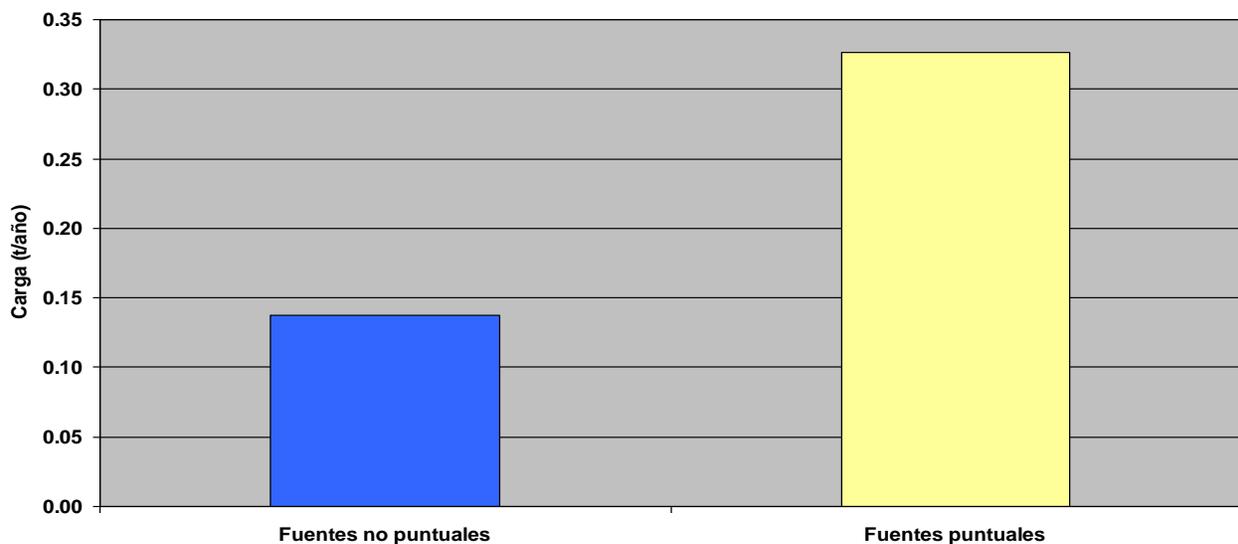


Figura 4.2. Carga anual de níquel por fuentes puntuales y no puntuales en la cuenca del Arcediano

Como se observa en la Tabla 4.3, las fuentes de tipo pecuario contribuyen con aproximadamente el 83%, 91% y 96% de DBO, NT y PT respectivamente del total descargado en la cuenca. La descargas municipales e industriales contribuyen con sólo 15.53% de DBO, 7.40% de NT y 3.42% de PT a nivel cuenca. Considerando que las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR's) del tipo convencional, planeadas a construir para sanear este tipo de descargas, tiene típicamente remociones

de 20% hasta un máximo del 40% de nitrógeno y fósforo (Choi *et al.*, 2004; Beavers y Tully, 2005), no ayudarían a una reducción significativa de los aportes de estos contaminantes hacia la cuenca.

Tabla 4.3. Contribución de DBO, NT, PT y Ni por tipo de fuente en la cuenca del Arcediano (%)

Fuente		Contribución			
		DBO	NT	PT	Ni
Puntual	PTAR's	0.37	0.64	0.55	SD
	Municipales	6.70	6.84	3.42	SD
	Industriales	8.83	0.56	SD	70.28
No puntual	E. Urbano	0.03	0.03	0.01	29.72
	Agricultura	0.27	0.54	0.30	SD
	Bosque	0.09	0.06	0.01	SD
	Matorral	0.01	0.02	<0.001	SD
	Pastizal	0.26	0.33	0.06	SD
	Pecuario	83.44	90.98	95.65	SD
Total		100	100	100	100

PTAR's – Plantas de tratamiento de aguas residuales
E. Urbano Esguerrimiento Urbano

En la misma Tabla 4.3 se observa que, las aportaciones de origen industrial son responsables del 70% del total de la carga de níquel estimado para la cuenca y, el restante es atribuible a los esguerrimientos urbanos. Las descargas industriales podrían reducirse si éstas recibieran un pretratamiento antes de ser unidas a las descargas municipales en los sistemas de alcantarillado.

La Tabla 4.4 presenta las cargas estimadas de Ni para los diferentes giros industriales identificados en la cuenca. Los giros industriales con mayor contribución de Ni a la cuenca del Arcediano son la química, petroquímica y textil. Ambos giros industriales dan origen aproximadamente al 50% del total de Ni generado en la cuenca.

Tabla 4.4. Carga anual de níquel por giro industrial en la cuenca del Arcediano (t/año)

Giro Industrial	Carga
Petroquímica	0.085
Química	0.091
Metalmecánica	0.011
Automotriz	SD
Metalurgia	0.029
Química y Farmacéutica	0.014
Comp. y eq. eléctricos y electrónicos	SD
Servicios	0.019
Celulosa y Papel	0.00001
Minera-cantera	0.009
Petróleo	0.004
Textil	0.063
Total	0.33

SD – Sin Datos

- *Cuencas río Santiago y Verde*

En la Tabla 4.5 se presenta la distribución de carga anual total de DBO, NT, PT y Ni para las cuencas de los ríos Santiago y Verde atribuibles al tipo de fuente, así como la parte proporcional que le corresponde a cada cuenca fluvial, en el aporte de contaminantes total en la cuenca del Arcediano.

La mayor aportación de materia orgánica ocurre en la cuenca del río Verde con más del 60% del total generado en la cuenca del Arcediano, debida principalmente a los escurrimientos pecuarios.

En lo que corresponde a la aportación de nutrientes, en la misma Tabla 4.5, la mayor contribución le corresponde a la cuenca del río Verde con aproximadamente las dos terceras partes del total calculado, es decir, 89 127 t/año y 40 484 t/año de NT y PT, respectivamente, tiene su origen en dicha cuenca. En ambas cuencas, el principal contribuyente de nutrientes son los escurrimientos pecuarios.

Para Ni se observa que más del 90% de las descargas tienen su origen en la cuenca del río Santiago, siendo el principal contribuyente el sector industrial.

Estos resultados eran de esperarse ya que ambos sectores económicos, ganadería e industria, están distribuidos de esa misma forma. La actividad pecuaria tiene sus mayores representantes en la cuenca del río Verde y la industria, en la cuenca del río Santiago, localizándose en ésta el corredor industrial de la región.

Tabla 4.5. Distribución de carga anual de DBO, NT, PT y Ni por fuente y cuenca (t/año)

Fuente	Cuenca							
	Río Santiago				Río Verde			
	DBO	NT	PT	Ni	DBO	NT	PT	Ni
Puntuales								
<i>PTAR's</i>	891.5	313.4	204.6	SD	1 600.8	529.1	104.8	SD
<i>Municipales</i>	42 410.2	8 482.0	1 802.4	SD	2 865.5	573.1	121.8	SD
<i>Industriales</i>	57 558.5	710.9	SD	0.32	2 093.5	34.0	SD	0.004
No puntuales								
<i>E. Urbano</i>	122.8	28.7	5.1	0.10	47.2	11.0	1.9	0.04
<i>Agricultura</i>	701.5	273.6	63.1	SD	1 145.1	446.6	103.1	SD
<i>Bosque</i>	118.5	16.4	1.2	SD	481.8	66.6	4.8	SD
<i>Matorral</i>	32.2	12.9	0.1	SD	43.22	17.3	0.1	SD
<i>Pastizal</i>	210.6	53.0	4.2	SD	1 518.6	382.2	30.4	SD
<i>Pecuario</i>	156 470.9	33 299.1	13 743.3	SD	406 967.71	87 067.5	40 117.5	SD
<i>Subtotal</i>	258 517	43 190	15 824	0.42	416 763	89 127	40 484	0.04
<i>% del total</i>	38	33	28	91	62	67	72	9

SD – Sin Datos

- *Municipios*

Los resultados de cargas anuales totales de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente se muestran en la Tabla 4.6. Se observa que las mayores contribuciones corresponden a los ayuntamientos del estado de Jalisco. Para la cuenca del río Santiago en lo que se refiere a DBO, NT y PT los municipios seleccionados como los mayores contribuyentes, aportan a la cuenca aproximadamente el 99%, respectivamente, del total generado. Para Ni, solo el municipio de El Salto participa con aproximadamente el 41% el resto está repartido en los demás municipios. De los resultados para los municipios asentados en la cuenca del río Verde, el 84% del DBO, 81% del NT y 78% del PT, se generan en los municipios seleccionados. Se observa también que un solo municipio (Tepatitlán de Morelos) produce aproximadamente el 33% de Ni. Para los demás municipios al ser comparados con el dato de mayor valor no se vislumbran como una cantidad alta.

En la misma tabla se observa que, de manera general los municipios de, Arandas, Acatic, Lagos de Moreno, San Juan de los Lagos y Tepatitlán de Morelos son los mayores contribuyentes de nutrientes, la participación conjunta de sus cargas representan aproximadamente el 54%, 51% y 48% del total generado en la cuenca del Arcediano de DBO, NT y PT, respectivamente. Para Ni, además de los dos municipios señalados en el párrafo anterior se suman Ixtlahuacán de los Membrillos y Poncitlán como los principales actores en la generación de este metal, su aportación conjunta es del 75% del total generado.

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año)

Municipio	Fuentes puntuales				Fuentes no puntuales			
	DBO	NT	PT	Ni	DBO	NT	PT	Ni
Acatic	SD	SD	SD	SD	10.37	4.01	0.88	0.000
Arandas	42 806.97	384.84	82.75	SD	78 248.97	16 096.75	5 983.28	0.001
Atotonilco el Alto	8 040.31	171.32	28.38	SD	14 880.38	3 180.67	1 177.72	0.002
Ayotlán	SD	SD	SD	SD	5.71	2.06	0.44	0.000
Chapala	74.59	3.76	SD	SD	10.29	2.26	0.28	0.000
El Salto	2 478.46	429.66	68.38	0.17	2 038.38	456.86	208.33	0.005
Guadalajara	22 602.07	4 526.66	965.59	SD	24.10	5.66	0.98	0.019
Ixtlahuacán de los Membrillos	2 428.32	182.65	12.29	0.07	5 619.42	1 220.76	718.58	0.002
Jamay	12.26	0.62	SD	SD	7.52	2.26	0.36	0.000
Jesús María	2.55	3.26	1.37	SD	14.19	4.52	0.76	0.000
Jocotepec	SD	SD	SD	SD	20.43	5.34	0.93	0.000
Juanacatlán	49.65	18.77	9.40	SD	1 123.25	254.94	117.50	0.001
La Barca	SD	SD	SD	SD	7.12	2.62	0.56	0.000
Ocotlán	2 464.16	253.90	70.87	SD	1 733.42	405.21	192.58	0.006
Poncitlán	810.57	90.68	19.65	SD	3 234.93	727.41	441.29	0.002
San Miguel el Alto	SD	SD	SD	SD	2.75	0.71	0.07	0.000
Tepatitlán de Morelos	355.39	71.08	15.10	SD	129.30	41.32	7.98	0.001
Tlajomulco de Zúñiga	2 193.33	438.67	93.22	SD	7 093.54	1 494.55	588.48	0.018
Tlaquepaque	8 072.02	1 614.40	343.06	SD	4 221.69	899.67	526.87	0.024

SD – Sin Datos

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Fuentes puntuales				Fuentes no puntuales			
	DBO	NT	PT	Ni	DBO	NT	PT	Ni
Tonalá	5 785.13	1 157.03	245.87	SD	5 145.57	1 105.39	441.69	0.014
Tototlán	2 009.22	49.29	11.96	SD	10 127.46	2 269.25	1 059.55	0.001
Zapotlán del Rey	231.74	46.35	9.85	SD	2 855.46	667.18	319.75	0.001
Zapotlanejo	443.39	63.41	29.34	SD	21 102.29	4 834.17	2 028.06	0.002
Subtotal río Santiago	100 860.13	9 506.33	2 007.08	0.32	157 656.55	33 683.58	13 816.94	0.10
Aguascalientes	SD	SD	SD	SD	9 699.66	2 172.85	1 171.34	0.003
Asientos	SD	SD	SD	SD	2 387.69	496.35	176.51	0.000
Calvillo	SD	SD	SD	SD	5.43	0.94	0.10	0.000
Cosío	SD	SD	SD	SD	3 095.20	697.87	397.49	0.000
El Llano	SD	SD	SD	SD	815.80	183.94	87.78	0.001
Jesús María	SD	SD	SD	SD	4 151.88	919.13	481.36	0.000
Pabellón de Arteaga	SD	SD	SD	SD	3 614.41	758.47	293.48	0.000
Rincón de Romos	SD	SD	SD	SD	1 324.33	279.83	111.05	0.000
San Francisco de los Romo	SD	SD	SD	SD	563.81	118.85	46.55	0.000
San José de Gracia	SD	SD	SD	SD	2 264.03	510.73	291.55	0.000
Tepezalá	SD	SD	SD	SD	2 372.40	488.15	162.88	0.000
León	SD	SD	SD	SD	0.374	0.062	0.005	0.000
Ocampo	SD	SD	SD	SD	2 480.91	558.39	315.92	0.000
San Felipe	SD	SD	SD	SD	5.79	1.10	0.11	0.000
Acatic	266.51	53.30	11.33	SD	32 104.20	6 644.91	2 726.48	0.001
Arandas	SD	SD	SD	SD	44.27	13.05	1.947	0.001
Cañadas de Obregón	49.07	9.81	2.09	SD	1 888.82	410.21	249.04	0.001

SD – Sin Datos

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Fuentes puntuales				Fuentes no puntuales			
	DBO	NT	PT	Ni	DBO	NT	PT	Ni
Cuquío	59.96	11.99	2.55	SD	5873.01	1 267.47	907.70	0.000
Encarnación de Díaz	627.81	125.56	26.68	SD	20372.20	4 656.88	2 015.06	0.001
Ixtlahuacán del Río	53.12	10.62	2.26	SD	53.69	16.01	2.89	0.001
Jalostotitlán	416.37	47.33	14.50	SD	12345.43	2 670.82	1 261.55	0.002
Lagos de Moreno	62.56	57.66	38.87	SD	64171.40	13 616.90	6 068.07	0.003
Mexxicacán	85.16	17.03	3.62	SD	1922.73	418.98	283.72	0.000
Ojuelos de Jalisco	2.55	3.26	1.37	SD	10696.10	2 318.73	1 642.32	0.000
San Diego de Alejandría	0.00	SD	SD	SD	14.79	4.01	0.44	0.000
San Juan de los Lagos	797.84	159.57	33.91	SD	75731.39	15 818.94	5 866.20	0.001
San Julián	SD	SD	SD	SD	10666.05	2 258.63	849.06	0.001
San Miguel el Alto	327.46	83.54	13.21	SD	15862.39	3 614.47	1 783.24	0.001
Teocaltiche	221.94	59.06	21.18	SD	16004.00	3 632.64	1 807.78	0.001
Tepatitlán de Morelos	2943.17	368.04	27.56	0.004	65781.59	13 922.59	6 032.00	0.010
Unión de San Antonio	0.00	SD	SD	SD	4834.42	1 035.96	709.43	0.001
Valle de Guadalupe	84.63	16.93	3.60	SD	5807.00	1 240.99	506.34	0.001
Villa Hidalgo	228.33	45.67	9.70	SD	10316.69	2 162.87	1 226.31	0.001
Yahualica de González Gallo	294.41	58.88	12.51	SD	7873.07	1 675.06	894.85	0.002
Zapotlanejo	38.90	7.78	1.65	SD	29.89	11.67	2.53	0.000
Villa de Arriaga	SD	SD	SD	SD	0.16	0.05	0.01	0.000
Apulco	SD	SD	SD	SD	1314.04	299.79	164.02	0.000
Cuauhtémoc	SD	SD	SD	SD	1073.38	242.46	137.57	0.000
Genaro Codina	SD	SD	SD	SD	737.13	165.60	91.63	0.000

SD – Sin Datos

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Fuentes puntuales				Fuentes no puntuales			
	DBO	NT	PT	Ni	DBO	NT	PT	Ni
Guadalupe	SD	SD	SD	SD	0.92	0.31	0.05	0.000
Loreto	SD	SD	SD	SD	1463.85	327.30	178.35	0.000
Luis Moya	SD	SD	SD	SD	1619.90	365.42	207.71	0.000
Nochistlán de Mejía	SD	SD	SD	SD	5050.30	1 143.79	630.77	0.002
Noria de Ángeles	SD	SD	SD	SD	0.48	0.18	0.04	0.000
Ojocaliente	SD	SD	SD	SD	3011.40	678.68	384.12	0.000
Pinos	SD	SD	SD	SD	0.35	0.11	0.01	0.000
Trancoso	SD	SD	SD	SD	0.22	0.09	0.02	0.000
Villa García	SD	SD	SD	SD	756.45	168.96	90.42	0.000
Villanueva	SD	SD	SD	SD	0.07	0.01	0.00	0.000
Subtotal río Verde	6 559.81	1 136.03	226.59	0.004	410 203.53	87 991.21	40 257.81	0.038
Total General	107 420	10 642	2 234	0.33	567 860	121 675	54 075	0.14

SD – Sin Datos

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Total			
	DBO	NT	PT	Ni
Acatic	10.37	4.01	0.88	0.000
Arandas	121 055.93	16 481.60	6 066.04	0.001
Atotonilco el Alto	22 920.69	3 351.99	1 206.10	0.002
Ayotlán	5.71	2.06	0.44	0.000
Chapala	84.88	6.02	0.28	0.000
El Salto	4 516.84	886.51	276.71	0.172
Guadalajara	22 626.17	4 532.32	966.57	0.019
Ixtlahuacán de los Membrillos	8 047.73	1 403.41	730.87	0.072
Jamay	19.78	2.88	0.36	0.000
Jesús María	16.75	7.77	2.13	0.000
Jocotepec	20.43	5.34	0.93	0.000
Juanacatlán	1 172.89	273.72	126.91	0.001
La Barca	7.12	2.62	0.56	0.000
Ocotlán	4 197.57	659.11	263.46	0.006
Poncitlán	4 045.51	818.09	460.94	0.087
San Miguel el Alto	2.75	0.71	0.07	0.000
Tepatitlán de Morelos	484.69	112.39	23.08	0.001
Tlajomulco de Zúñiga	9 286.87	1 933.22	681.69	0.018
Tlaquepaque	12 293.71	2 514.08	869.93	0.024

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Total			
	DBO	NT	PT	Ni
Tonalá	10 930.70	2 262.42	687.56	0.014
Tototlán	12 136.68	2 318.54	1 071.51	0.001
Zapotlán del Rey	3 087.21	713.53	329.60	0.001
Zapotlanejo	21 545.69	4 897.58	2 057.40	0.002
Subtotal río Santiago	258 516.68	43 189.91	15 824.02	0.42
Aguascalientes	9 699.66	2 172.85	1 171.34	0.003
Asientos	2 387.69	496.35	176.51	0.000
Calvillo	5.43	0.94	0.10	0.000
Cosío	3 095.20	697.87	397.49	0.000
El Llano	815.80	183.94	87.78	0.001
Jesús María	4 151.88	919.13	481.36	0.000
Pabellón de Arteaga	3 614.41	758.47	293.48	0.000
Rincón de Romos	1 324.33	279.83	111.05	0.000
San Francisco de los Romo	563.81	118.85	46.55	0.000
San José de Gracia	2 264.03	510.73	291.55	0.000
Tepezalá	2 372.40	488.15	162.88	0.000
León	0.37	0.06	0.00	0.000
Ocampo	2 480.91	558.39	315.92	0.000
San Felipe	5.79	1.10	0.11	0.000
Acatic	32 370.71	6 698.21	2 737.81	0.001
Arandas	44.27	13.05	1.95	0.001
Cañadas de Obregón	1 937.89	420.02	251.13	0.001

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Total			
	DBO	NT	PT	Ni
Cuquío	5 932.98	1 279.47	910.25	0.000
Encarnación de Díaz	21 000.01	4 782.44	2 041.74	0.001
Ixtlahuacán del Río	106.82	26.63	5.15	0.001
Jalostotitlán	12 761.80	2 718.15	1 276.06	0.002
Lagos de Moreno	64 233.96	13 674.55	6 106.94	0.003
Mexxicacán	2 007.90	436.02	287.34	0.000
Ojuelos de Jalisco	10 698.66	2 321.99	1 643.69	0.000
San Diego de Alejandría	14.79	4.01	0.44	0.000
San Juan de los Lagos	76 529.23	15 978.51	5 900.10	0.001
San Julián	10 666.05	2 258.63	849.06	0.001
San Miguel el Alto	16 189.85	3 698.00	1 796.45	0.001
Teocaltiche	16 225.94	3 691.71	1 828.96	0.001
Tepatitlán de Morelos	68 724.76	14 290.63	6 059.57	0.014
Unión de San Antonio	4 834.42	1 035.96	709.43	0.001
Valle de Guadalupe	5 891.63	1 257.92	509.94	0.001
Villa Hidalgo	10 545.02	2 208.53	1 236.01	0.001
Yahualica de González Gallo	8 167.48	1 733.94	907.36	0.002
Zapotlanejo	68.79	19.45	4.18	0.000
Villa de Arriaga	0.16	0.05	0.01	0.000
Apulco	1 314.04	299.79	164.02	0.000
Cauhtémoc	1 073.38	242.46	137.57	0.000
Genaro Codina	737.13	165.60	91.63	0.000

Tabla 4.6. Aporte total de DBO, NT, PT y Ni por municipio y por tipo de fuente (t/año) (Cont.)

Municipio	Total			
	DBO	NT	PT	Ni
Guadalupe	0.92	0.31	0.05	0.000
Loreto	1 463.85	327.30	178.35	0.000
Luis Moya	1 619.90	365.42	207.71	0.000
Nochistlán de Mejía	5 050.30	1143.79	630.77	0.002
Noria de Ángeles	0.48	0.18	0.04	0.000
Ojocaliente	3 011.40	678.68	384.12	0.000
Pinos	0.35	0.11	0.01	0.000
Trancoso	0.22	0.09	0.02	0.000
Villa García	756.45	168.96	90.42	0.000
Villanueva	0.07	0.01	0.00	0.000
Subtotal río Verde	416 763.34	89 127.24	40 484.40	0.042
Total General	675 280	132 317	56 308	0.5

4.3 Estimación de cargas aguas abajo

En las tablas Tabla 4.2, Tabla 4.5 y Tabla 4.6, se presentan los valores anuales totales estimados de DBO (675 280 t), NT (132 317 t), PT (56 308 t) y Ni (0.5 t) para la cuenca del Arcediano. Esta suma de entradas para cada contaminante compone la carga aguas abajo de la cuenca, que para este estudio resulta ser el área de embalse de la presa Arcediano. Sin embargo, dado que la metodología empleada para la estimación de dichos datos asume que las cargas de contaminantes hacia aguas abajo son conservativas, se decidió considerar solamente los aportes de aquellos municipios asentados en las márgenes de las corrientes principales ya que estos de cierta forma descargan sus aguas residuales directamente sobre dichos cuerpos de agua.

Los municipios asentados en las márgenes del río Santiago, de aguas arriba a aguas abajo son: Ocotlán, Poncitlán, Zapotlán del Rey, Chapala, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Tonalá, Zapotlanejo y Guadalajara. Los cuales en conjunto contribuyen al total general de cargas con el 13% de DBO, 14% de NT, 12% de PT y 79% de Ni.

De igual forma para el río Verde los municipios localizados en su margen, de aguas arriba a la confluencia con el río Santiago son los siguientes: Villa Hidalgo, Teocaltiche, Jalostotitlán, Cañadas de Obregón, Mexxicacán, Yahualica de González Gallo, Valle de Guadalupe, Tepatitlán de Morelos, Cuquío, Acatic, Zapotlanejo e Ixtlahuacán del Río. Estos 12 municipios en conjunto aportan al total general el 24% de DBO, 26% de NT, 28% de PT y 5% de Ni.

Por lo tanto la carga total anual estimada de DBO, NT, PT y Ni hacia aguas abajo es de aproximadamente 254 284 t, 53 167 t, 22 596 y 0.4 t, respectivamente.

Para determinar una correcta solución a la problemática de contaminación del embalse resulta primordial determinar cuales de estos municipios son los protagonistas en la contribución de materia orgánica, nutrientes o níquel para su oportuna reducción y a la vez contribuir a la recuperación o conservación de los ríos Verde y Santiago.

En la Figura 4.3 se muestran los aportes de DBO para los municipios asentados en la margen del río Santiago, se observa que los municipios de Guadalajara, Zapotlanejo y Tonalá son los mayores contribuyentes para éste contaminante.

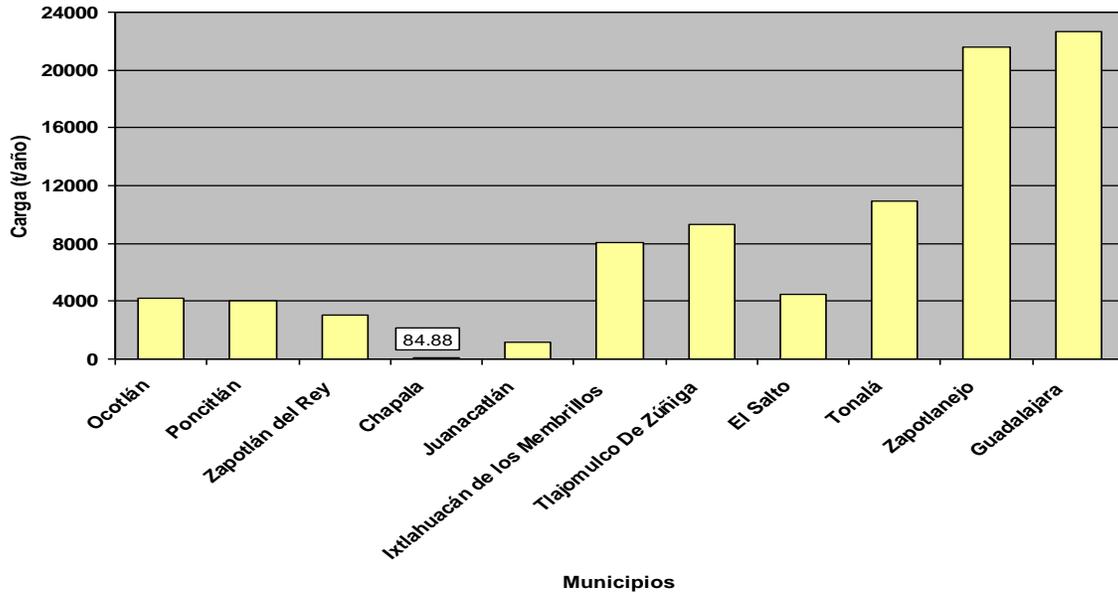


Figura 4.3. Carga total de DBO por municipios asentados en la margen del río Santiago

La Figura 4.4 presenta los aportes de NT de los municipios asentados en la margen del río Santiago, se observa que los municipios de Zapotlanejo, Guadalajara y Tonalá son los mayores contribuyentes siguiendo éste mismo orden.

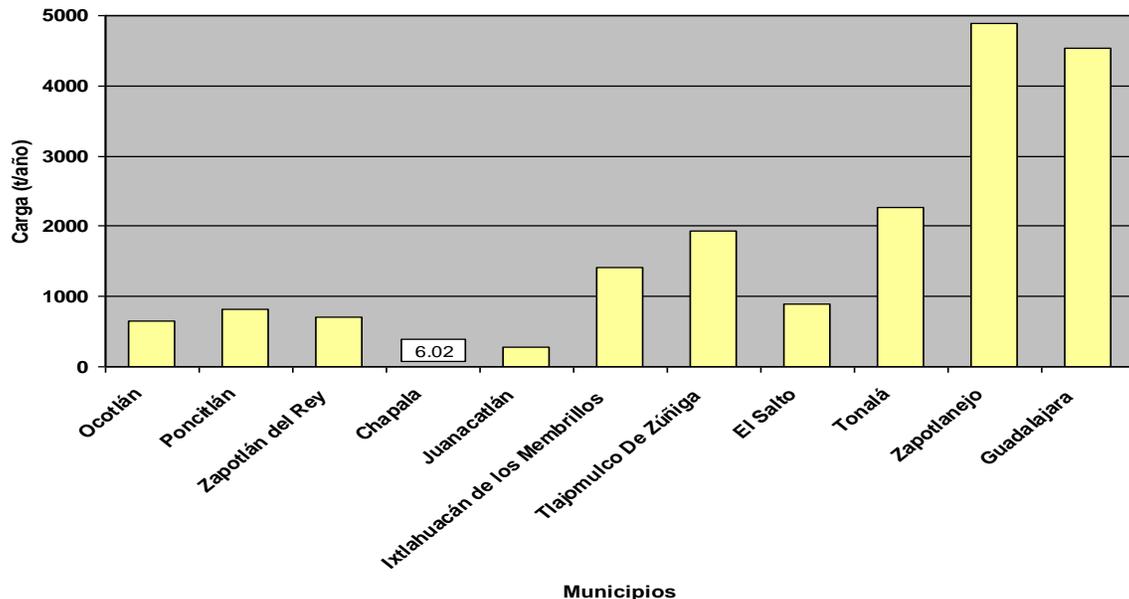


Figura 4.4. Carga total de NT por municipios asentados en la margen del río Santiago

Al igual que para el caso de NT, los municipios de Zapotlanejo y Guadalajara son los mayores contribuyentes en los aportes de PT (Figura 4.5).

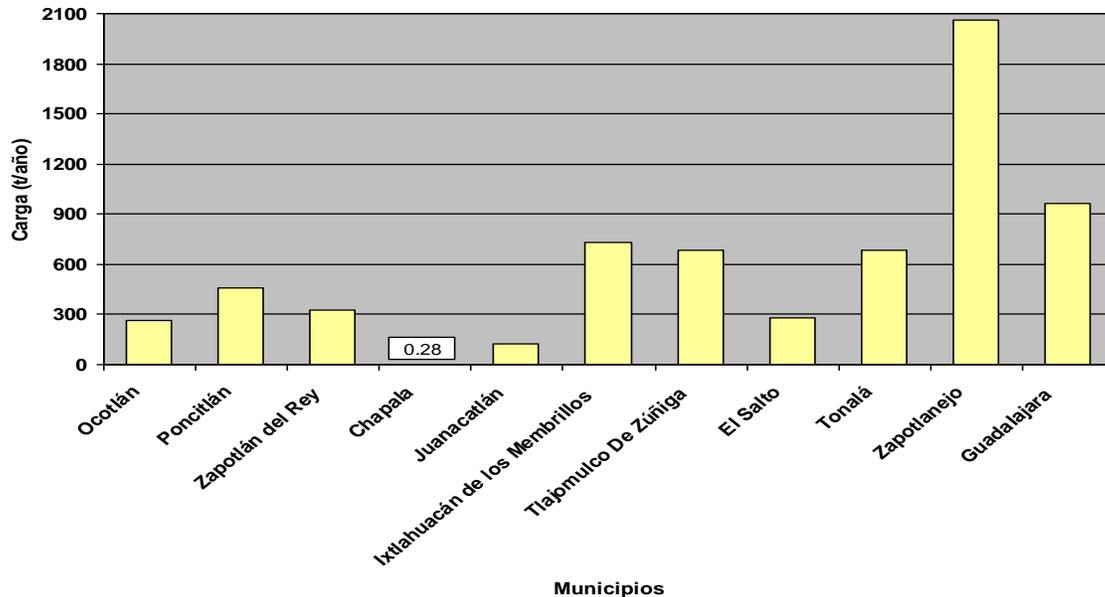


Figura 4.5. Carga total de PT por municipios asentados en la margen del río Santiago

La Figura 4.6 muestra los aporte de Ni de los municipios asentados en la margen río Santiago, se observa que El Salto, Poncitlán e Ixtlahuacán de los Membrillos son los principales contribuyentes en el aporte de Ni.

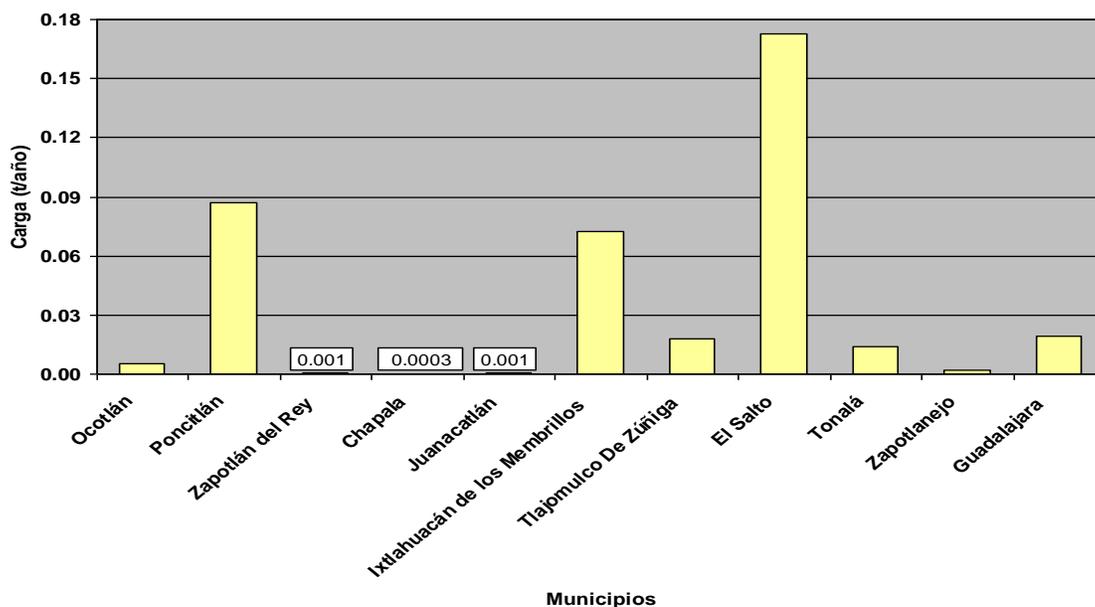


Figura 4.6. Carga total de Ni por municipios asentados en la margen del río Santiago

En la Figura 4.7 se observan los aportes de DBO para los municipios asentados en la margen del río Verde. Siendo los mayores contribuyentes los municipios de Tepatitlán de Morelos y Acatic.

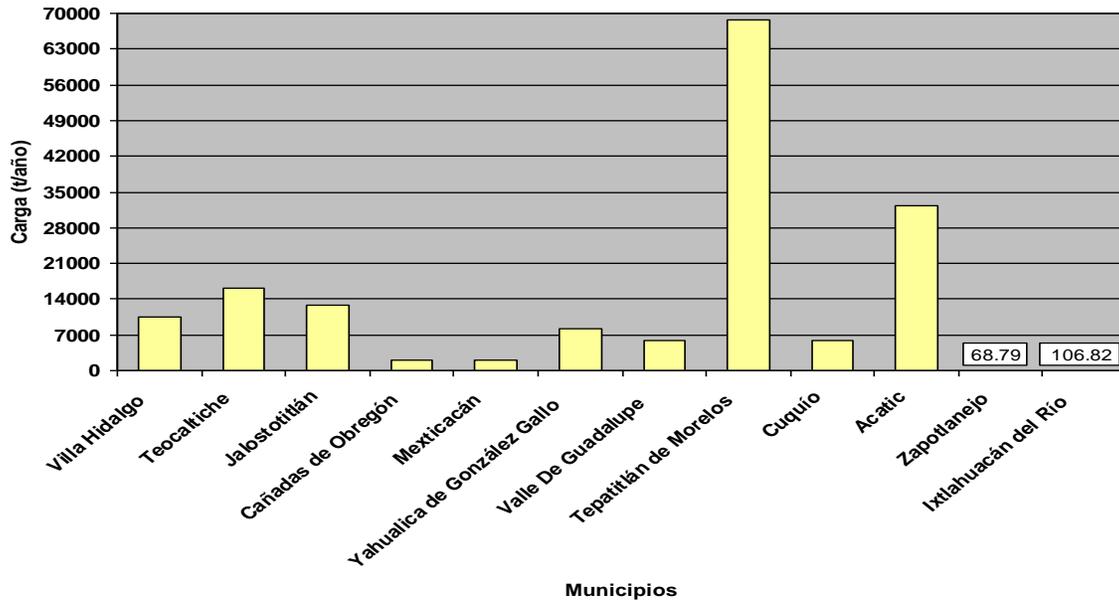


Figura 4.7. Carga de DBO por municipios asentados en la margen del río Verde

La Figura 4.8 y Figura 4.9 presenta los aportes de NT y PT, respectivamente, de los municipios asentados en la margen del río Verde. Se observa que los municipios de Tepatitlán de Morelos y Acatic son los mayores contribuyentes de ambos contaminantes.

En la Figura 4.10 se muestran los aportes de Ni por municipio para la cuenca del río Verde, se observa que Tepatitlán de Morelos es el principal contribuyente en el aporte de Ni.

Considerando la eliminación de las cargas de los principales municipios contribuyentes al total estimado hacia aguas, abajo se contribuiría a reducir la carga anual de DBO y NT en 61%, PT en 52 % y Ni en 83%, es decir, aproximadamente 98 086 t de DBO, 20 485 t de NT, 10 774 t PT y 0.1 t de Ni, llegarían al embalse anualmente en promedio.

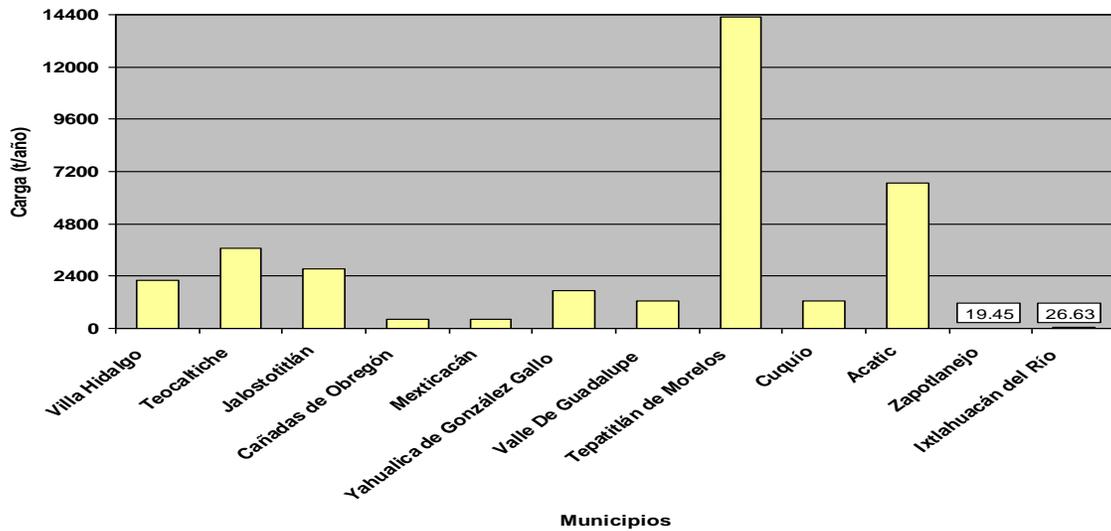


Figura 4.8. Carga de NT por municipios asentados en la margen del río Verde

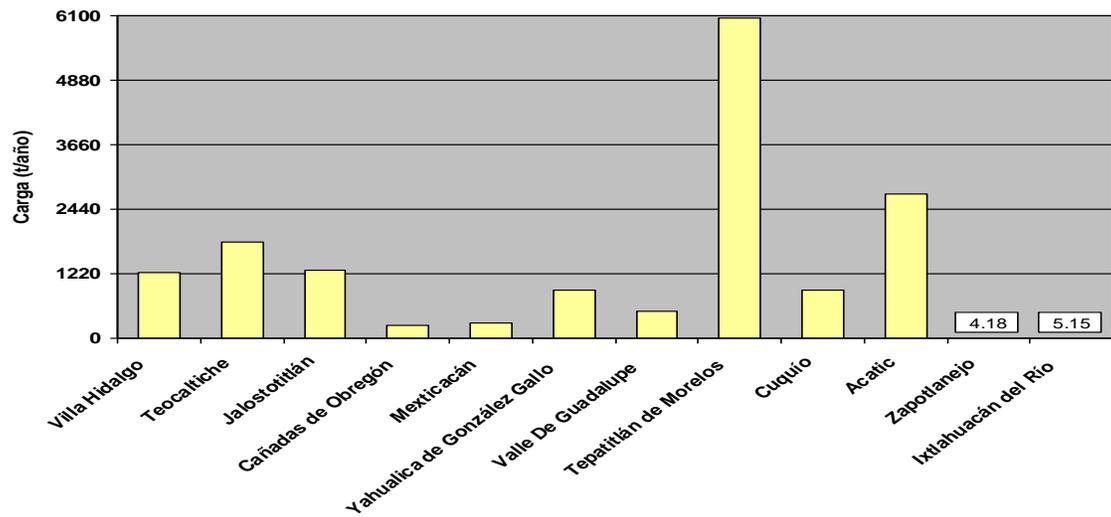


Figura 4.9. Carga de PT por municipios asentados en la margen del río Verde

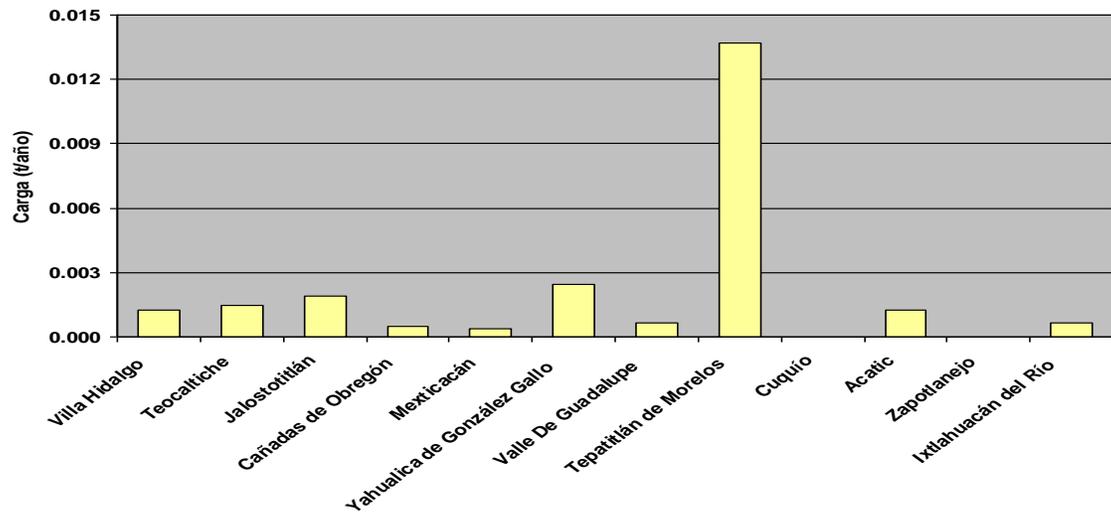


Figura 4.10. Carga de Ni por municipios asentados en la cuenca del río Verde

4.4 Reducción de contaminantes

En base a los resultados anteriormente discutidos, se determinó que la mayor contribución de DBO, N y P es debida a las excretas generadas por la actividad pecuaria (porcina y bovina) en la región. Como propuesta de solución a esta problemática se analizan las siguientes alternativas:

- Modificación en la alimentación del ganado
- Reuso de excretas
- Tratamiento de excretas

En cuanto a la reducción de Ni por descargas industriales la propuesta de solución consiste en llevar a cabo un pretratamiento de las de las aguas residuales antes de ser incorporadas al sistema de alcantarillado municipal.

Modificación en la alimentación del ganado

La producción animal tiene en común el hecho de que sus resultados aparentemente dependen poco de las condiciones naturales de su entorno, ya que su principal característica es el uso de insumos externos. Uno de los ejes fundamentales del sistema de producción, es la fabricación de alimentos balanceados a base de cereales, leguminosas y oleaginosas. Sin embargo, el uso que el ganado hace de la energía capturada por los vegetales es ineficiente, por ejemplo, se estima que el cerdo usa solamente el 35% debido a las pérdidas que se presentan a nivel de los procesos digestivos y metabólicos propios del animal (Mariscal, 2002).

En base a lo anterior, los impactos ambientales directos de la producción ganadera intensiva son la contaminación del agua por los “subproductos” (gases, heces y orina) originados durante el “proceso de producción” (crecimiento de los animales).

Una forma de contrarrestar esta situación es por medio de la modificación de la alimentación del ganado, esto es, mejorar el conocimiento sobre la porción de nutrientes que realmente entra en el sistema (coeficientes de digestibilidad) del animal,

lo cual permitirá mejorar la precisión con que esos nutrimentos son empleados. La determinación de la digestibilidad de un nutrimento es una medida indirecta y de forma conjunta de dos fenómenos digestivos: la digestión y la absorción. Para cuantificar la cantidad de alimento digerido y absorbido se toma en cuenta que la mayor parte de los nutrimentos es absorbida en el intestino delgado. Clásicamente se define la digestibilidad de un alimento como la proporción que no es excretada con las heces y por lo tanto ha sido absorbida.

El “coeficiente de digestibilidad” es calculado restando la cantidad de nutrimento excretado de la cantidad consumida. Este valor (cantidad de nutriente digerido) es dividido por la cantidad consumida y expresado como porcentaje.

Los coeficientes de digestibilidad, permiten estimar la proporción de nutrimentos presentes en una ración que pueden ser absorbidos por el aparato digestivo quedando disponibles para el animal. Es decir, formular raciones de alimentos en base a la cantidad que solamente es digerible de esos nutrimentos.

Mariscal (2002) reporta (para ganado porcino), que en México se han comenzado a realizar ese tipo de estudios, recopilando los resultados de las investigaciones, los cuales permitirán generar una base de datos que al ser empleada se podrán formular las raciones de alimento en base al contenido digestible de esos nutrimentos. En cuanto al ganado bovino, Lachmann y Febres (1999) recopilaron diferentes coeficientes de digestibilidad para varios forrajes de clima templado para diferentes clases de animal.

A la par del procedimiento anteriormente descrito o de forma independiente se puede implementar el uso de enzimas en la alimentación del ganado. Las enzimas son proteínas que actúan como catalizadores biológicos, participan en diversas reacciones metabólicas (acelerándolas) y en la digestibilidad del alimento para animales. Las enzimas hacen que la alimentación animal sea más eficiente en términos de asimilación, mejorando la absorción de nutrimentos al facilitarle al animal la digestión del alimento mediante la hidrólisis.

Un ejemplo de estas enzimas es la *fitasa*. Esta enzima ha sido evaluada en cerdos y aves y se ha confirmado su eficiencia para aumentar la asimilación de P asociado al ácido fítico en los ingredientes alimenticios (FAO, 2002). El ácido fítico es una molécula presente en todos los insumos vegetales. La mayoría del fósforo almacenado en las semillas de las plantas se encuentra ligada a esta molécula y no son disponibles para el animal (Applegate y Angel ,2004). Al agregar la enzima fitasa, al alimento libera el P y lo hace disponible, disminuyendo el requerimiento de P-inorgánico agregado a la dieta del ganado y consecuentemente disminuye la excreción de P al ambiente entre 15% y 30% (Applegate *et al.*, 2007). En el mercado existen varios tipos de enzimas (proteasas, xilanasas, b-glucanasas) que mejoran la digestibilidad total de la dieta, permitiendo indirectamente el disminuir el aporte total de nutrientes sin disminuir el aporte de nutrientes digestibles en la dieta.

La eficiencia de la fitasa típicamente es de una unidad de enzima fitasa para liberar un μmol de ortofosfato de la fitina. Sin embargo, dicha dosis puede variar, esto es debido a que la asimilación de los nutrientes dependerá de la cantidad de nutrientes específicos que son requeridos por el ganado (coeficiente de digestibilidad).

Otra alternativa para la reducción de la contaminación por excretas, enfocada a la eficiencia de absorción de nutrientes en los alimentos, sería el de incrementar el número de fases de alimentación. Esto es debido a que la capacidad de retención de nitrógeno y de fósforo disminuye con la edad del animal (Mariscal, 2002). El sistema de alimentación por fases consiste en cambiar los niveles de nutrientes en las dietas con base en el aumento o disminución del requerimiento de los mismos en los animales. De esta manera el aporte de nutrientes a través del alimento es muy similar a la cantidad y proporción necesarios para funciones como crecimiento, gestación y lactancia, de manera que las cantidades de nutrientes que son excretados son mínimas. Sin embargo, tanto la alimentación por fases como el uso de aditivos (a excepción de la enzima fitasa) se ven cuestionados por las bajas tasas de crecimiento de los cerdos (FAO, 2002).

Reuso de excretas

Para minimizar el impacto de las excretas sobre el medio ambiente se debe reducir lo más posible los nutrientes en la etapa de producción. En el caso de la producción porcina, lo que más afecta es el manejo y distribución ineficiente de las excretas.

Para solucionar esta problemática se proponen como alternativas el manejo y utilización de excretas como fertilizantes o como fuente de alimentación para rumiantes.

a). Fertilización

Las excretas en estado sólido o líquido constituyen una excelente fuente de nutrientes para el desarrollo de las parcelas de cultivo en forma de abono orgánico, principalmente por su alto contenido de N y materia orgánica. Son un recurso valioso que debe ser reutilizado en las explotaciones aplicándolo al suelo durante los periodos de cultivo. Los métodos generales de aplicación de excretas en las tierras de cultivo son: depositación directa en el suelo con incorporación (arado de la tierra), aplicación sin incorporación (simple depositación sin mezclar con el suelo), por inyección directa bajo del suelo o por irrigación.

El nitrógenos de las excretas es el elementos de fertilización más importante, debido a que el alimento suministrado a los porcinos y bovinos tiene altos contenidos de proteína. En las excretas, el nitrógeno total se compone principalmente de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal (Peralta-Alba, 2005)

Por acción de las bacterias aeróbicas de los suelos, el nitrógeno orgánico es transformado en nitrógeno amoniacal; asimismo, el nitrógeno amoniacal es llevado a nitritos y nitratos (Peralta-Alba, 2005).

De acuerdo a Palomo *et al.* (2007) la dosis de nutriente por aplicar (DNA) a las parcelas de cultivo, toman en cuenta el contenido de nutrientes de las excretas, para lo cual es necesario analizar en laboratorio o las concentraciones que reporta la literatura. En el cálculo de DNA se considera el porcentaje de nitrógeno mineralizable que estará

disponible (PND) para el cultivo durante el primer año, así como la demanda o requerimiento nutrimental del cultivo en interés (DNC).

$$DNA = PND \text{ (kg t}^{-1}\text{)} / DNC \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$

Este planteamiento evitará al máximo una sobrefertilización de N, que ofrezca riesgos de pérdida de cultivos y de contaminación al acuífero por la lixiviación de nitratos. Para calcular la DNC, se toman en consideración tres puntos básicos:

1. Demanda de nitrógeno (DN) del cultivo, sobre la base de su rendimiento esperado y que depende del potencial productivo del suelo.
2. Contenido de nitrógeno residual del suelo en muestras tomadas durante la presiembra (N_{suelo})
3. Contenido de nitrógeno en el agua de riego, sobre todo si se utiliza agua residual (N_{agua})

$$DNC = DN - (N_{\text{suelo}} + N_{\text{agua}})$$

Otra forma de obtener el valor de DNC es empleando los valores reportados en la literatura. Sutton *et al.* (2001) determinaron y recomiendan valores de requerimientos de nutrientes para diferentes cultivos.

b). Fuente de alimento para rumiantes

La composición química de las excretas se caracteriza por un alto contenido de proteína cruda, fibra cruda, cenizas y valores bajos de extractos volátiles. Las excretas de cerdos en engorda contienen nitrógeno en forma de proteína cruda (23.5%) y en forma de nitrógeno proteico (66.3%) (Kornegay *et al.*, 1977).

La excreta porcina tiene entre un 5 y 30% de la energía requerida por el animal en la dieta, y esta fracción nutritiva tiene una alta digestibilidad, asimismo, se ha determinado la presencia en excretas de grandes cantidades de vitamina A y del complejo vitamínico B (Henning y Flachowsky, 1982).

El uso de esta alternativa tendría como ventajas el aprovechamiento de los nutrientes de estas excretas, reducir los gastos en el control de la contaminación del medio ambiente, así como los de alimentación.

Existen diferentes métodos para integrar las excretas a la alimentación de rumiantes. Uno de los más comunes es el de permitir que los bovinos pastoreen alrededor de la granja y tengan acceso al estercolero para que consuman las excretas frescas que se amontonan diariamente. En otras ocasiones las excretas frescas se esparcen en los terrenos donde pastorea el ganado. Las excretas frescas también pueden ser mezcladas con forrajes, granos o dietas completas y se ofrecen al ganado de engorda en corrales. De acuerdo con algunos porcicultores, las ganancias de peso del ganado son comparables a las obtenidas en el ganado alimentado con dietas a base de granos, pero a un menor costo (FAO, 2002).

Tratamiento de excretas

Los desechos fecales líquidos, constituyen un problema serio de contaminación para ríos, lagos y tierras cercanas a las granjas, lo cual ha originado la necesidad de desarrollar un manejo adecuado o un tratamiento completo de los desechos, para evitar los problemas de contaminación ambiental. Para solucionar esta problemática se han ideado algunos tratamientos los cuales se clasifican en físicos, químicos y biológicos. Escalante (2002) realizó una revisión literaria de procesos que han sido utilizados para el tratamiento de efluentes porcícolas. Señala que dentro de los procesos empleados para el tratamiento de este tipo de efluentes se han aplicado en su mayoría los del tipo biológico y muy poco los químicos. Los procesos biológicos se han enfocado en la remoción de materia orgánica, nutrientes (N y P) y coliformes fecales. Así mismo, los casos de estudio descritos involucran la combinación de diversos procesos en el tren de tratamiento siendo del tipo no convencional. Un punto importante que se reporta dentro de este mismo estudio es que los costos de tratamiento, gastos de instalación y mantenimiento no puede ser pagado por el sector ganadero en varias partes de los países de la Unión Europea.

Pretratamiento de efluentes industriales

El implementar un pretratamiento tiene como objetivo el controlar la introducción de contaminantes de fuentes industriales a las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, para con ello prevenir que los contaminantes, como el Ni, puedan interferir con la operación de una planta de tratamiento, el reuso de las aguas tratadas y los lodos generados; proteger la infraestructura de los sistemas de recolección y tratamiento de agua, la salud de los empleados de las plantas y el sitio donde se realice la descarga.

El desarrollo de nuevas tecnologías para sintetizar polímeros, ha abierto la posibilidad de utilizar el tratamiento primario avanzado como una opción para el pretratamiento de los efluentes industriales antes que estos se incorporen a los sistemas de alcantarillado y en forma conjunta lleguen a la planta de tratamiento o ya sea que descarguen en un cuerpo de agua. Un ejemplo de este tipo de control de efluentes industriales es el estudio realizado por Fuentes y Jiménez (2002) en donde evaluaron la incorporación de un pretratamiento primario avanzado para mejorar la eficiencia del tratamiento, mediante la dosificación adecuada de floculantes y coagulantes, de una planta de tratamiento secundario biológico (lodos activados), la cual recibe las aguas residuales de un corredor industrial de aproximadamente 150 empresas de diferentes giros. Sus resultados arrojaron que la utilización de sulfato de aluminio como coagulante (20 mg/L) y polímero Zwitteriónico tipo II P2 vinil piridina N óxido (0.2 mg/L), se obtienen las mejores eficiencias de remoción de sólidos suspendidos y de demanda química de oxígeno. Señalando además, que el costo por dosis (\$437 USD, cálculo para un caudal de 500 L/s) es 28 veces menor que utilizando cloruro férrico. Como se ha demostrado, el Ni se adsorbe fuertemente en los sólidos suspendidos en la zona de estudio (Hansen y González-Marquez, 2009), la remoción de sólidos suspendidos en el sistema de tratamiento removería también este metal. Es importante considerar también la estabilización y el reuso de los lodos del proceso (Cervantes, 2005).

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El área de aportación de la presa Arcediano se conformará de los recursos hidrológicos de las corrientes fluviales del Santiago y Verde, siendo este último de mayor contribución del aporte hidráulico con el 73% del promedio anual de 1 173 Hm³.

El método empleado en esta tesis para la estimación de cargas resulta ser una técnica viable, que podría aplicarse a otras cuencas o regiones con el propósito de tener un mejor panorama de las diversas problemáticas a resolver.

Entre las principales limitaciones del método aquí aplicado para estimación de cargas contaminantes, está el de asumir que el transporte de contaminantes es conservativo; es decir, no considera los procesos de degradación en las corrientes fluviales.

Se estimó la carga anual de DBO, NT, PT y Ni para la cuenca del Arcediano por fuentes puntuales y no puntuales. La mayor contribución de DBO, NT y PT es debida a los escurrimientos de tipo pecuario (excretas porcinas y bovinas) localizando los valores más altos en la cuenca del río Verde. Las industrias asentadas en la cuenca del río Santiago son las protagonistas en el aporte de Ni.

Los municipios de Arandas, San Juan de los Lagos, Tepatitlán de Morelos y Lagos de Moreno, son los mayores aportadores de NT y PT a la cuenca del Arcediano. Para Ni, los municipios que mayor proporción tiene a la contribución son: El Salto, Poncitlán e Ixtlahuacán de los Membrillos.

Se considera que las medidas y acciones optadas para la recuperación o conservación de los cuerpos de agua que descargan al embalse del Arcediano, no serán suficientes. El tratamiento de las aguas residuales municipales sólo reduciría en 20%-40% el N y P, además de que no se cuenta con un programa específico para eliminación de metales pesados y otros contaminantes tóxicos mediante pretratamiento de descargas industriales antes de unirlos a la red de alcantarillados municipal. Es decir, tratar y posteriormente desviar las aguas residuales municipales de la ZCG NO evitará el problema de eutroficación en la presa.

Entre las acciones necesarias para proteger la calidad del agua de los ríos Santiago y Verde y por ende, el embalse de la presa Arcediano, debe contemplarse:

- Establecer métodos para el control de nutrientes en la alimentación del ganado porcino y bovino, así como, su reuso en la agricultura como abono
- Reforzar el inventario de industrias y sus descargas, para cuantificar la aportación de metales pesados y otros contaminantes tóxicos por esta fuente y poder definir con mayor certeza las condiciones particulares de descarga
- De acuerdo con la NOM-002-SEMARNAT-1996, se debe definir la necesidad de pretratamiento de las descargas industriales para reducir las concentraciones de metales y otros contaminantes tóxicos antes de vertirlas al sistema de alcantarillado municipal
- Implantar programas de conservación de cubiertas vegetales en suelos para el control de la erosión hídrica debida a los escurrimientos superficiales. Se recomienda principalmente en zonas con pendiente y en zonas con bajos niveles de materia orgánica
- Para reducir los aportes de NT y PT en las aguas residuales municipales que descargan directamente al río y sobre todo aquellos que se encuentran asentados más cerca del embalse, se recomienda implementar sistemas de tratamiento de tipo no convencional. En casos de pequeñas comunidades, los sistemas no centralizados pueden ser más eficientes
- Los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales deben recibir tratamiento de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 antes de su reuso o destino final

Para futuros trabajos se recomienda considerar coeficientes de degradación considerando la distancia entre las fuentes de contaminación hasta el embalse.

6 REFERENCIAS

Aguirre-Jiménez AA. 2004. La construcción de represas para abastecimiento de agua potable en zonas urbanas y su efecto en la sostenibilidad ambiental. El caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Boletín del Archivo Histórico del Agua, vol. 9, núm. 28, pp. 24–32.

AICISA (Aqua Innova Consultoría e Ingeniería, S. A. de C. V.). 2004. Identificación, muestreo y análisis de las descargas contaminantes de los ríos Santiago y Verde, en el estado de Jalisco. CEAS Jalisco.

Aparicio Mijares FJ. 2001. Fundamentos de Hidrología Superficial. Limusa. México. Distrito Federal.

Applegate TJ y Angel R. 2004. Phytase: Basics of enzyme function. Department Animal Science, Purdue University, AS-560-W. Disponible en World Wide Web: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/ansci.htm#5a>

Applegate TJ, Richert B y Angel R. 2007. Phytase and Other Phosphorus Reducing Feed Ingredients. Department Animal Science, Purdue University, AS-560-W. Disponible en World Wide Web: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/ansci.htm#5a>

Arreguín Cortés FI, Gómez-Balandra MA e Izurieta Dávila JL. 2000. Contaminación Difusa. Tlaloc, vol. 7, núm. 19, pp. 8–10.

AyMA Ingeniería y Consultoría S. A. de C.V. 2006a. Identificación y Caracterización de Fuentes de Contaminación de las Cuencas Directa del Río Santiago entre los Municipios de Ocotlán y Tonalá, y Directa del Río Zula. Informe Final. Disponible en World Wide Web: <http://www.ceajalisco.gob.mx/transparencia/1315-informes.html>

AyMA Ingeniería y Consultoría S. A. de C.V. 2006b. Actualización y caracterización de fuentes de contaminación de la Cuenca del río Verde en el Estado de Jalisco. Informe

Final. Disponible en World Wide Web: <http://www.ceajalisco.gob.mx/transparencia/1315-informes.html>

Beavers PD y Tully IK. 2005. Nutrient reduction evaluation of sewage effluent treatment options for small communities. *Water Science & Technology*, vol. 51, núm. 10, pp. 221-229.

Benaman J, Armstrong N y Maidment D. 1996. Modeling of Dissolved Oxygen in the Houston Ship Channel using WASP5 and Geographic Information Systems. Center for Research in Water Resources. The University of Texas at Austin. Disponible en World Wide Web: <http://www.crrw.utexas.edu/reports/1996/rpt96-2.shtml>

Bravo-Inclan LA. 1995. Estudio limnológico de la presa Madin, México con el énfasis en su estado trófico y en el manejo de cuenca. Tesis Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2002. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. En: Canadian Environmental Quality Guidelines, No. 1299, Winnipeg (ISBN 1-896997-34-1)

CEA (Comisión Estatal del Agua). 2006. Programas de Saneamiento y Abastecimiento para la Zona Conurbada de Guadalajara. Disponible en World Wide Web: http://www.ceajalisco.gob.mx/images/zcg_pdf/progab06.pdf. Antes CEAS (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento).

CEA (Comisión Estatal del Agua). 2007. Memoria documental del proyecto Arcediano. Informe final. CEA Jalisco. Jalisco, México.

CEA (Comisión Estatal del Agua). 2008. Sistema Integral de Información de coberturas de Agua del estado de Jalisco (SIICAEJ). Disponible en World Wide Web: http://www.ceajalisco.gob.mx/siicaej.php#Escena_1

Cervantes HO. 2005. Tratamiento del agua del Lago de Chapala: Evaluación técnica y económica. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Jiutepec, Morelos.

Choi E, Eum Y, Gil K-I, Oa S-W. 2004. High strength nitrogen removal from nightsoil and piggery wastes. *Water Science & Technology*, vol. 49. núm. 5, pp. 97-104.

Cifuentes E, Blumenthal U y Ruiz-Palacios G. 1999. Valle del Mezquital: reúso de agua residual y riesgos para la salud. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, núm. 43, pp. 23–27.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 1994. Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario. CONAGUA. México.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación. Diciembre de 2007. SEMARNAT. México.

CONAGUA-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2006. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Hidrometría y Sedimentos. IMTA. México.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) 2007. Obtención de metadatos y cartografía en línea. Disponible en World Wide Web: <http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>

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

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México. 06 de enero de 1997.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1998. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. México. 03 de junio de 1998.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México. 22 de noviembre de 2000.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2004. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. 27 de septiembre de 2004.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2000. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservorios. EPA-822-B00-001. Washington, D.C., United States Environmental Protection Agency.

EPA (U. S. Environmental Protection Agency). 2001. PLOAD version 3.0 An ArcView GIS Tool to Calculate Nonpoint Sources of Pollution in Watershed and Stormwater Projects. User's Manual. Disponible en World Wide Web: <http://www.epa.gov/waterscience/basins/bsnsdocs.html#pload>

Escalante VE. 2002. Sistemas de tratamiento para efluentes porcícolas. Memorias del XVII Congreso Nacional de Hidráulica. AMH-IMTA, México, pp. 117-122.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Disponible en World Wide Web: <http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e03.htm>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2002. Integración por Zonas de la Ganadería y de la Agricultura Especializadas (AWI) - Opciones para el Manejo de Efluentes de Granjas Porcícolas de la Zona Centro de México. Disponible en World Wide Web: <http://www.fao.org/WAIRDOCS/LEAD/X6372S/x6372s00.htm#Contents>

Fuentes M y Jiménez B. 2002. Tratamiento primario avanzado para mejorar la calidad del tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Memorias del XVII Congreso Nacional de Hidráulica. AMH-IMTA, México, pp. 135-140.

Guzmán-Arroyo M. 1997 Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de Jalisco, Las Aguas Superficiales, Diagnóstico. Instituto de Limnología. Universidad de Guadalajara. Chapala, Jalisco.

Hansen AM., León-Zavala A. y Bravo-Inclán L. 1995. Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma – Chapala. Ingeniería Hidráulica en México, vol. 10, núm. 3, pp. 55–69.

Hansen AM, González-Márquez LC, Torres-Bejarano F. y Hernández-Cruz N. 2006. Evaluación de los estudios ambientales y de saneamiento en el Proyecto Arcediano, asesoría y seguimiento para la creación del distrito de control ambiental. Informe Final del Proyecto TH-0621. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. IMTA. México.

Hansen AM y González-Márquez LC. 2009. Estimation of Risks to Contaminate Water in the Arcediano Dam, Jalisco, Mexico. Sometido a Journal of Environmental Science and Health A. Aceptado para su publicación

Hennig A. y Flachowsky G. 1982. Pig excrement as new feedstuff for ruminants. Pig News and Information, vol. 3 p. 269

Hernández García A. 2004. El impacto industrial sobre los ríos los Sabinos – Zula y Santiago en la Zona Norte de la Ciénega de Jalisco. Boletín del Archivo Histórico del Agua, vol. 9, núm. 28, pp. 64–68.

IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2005. Extractor rápido de información climatológica (Eric III, ver. III). IMTA. México.

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal). 2006. Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM). Disponible en World Wide Web: http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Descarga_del_SNIM

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2006. Anuario Estadístico del Estado de Jalisco. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee06/estatal/jal/index.htm>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008a. Anuario Estadístico del Estado de Aguascalientes. Edición 2007. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/ags/index.htm>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008b. Anuario Estadístico del Estado de Guanajuato. Edición 2007. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/gto/index.htm>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008c. Anuario Estadístico del Estado de Jalisco. Edición 2007. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/jal/index.htm>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008d. Anuario Estadístico del Estado de San Luís Potosí. Edición 2007. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/slp/index.htm>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008e. Anuario Estadístico del Estado de Zacatecas. Edición 2007. Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/zac/index.htm>

Jiménez-Cisneros BE. 2001. Contaminación ambiental en México, Editorial Limusa, México

Jones DD y Sutton AL. 2003. Design and Operation of Livestock Waste Lagoons. Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, ID -120. Disponible en World Wide Web: <http://www.ces.purdue.edu/extmedia/ID/ID-120.html>

Kornegay ET, Holland MR, Webb KE, Bovard KP y Hedges JD. 1977. Nutrient characterization of swine fecal waste and utilization of these nutrients by swine. Journal of Animal Science, vol. 44. p. 608

Lachmann M y Araujo Febres O. 1999. La estimación de la digestibilidad en ensayos con rumiantes. Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Zulia. Disponible en World Wide Web: <http://www.secalc.ula.ve/AUPA/docuPDFS/digestibilidadadderumiante.pdf>

López-López E. 1997. Análisis limnobiológico del embalse Ignacio Allende, Guanajuato, México. Tesis Doctoral. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal, México.

López-Ríos O, Lechuga-Anaya M. 2001. Contaminantes en los cuerpos de agua del sur de Sonora. *Salud Pública de México*, vol. 43, núm. 4, pp. 298–305.

Mariscal-Landín G. 2002. Efecto del programa de alimentación sobre el contenido de nutrimentos en las excretas porcinas, en: *Integración por Zonas de la Ganadería y de la Agricultura Especializadas (AWI) - Opciones para el Manejo de Efluentes de Granjas Porcícolas de la Zona Centro de México*. FAO. Disponible en World Wide Web: <http://www.fao.org/WAIRDOCS/LEAD/X6372S/x6372s08.htm#bm08>

Maturano-Rodríguez C. 1998. Características de calidad de las descargas de aguas residuales de acuerdo a su origen. Memoria del VI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. Tomo III.

Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and reuse*. McGraw-Hill. EUA.

Múgica A, V., Figueroa LS. 1996. Contaminación Ambiental, causas y control. En México. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. 140 – 183 pp.

ORVA Ingeniería, S.A. de C.V. 2003. Proyecto Arcediano. Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Regional.

Palomo M, Martínez JG y Figueroa U. 2007. Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales al Disminuir Riesgos de Contaminación en Actividades Agropecuarias. *CULCyT*, vol. 4, núm. 20, pp. 4–14.

Peralta-Alba JM. 2005. Recomendaciones técnicas para la gestión ambiental en el manejo de purines de la explotación porcina. Instituto de Investigaciones Agropecuarias Ministerio de Agricultura. Santiago–Chile. Disponible en World Wide Web: http://www.inia.cl/medios/catalogo/libros/INIA_L0018.pdf

Salas H y Martino P. 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HEP/OPS 1981-1990. Lima, Perú. CEPIS.

Saunders WK y Maidment DR. 1996. A GIS assessment of nonpoint source pollution in the san antonio-nueces coastal basin. Center for Research in Water Resources. The University of Texas at Austin. Disponible en World Wide Web: <http://www.crrw.utexas.edu/reports/1996/rpt96-1.shtml>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2007. Espacio Digital Geográfico. Disponible en World Wide Web: <http://infoteca.semarnat.gob.mx/metadataexplorer/explorer.jsp>

Sutton AL, Jones DD, Joern BC y Huber DM. 2001. Animal Manure As a Plant Nutrient Resource. Agricultural and Biological Engineering, Purdue University, ID-101. Disponible en World Wide Web: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/ID/ID-101.html>

Taiganides EP, Pérez ER y Giron SE. 1996. Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. Consejo mexicano de porcicultura. México, DF.

UdeG (Universidad de Guadalajara). 2004. Estudio para la caracterización de lodos de los ríos Verde y Santiago. Informe del convenio CEAS-UdeG. Universidad de Guadalajara.

UNESCO-WWAP (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura – Programa mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2006. El agua, una responsabilidad compartida. 2° Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Zaragoza, España.

Von Bertrab E. 2003. Guadalajara's water crisis and the fate of Lake Chapala: a reflection of poor water management in Mexico. Environment and Urbanization, vol. 15, núm. 2, pp. 126-140.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2003. Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: Agua para todos, agua para la vida. París, UNESCO y Londres, Berghahn Book.