



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CLASIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA
SUBCUENCA DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGO

PRESENTA:

CECILIA CORNEJO MANCERA

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

ASESOR: Dr. GERADO CRUZ FLORES



2016, Ciudad de México.

PROYECTO PAPIME PE206413



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"
DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.

Comunico a usted que la alumna **CORNEJO MANCERA CECILIA**, con número de cuenta **302129795**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **23 de agosto de 2016** a las **11:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE M. en C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS

VOCAL M. en C. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

SECRETARIO Dr. GERARDO CRUZ FLORES

SUPLENTE M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL

SUPLENTE Biól. LUIS SAMUEL CAMPOS LINCE

El título de la tesis que presenta es: **Clasificación de recursos hídricos de la subcuenca de San Martín Texmelucan.**

Opción de titulación: Tesis

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad de México, a 21 de junio de 2016

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ
DIRECTOR
ACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
DIRECCIÓN

RECIBÍ
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL
JEFE DE CARRERA



“Es interesante contemplar una enmarañada ribera cubierta por muchas plantas de varias clases, con aves que cantan en los matorrales, con diferentes insectos que revolotean y con gusanos que se arrastran entre la tierra húmeda, y reflexionar que estas formas, primorosamente construidas, tan diferentes entre sí, y que dependen mutuamente de modos tan complejos, han sido producidas por leyes que obran a nuestro alrededor.”

El origen de las Especies por Medio de la Selección Natural.

Charles R. Darwin (1809 – 1882)

“¡Luchemos por hacer al mundo libre! Peleemos por un mundo en el que reine la razón. Un mundo en que la ciencia y el progreso conduzcan a la felicidad de todos.”

El Gran Dictador.

Charles S. Chaplin (1889 – 1977)





AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la extraordinaria formación profesional que se me brindó a lo largo de todo de toda mi permanencia en la nada fácil, pero fabulosa, increíble, maravillosa y apasionante carrera de Biología.

A la Secretaría de Educación Pública, la Dirección General de Orientación Educativa, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Fundación UNAM A. C. y a PRONABES-UNAM por el apoyo financiero otorgado durante los semestres cursados de la carrera de Biología, mil gracias.

A la Dirección General de Asuntos de Personal Académico y al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, al proyecto *“Elementos didácticos y uso de las TIC’s en el estudio de ecosistemas ribereños de montaña”* (PE206413) y a su responsable M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández por el apoyo financiero otorgado para la culminación del presente trabajo.

Al laboratorio de Calidad del agua y Ecohidrología así como al laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal, por el apoyo y las herramientas brindadas para el desarrollo y conclusión de este estudio.

A todos los que fueron mis profesores en la carrera, siempre aprendí algo de todos ustedes, por el tiempo y esfuerzo, los admiro.

Al M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, M. en C. por todas las observaciones que contribuyeron a engrandecer este trabajo.

Al Biól. Luis Samuel Campos Lince por sus comentarios, consejos, pero sobre todo por las preguntas que siempre nos hacen pensar, le puedo decir que ahora sí sé qué hacer con mis datos, gracias por todo.

Al M. en C. Faustino López Barrera, por la confianza y el tiempo brindados, por facilitarme el acceso a su espacio de laboratorio y a las herramientas que sin lugar a dudas fueron fundamentales para pasar las materias, los consejos, las salidas a campo, las impresiones, el internet, libros... jamás acabaría, gracias profesor.

A la Dr. Patricia Rivera García y al M. en C. Armando Cervantes Sandoval, por sus muy sabias palabras y sus muy acertados comentarios, por todo lo aprendido, gracias por todos sus consejos y sobre todo por enseñarme a mirar las cosas desde otra perspectiva.



A mi asesor de tesis Dr. Gerardo Cruz Flores, por el apoyo, las observaciones, los comentarios y todas las enseñanzas en campo, por la música a 4,000 m s.n.m. y por ser parte de esta etapa de mi formación, incontables agradecimientos.

Agradezco con cariño y admiración a mi profesora y directora de tesis M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández, por brindarme un espacio en su laboratorio, por su tiempo, consejos, llamadas de atención, las enseñanzas y palabras de aliento, agradezco su confianza y apoyo, por permitirme ser parte de este proyecto y ayudarme a concluir este ciclo, por todo, infinitas gracias.

A mis compañeros y amigos de laboratorio Eri, Jessi, Mau, Salvador y Richie, por todas esas carcajadas en las horas de trabajo, por todo su apoyo, por ser siempre un equipo de trabajo, sin duda alguna, sin cualquiera de ustedes nada de esto hubiese sido posible. También a mis compañeros de edafología Christian, Laurita, Pao, Xo y Gen por hacer siempre extremadamente amena la experiencia en campo.



DEDICATORIA

A mis padres que hicieron enormes sacrificios para que hoy estemos aquí.

A mis abuelitos Chabe, Domi, José y Jorge los quiero.

A mi hermano J. E. que siempre me apoyó y resistió todo lo que implica tener un tesista en casa, gracias.

A mis madrinas que siempre creyeron en mí, muchas gracias.

A mis tías y tíos Agus, Mari, Polita, Armando, Moy y Martín que siempre me dieron un empujón y me apoyaron.

A mis primas adoradas Ale, Amparito, Eve, Norma, Paloma, Sandy y Yess, les debo demasiado a todas, gracias por siempre estar para mí.

A mis primos Germán, Jonhy, Martín y Uci, gracias por todos sus consejos y por su apoyo.

A mis sobrinas y sobrinos (en orden alfabético para evitar corazones rotos) Beto, Cris, Jared, Jere, Mate, Memo, Moy, Nao y Toto, ustedes sí que me hacen sentir grande. Esperando nunca haber sido ni ser un mal ejemplo para ustedes, con cariño de su tía la más guapa e inteligente, obviamente su tía Ceci.

A Julia, Daniela y Toño, prácticamente familia, gracias por la confianza y amistad siempre.

A la familia Lozada Almada por todo su apoyo desde siempre, mil gracias.

A mis amigas Claudia, Julieta, Viri y Anita, que aunque ya no nos frecuentemos tanto siempre fueron importantes en todo momento, esto es para ustedes también.

A mis amigos de toda la vida Gerardo y Leo, que siempre me han apoyado y dado palabras de aliento, mil gracias.

A Susi, que siempre tienes una sonrisa para todo y tiempo para mis tonterías, con cariño para ti.

A Miranda, mi querida amiga de hace muchos ayer, gracias por la amistad.

A Lidia, esas noches de desvelo en la computadora, cada cual en sus menesteres, pero siempre con tiempo de platicar antes de dormir en la mañana o ir a la facultad, prueba superada amiga, gracias por la amistad, que dure muchos años más.

A los *snakes* (Aldo, Ricardo, Salvador, Oscar, Ricardo Panda), gracias por todo, la amistad, todo el apoyo, todo de todo, mil gracias.

A Franquito, siempre dormido en clase, gracias por ser buen amigo.



A Mariel, toda despistada siempre, señorita *honestidad brutal*, gracias por tu apoyo desde el inicio, me fue de gran ayuda, gracias por la confianza y amistad.

A Wendy y Diego, gracias por esa amistad tan sincera, tan cómica, tan amena, incondicional y desinteresada, les deseo siempre lo mejor.

A Aldo, Karen y León, gracias por permitirme ser parte de sus vidas, Aldo gracias por ser capaz de discutir conmigo y seguir siendo amigos jejeje, grandes amigos.

A Salvador, amiguito no tengo palabras para agradecer todo lo que me has ayudado, no tengo cómo pagar todo lo que con cariño me has apoyado, no tengo más que agradecerte la confianza, la amistad esperando que dure muchos tiempo más, gracias.

A mi mejor amigo en la vida Ricardo A. S. C., gracias por tu apoyo incondicional, por siempre estar dispuesto a ayudarme, no tengo como pagarte todo el apoyo, infinitas gracias, contigo todo esto fue más divertido e interesante.

A todos mis compañeros y amigos de la carrera Kary, Manolo, Mire, Maguito, Jessi, Eri, Sarita, Sharday, Dianita, Daryl, Marita, Marianita Pequeña, Katia, Nestor, Gaby Santana, Anita Atómica, Victoria, Belencita y a todos y todas que se me pudieron olvidar en este momento, los que compartieron un aula conmigo, de todos aprendí algo, éxito siempre.

A todos los que se me ha olvidado mencionar y que fueron parte de este ciclo que concluye, muchas gracias por todo.

Cecilia Cornejo–Mancera.





CONTENIDO

| | |
|--|----|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 11 |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | 12 |
| RESUMEN..... | 13 |
| ABSTRACT..... | 14 |
| INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| MARCO TEÓRICO..... | 16 |
| El agua: la molécula y sus propiedades..... | 16 |
| Importancia del ciclo hidrológico..... | 18 |
| La importancia del agua..... | 19 |
| Composición química de las aguas..... | 20 |
| Calidad del agua..... | 22 |
| Contaminación del agua..... | 22 |
| Panorama del Agua en el Mundo y el Acceso Humano al Agua..... | 23 |
| Panorama del Agua en México..... | 24 |
| Cuencas Hidrográficas..... | 25 |
| Ambientes ribereños..... | 27 |
| Clasificación en ciencias naturales..... | 28 |
| Subcuenca: delimitación del área de estudio y la escala en la investigación..... | 29 |
| Parque Nacional Iztaccíhuatl–Popocatepetl..... | 31 |
| Análisis multivariante..... | 32 |
| ANTECEDENTES..... | 34 |
| PROBLEMA..... | 39 |
| JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS..... | 40 |
| OBJETIVOS..... | 40 |
| General..... | 40 |
| Particulares..... | 40 |
| ZONA DE ESTUDIO..... | 41 |
| MÉTODO..... | 43 |
| Trabajo de gabinete..... | 43 |
| Trabajo de campo..... | 44 |



| | |
|---|-----|
| Trabajo de laboratorio..... | 47 |
| Tratamiento estadístico de datos..... | 51 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 52 |
| Sitios de muestreo..... | 52 |
| Descripciones ecológicas de los sitios de muestreo..... | 54 |
| Caracterización del agua de la subcuenca San Martín Texmelucan..... | 72 |
| Análisis de componentes principales..... | 73 |
| Comportamiento del sistema..... | 75 |
| Clasificación..... | 86 |
| Análisis de discriminantes..... | 94 |
| Mapa de clasificación..... | 99 |
| CONCLUSIONES..... | 103 |
| REFERENCIAS..... | 105 |
| ANEXO I. Tabla de clasificación del análisis de discriminantes..... | 114 |
| ANEXO II. Zonificación de las subcuenca..... | 115 |
| ANEXO III. Tabla de correlaciones múltiples..... | 117 |



ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Geometría molecular del agua..... | 16 |
| Figura 2. Propiedades del agua | 17 |
| Figura 3. Cualidades del agua..... | 18 |
| Figura 4. Porcentaje de agua dulce del planeta..... | 20 |
| Figura 5. Disponibilidad natural media per cápita en México..... | 25 |
| Figura 6. Cuenca hidrográfica..... | 26 |
| Figura 7. Clasificación de aguas superficiales de río..... | 37 |
| Figura 8. Localización de la subcuenca San Martín Texmelucan..... | 41 |
| Figura 9. Parámetros <i>in situ</i> y en <i>laboratorio</i> | 44 |
| Figura 10. Ubicación de los sitios de muestreo en la subcuenca San Martín Texmelucan. | 53 |
| Figura 11. Componente 1 y componente 3 | 74 |
| Figura 12. Componente 2..... | 75 |
| Figura 13. Oxígeno disuelto en relación con la temperatura, los usos de suelo y los STD. | 76 |
| Figura 14. Amonio-STD en relación con Temperatura del agua y usos de suelo..... | 78 |
| Figura 15. Nitritos – STD en relación con temperatura del agua y usos de suelo. | 78 |
| Figura 16. Nitratos – STD – Temperatura de agua y usos de suelo..... | 79 |
| Figura 17. Ortofosfatos – STD – Temperatura del agua y usos de suelo. | 80 |
| Figura 18. Demanda Química de Oxígeno – STD – Temperatura del agua y usos de suelo..... | 81 |
| Figura 19. Sulfatos – STD – Temperatura del agua y usos de suelo. | 82 |
| Figura 20. Dureza de Calcio – STD – Temperatura del agua y usos de suelo..... | 83 |
| Figura 21. Dureza Total – STD – Temperatura del agua y usos de suelo. | 84 |
| Figura 22. Alcalinidad–STD–Temperatura del agua y usos de suelo..... | 84 |
| Figura 23. Grupos obtenidos <i>a priori</i> | 87 |
| Figura 24. Gráfico de dispersión de los grupos 1 y 4. | 96 |
| Figura 25. Gráfico de dispersión de los grupos 2 y 3. | 96 |
| Figura 26. Mapa de clasificación. | 99 |
| Figura 28. Tipos de aguas por municipios. | 102 |



ÍNDICE DE CUADROS.

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Principales actividades antropogénicas que afectan a los recursos hídricos | 24 |
| Cuadro 2. Parámetros <i>in situ</i> | 45 |
| Cuadro 3. Pruebas analíticas realizadas en laboratorio | 47 |
| Cuadro 4. Sitios de muestreo en la subcuenca | 52 |
| Cuadro 5. Características físicas y químicas del agua de la subcuenca | 72 |
| Cuadro 6. Componentes Principales | 73 |
| Cuadro 7. Pesos de las variables en cada componente | 73 |
| Cuadro 8. Escala de clasificación de calidad del agua: demanda química de oxígeno | 82 |
| Cuadro 9. Clasificación de agua dura según la Water Quality Association | 83 |
| Cuadro 10. Clasificación de alcalinidad del agua | 85 |
| Cuadro 11. Sitios que fueron ubicadas en dos grupos por el análisis de conglomerados | 86 |
| Cuadro 12. Grupos resultantes en el dendrograma del análisis de conglomerados | 88 |
| Cuadro 13. Caracterización del Grupo 1, <i>Aguas Forestales o Azules</i> | 90 |
| Cuadro 14. Caracterización del Grupo 2, <i>Aguas Forestal-agrícolas o Verdes</i> | 91 |
| Cuadro 15. Caracterización del Grupo 3, <i>Aguas Agro-urbanas o Amarillas</i> | 91 |
| Cuadro 16. Caracterización del Grupo 4, <i>Aguas Urbanas o Rojas</i> | 92 |
| Cuadro 17. Clasificación preliminar de los sitios de muestreo | 93 |
| Cuadro 18. Coeficientes estandarizados de funciones discriminantes para la clasificación | 94 |
| Cuadro 19. Funciones discriminantes | 95 |
| Cuadro 20. Grado de diferencias entre grupos | 95 |
| Cuadro 21. Coeficientes de la función de clasificación para cada grupo | 97 |
| Cuadro 22. Porcentajes de clasificación | 98 |



RESUMEN

Los ríos son los principales abastecedores de agua de los asentamientos humanos, las riberas son importantes ambientes que conectan los sistemas terrestres con los acuáticos. También se los conoce como ambientes riparios o ribereños. La mayor importancia de estos ambientes radica en los servicios ecosistémicos que brinda, sin embargo están bajo una fuerte presión debido a la alta demanda del recurso por el crecimiento demográfico. Uno de los aspectos más importantes de estos ecosistemas riparios es el agua y su calidad. El constante monitoreo de las corrientes superficiales es muy importante ya que con ello se pueden desarrollar escenarios de gestión, conservación y restauración de los ríos. También regular las descargas de la industria, agricultura y domésticas a las aguas nacionales. Debido a las disposiciones contempladas en el Plan Nacional Hídrico vigente se deberán expedir declaratorias en materia de clasificación de cuerpos de aguas nacionales, sin embargo este no establece criterios de clasificación.

El presente trabajo tuvo como objetivo aplicar un modelo de clasificación de los diferentes tipos de aguas en función de sus características físicas y químicas que refleje la influencia de los usos de suelo presentes alrededor de los sistemas ribereños. Se tuvo como unidad de estudio la subcuenca hidrográfica de San Martín Texmelucan en Puebla se colectaron muestras de agua en el periodo de septiembre de 2013 a diciembre de 2014 en 20 sitios de muestreo ubicados bajo el criterio de diversos usos de suelo y variación altitudinal. Se determinaron *in situ* temperatura del agua, alcalinidad, dureza de Ca, dureza total, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH y sólidos totales disueltos, y mediante pruebas analíticas en laboratorio amonio, nitritos, nitratos, ortofosfatos, fósforo total, sulfuros, sulfatos, DBO₅ y DQO. El tratamiento estadístico de datos fue mediante análisis multivariado de correlación, análisis de componentes principales (ACP), análisis de conglomerados (AC) y análisis discriminante (AD). Mediante las funciones resultantes se generó un modelo que separó las aguas muestreadas en 4 grupos de aguas (azul, verde, amarillo y rojo) los cuales representan distintas características físicas y químicas. El grupo azul es predominantemente de uso de suelo forestal y se encuentran dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl; el grupo verde con usos de suelo forestales pero con manejo por parte de la población ejidataria, se encuentran principalmente en la zona de influencia del área natural protegida; las aguas amarillas representan usos de suelo con actividades agrícolas, este grupo se ubica principalmente en la zona exterior de la reserva de la biósfera Los Volcanes; y las aguas rojas con usos de suelo urbanos en su mayoría, son aguas completamente inmersas en localidades urbanas donde se reciben las descargas de manera constante. Mediante análisis discriminante se obtuvo un modelo con un 89.74% de eficiencia para clasificar las observaciones. Es posible clasificar los tipos de aguas en función de sus características físicas, químicas y del uso de suelo que circunda a los ambientes ribereños.



ABSTRACT

Rivers are the main suppliers of water for human settlements, the banks are important environments that connect terrestrial aquatic systems. They are also known as riparian environments. The most important of these environments lies in the ecosystem services it provides, however, they are under severe pressure due to the high demand for the resource by population growth. One of the most important aspects of these riparian ecosystems is water and its quality. Assessment of surface water quality is an important aspect as this can develop scenarios of management, conservation and river restoration. Also regulate sewages from industry, agriculture and domestic in the National Waters. Because of the provisions in the current Plan Hídrico Nacional will be issued declarations concerning the classification of national water bodies, however this does not establish classification criteria.

The main objective was to apply a classification model of different water types depending on their physical and chemical characteristics that reflect the influence of land use present around riparian systems. Taken as a unit of study, the sub-basin of San Martín Texmelucan in Puebla. Water samples from 20 sites were collected between September 2013 and December 2014. The sites located under the criteria of various land uses and altitudinal variation. The temperature, pH, electrical conductivity, alkalinity, hardness of Ca, total hardness, dissolved oxygen and total dissolved solids were measured *in situ*. Other parameters such as nitrite, nitrate, orthophosphate, total phosphorus, sulfides, sulfates, BOD₅ and COD have been determined in laboratory by analytical tests.

The multivariate analysis of the watershed water quality data sets was performed through correlation analysis, principal component analysis (PCA), cluster analysis (CA) and discriminant analysis (DA). The resulting functions by a model that separated the waters sampled into 4 groups (blue, green, yellow and red) which represent different physical and chemical characteristics. The group predominantly blue forest land use and are within the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park. Green with land uses of forest management but by the ejidataria population group, are mainly in the area of influence of the protected area. Yellow waters represent land uses with agriculture, this group is located mainly in the outer area of the Biosphere Reserve Volcanoes; and the red waters with urban land uses mostly water are completely immersed in urban areas where sewages steadily received. Discriminant analysis using a model with a 89.74% efficiency was obtained for classifying observations. It was possible to classify the types of waters in terms of Their physical, chemical and land use surrounding the features riparian environments.



INTRODUCCIÓN

El agua, compuesto indispensable para la vida y responsable del origen de la misma, carece hoy del valor que merece. Ha sido explotada, contaminada y comercializada en diferentes partes del mundo, lo que provoca una enorme presión sobre este bien. Las riberas son zonas de transición entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. Se distinguen por gradientes en las condiciones biofísicas, ecológicas, de procesos y de la biota. Son áreas a través de las cuales la hidrología superficial y la subsuperficial conectan los cuerpos de agua con sus zonas adyacentes (Guevara *et al.*, 2008), estas áreas proveen numerosos y valiosas funciones de importancia ecológica regulando el flujo de agua, sedimentos y nutrientes, contribuyen al medio acuático con materia orgánica, estabilizan los bancos inundables y reducen la erosión, son un hábitat único para las especies y son usados como corredores biológicos (Holmes & Goebel, 2011).

La investigación de los ríos y los ambientes ribereños se basan a menudo en el concepto de la cuenca como unidad topográfica e hidrológica definida (Zhou *et al.*, 2012), las cuencas de los ríos constituyen áreas con una alta densidad de población ya que brindan una vida favorable debido a la disponibilidad de tierras fértiles, agua para irrigación, industria y consumo humano, los ríos juegan un papel importante en el transporte de las descargas de aguas municipales, de la industria y agricultura (Vega *et al.*, 1998), la calidad del agua superficial, es un problema sensible y fundamental para la gestión de los recursos y la toma de decisiones en materia de agua (Xu *et al.*, 2012).

El monitoreo de la calidad del agua es una de las prioridades más importantes para generar políticas de protección ambiental, es por ello que determinar la calidad del agua de cualquier cuerpo acuático debe ser sistemático (Magyar *et al.*, 2013), ya que la calidad del agua de los ríos es fuertemente influenciada por los factores biofísicos y socioeconómicos de las tierras adyacentes (Zhou *et al.*, 2012). La estadística multivariada es una herramienta que permite reducir la dimensionalidad e interpretar un amplio y complejo conjunto de datos mediante análisis exploratorio aplicando técnicas como análisis de componentes principales, análisis de conglomerados y análisis discriminante (Magyar *et al.*, 2012; Ouyang *et al.*, 2006; Vega *et al.*, 1998; Chandra *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2012).

Establecer criterios de clasificación para los ríos que estén en función de la calidad del agua y del ambiente ripario es importante para la preservación de la salud humana y del ecosistema; el artículo 87 de la Ley de Aguas Nacionales dice que “*la autoridad del agua*” expedirá declaratorias en materia de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, con todo solo toma en cuenta la capacidad del agua para depurar las descargas, sin incluir otros aspectos que claramente intervienen en la calidad del agua de los ríos. Es por ello que este trabajo aborda esta problemática mediante un análisis exploratorio de datos de la calidad del agua de la subcuenca de San Martín Texmelucan, reconociendo la importancia de la influencia del uso del suelo y del ambiente ribereño que constantemente interactúa con los cuerpos lóticos. La parte alta de la subcuenca está dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl–Popocatepetl, lo cual refleja la influencia de las actividades productivas y de conservación en la zona.



MARCO TEÓRICO

El agua: la molécula y sus propiedades

El agua producto formado en la combustión del hidrógeno, es el compuesto químico más abundante en la Tierra, donde se le encuentra en sus tres estados físicos: como líquido cubriendo las tres cuartas partes de la superficie del planeta, constituyendo mares, ríos y lagos; como vapor en grandes cantidades en la atmósfera, de donde se precipita como lluvia o nieve, y en su estado sólido (hielo), formando depósitos sobre las altas montañas y cubriendo las regiones polares (Romo & Delgado, 2011).

Se tiene la suposición de que el agua apareció en la Tierra por la actividad volcánica o por medio de meteoritos que se estrellaron en la Tierra, de cualquier forma, la molécula del agua es singular y abundante y es la base de la vida que constituye al menos el 75% del volumen de una célula viva y más de la mitad del peso de los seres vivos. El agua en su estado puro, es un líquido incoloro, inodoro e insípido es vital por un motivo simple: como solvente (agente para que las sustancias formen soluciones), el agua puede disolver más sustancias que cualquier otra molécula conocida, y lo más trascendente, los pasos más importantes de la evolución química, incluyendo el mismo origen de la vida, tuvieron lugar en el agua (Freeman, 2009; Romo & Delgado, 2011; De Villiers, 2000).

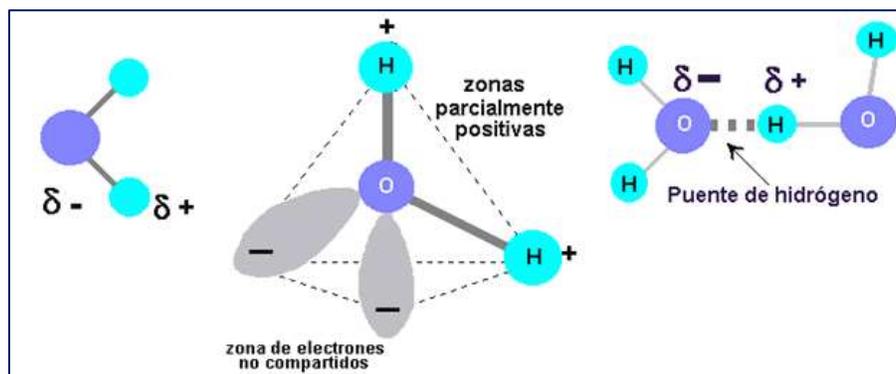


Figura 1. Geometría molecular del agua.

Fuente: <http://fisiolvegetal.blogspot.mx/2012/09/principales-propiedades-fisicas.html>

El arreglo espacial de las moléculas brinda propiedades a las moléculas, “*la función sigue a la estructura*”, lo que implica que la estereoquímica de una molécula a menudo dicta su comportamiento (Freeman, 2009), y la molécula del agua es el mejor ejemplo. Está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, tiene una masa molar de 18.0153 g/mol. Un mol se refiere a la enorme cantidad de 6.022×10^{23} moléculas (Geissler & Arroyo, 2011).

La molécula del agua está determinada por la geometría de los enlaces hidrógeno–oxígeno, estos átomos tienen diferentes electronegatividades, los cuales a su vez están regidos por la repulsión electrónica presente entre los pares de electrones libres (figura 1). El oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno. Como consecuencia, la densidad electrónica en los enlaces covalentes simples entre



el oxígeno y los dos átomos de hidrógeno no tienen una distribución simétrica, sino que el átomo de oxígeno atrae más densidad electrónica (Freedman, 2009; Geissler & Arroyo, 2011).

Cada uno de los enlaces H – O está polarizado. Es muy importante saber que los tres átomos de la molécula de agua forman una estructura angular debido a la llamada hibridación de los orbitales atómicos; ésta polaridad afecta sus interacciones con otras moléculas de agua; cuando las moléculas de agua líquida se acercan, la carga positiva parcial del hidrógeno atrae la carga negativa parcial del oxígeno (Geissler & Arroyo, 2011).

La polaridad de la molécula del agua que provoca atracción química entre una molécula y otra, implica que, en una solución acuosa, también se formen enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua con moléculas polares y moléculas de agua con iones. Los enlaces de hidrógeno hacen posible que todas las moléculas polares se disuelvan en agua.

Aunque los enlaces de hidrógeno no son tan fuertes como los enlaces covalentes o iónicos, son de gran importancia en Biología por el enorme número de ellos que se forma entre el agua y las moléculas polares con carga (Freeman, 2006).

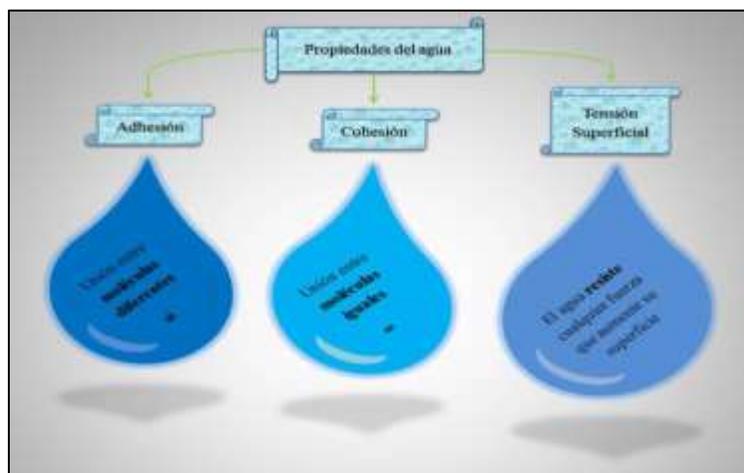


Figura 2. Propiedades del agua. Imagen: Cecilia Cornejo–Mancera.

Las propiedades más importantes del agua son la cohesión, adhesión y la tensión superficial (figura 2), las cuales le brindan al agua su importancia como molécula y que son derivadas de los enlaces de hidrógeno. De ahí la gran relevancia de la propia estructura de la molécula y de la polaridad que posee gracias a la diferencia de electronegatividades de los átomos que la conforman.

La cohesión es la propiedad que tienen las moléculas de agua de formar “redes”, lo que significa la interacción entre las mismas moléculas. La adhesión implica la interacción de las moléculas de agua con un sólido en donde el agua se adhiere a superficies sólidas que poseen componentes polares o cargados, lo anterior le da la característica de capilaridad, en la cual el agua puede “escalar” una



superficie sólida que posea conductos estrechos o capilares, lo que conocemos como “mojado” ya que las interacciones del agua son muy fuertes y la capilaridad grande. La tensión superficial es el resultado de la fuerte cohesión que hay entre los enlaces de hidrógeno que se forman entre las moléculas de agua, e insectos como *Gerris lacustris* o insecto zapatero, aprovechan esta propiedad para posarse sobre la superficie del agua (figura 3).

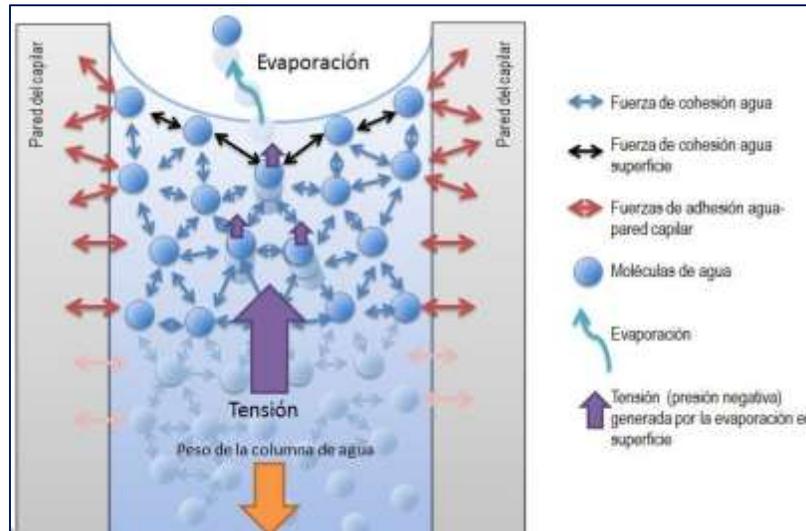


Figura 3. Cualidades del agua.

Fuente: <http://exxicnn1iesmb.blogspot.mx/2016/01/exxi-bygl-eso-ud05-lahidrosfera.html>

Importancia del ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico liga a los grandes sistemas de energía y materiales del planeta. El ciclo determina los movimientos del agua en el sistema terrestre a través de tres procesos básicos: precipitación, evapotranspiración y escorrentía (Toledo, 2006). Se puede hablar del ciclo del agua iniciando con la evaporación de agua de océano y la consecuente precipitación de agua. Para el componente marino del ciclo, la evaporación excede las precipitaciones, es decir, que a lo largo de los océanos hay una ganancia neta de agua en la atmósfera (Freeman, 2009).

Cuando ese vapor de agua se desplaza por los continentes, está unido por una pequeña cantidad de agua evaporada de los lagos y ríos y un gran volumen del agua transpirada por la plantas. El volumen total de agua en la atmósfera a lo largo de la tierra está equilibrado por la cantidad de lluvia y otras formas de precipitaciones de los continentes. El ciclo se completa con el agua que se desplaza desde la tierra a los océanos a través de los ríos y aguas subterráneas (Freeman, 2009).

El ciclo del agua se puede representar como un sistema, es decir, como una estructura o volumen en el espacio delimitado por una frontera, cuyos componentes internos interactúan entre sí con otros sistemas



adyacentes que se consideran en una escala a nivel de planeta y el cual se puede dividir en tres subsistemas: atmosférico, superficial y subterráneo (Breña & Jacobo, 2013).

La importancia del ciclo del agua puede resumirse en cuatro puntos principales (Geissler & Arroyo, 2011):

- a) El equilibrio entre la evaporación y la condensación es de gran relevancia para la distribución de energía en nuestro planeta, porque la evaporación necesita energía y la condensación libera energía. Además, las moléculas del agua en la atmósfera participan en el efecto invernadero porque absorben energía.
- b) El equilibrio entre cristalización y disolución es de importancia fundamental para la distribución de sustancias solubles en el planeta.
- c) El equilibrio entre el desdoblamiento de la molécula del agua en la primera etapa de la fotosíntesis y, más tarde, en su reformación por el proceso de la respiración forma carbohidratos y libera oxígeno.
- d) El ciclo del agua conecta a los seres humanos con los ecosistemas.

Con ello se modera el clima y la dinámica fluvial que hace posible la vida en la Tierra (Toledo, 2006).

La importancia del agua.

El agua permite la conservación y evolución de los ecosistemas por ser, tal vez, el más importante elemento vital entre los servicios ecosistémicos; pero, es también asunto ancestral de seguridad nacional, por la posibilidad de ser utilizada en forma de herramienta de guerra, mecanismo de presión, de negociación o de gobernanza (principio, Dublín, 1992; citado en Oswald, 2014).

Es una molécula indispensable para la vida en el planeta. Existe una creciente demanda de este recurso natural, no solo en el ámbito ecológico y ambiental sino también en lo político, social, jurídico y cultural (Bautista *et al.*, 2011). Debido a diversas actividades humanas, el ciclo biogeoquímico del agua se ha visto afectado significativamente, no solo por el volumen utilizado, sino también por el grado de contaminación con que son retornadas a los cuerpos receptores como ríos y lagos (Bautista *et al.*, 2011).

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI es el de tener acceso a suficiente agua limpia ya que es un factor determinante para la salud y enfermedades humanas (Zhao *et al.*, 2012), la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, e incluso para la estabilidad social y política.

A pesar de que 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, 97.5% de ésta es salina (cerca de 1, 400 millones de km³), contenida principalmente en los océanos, y sólo 2.5% es agua dulce (alrededor de 35 millones de km³), (figura 4). De ésta, 68.9% se encuentra congelada (bancos de hielo, glaciares y nieves perpetuas) y en la humedad del suelo; 30.8% se almacena en aguas subterráneas, y



poco menos de 0.3% es agua superficial localizada en lagos, lagunas, ríos y humedales (PNUMA, 2004; Shiklomanov & Rodda, 2003; citado en: Carabias, 2005).

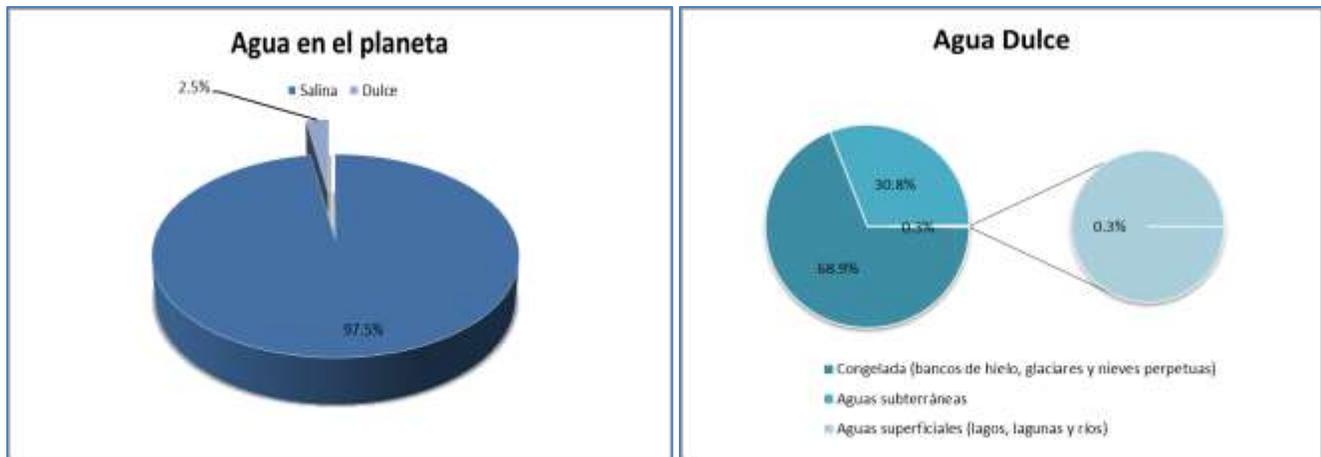


Figura 4. Porcentaje de agua dulce del planeta. Imagen: Cecilia Cornejo–Mancera.

Composición química de las aguas.

Las aguas naturales superficiales (ríos, manantiales, arroyos, lagos) no presentan un estado químico puro, aún sin la influencia del hombre, el agua presenta materiales suspendidos, disueltos, orgánicos e inorgánicos los cuales reaccionan químicamente con la molécula del agua. En los cursos superficiales y subterráneos de las aguas continentales existen muchos factores que influyen la composición química del agua de río causando variaciones de lugar a lugar debido a la precipitación atmosférica, la actividad volcánica y la contaminación, sin embargo, la mayoría de los iones presentes en el agua de los ríos proviene de la disolución de las rocas de la cuenca hidrográfica, esto determina la mayormente la composición química de las aguas superficiales (Allan & Castillo, 2007; Geissler & Arroyo, 2011).

Las sales suelen medirse evaporando una muestra de agua filtrada: las sales que no se evaporan se denominan sólidos totales disueltos (STD). Cuando la evaporación aumenta debido a la temperatura, la concentración de sales también aumenta en las aguas hasta el grado de ser una amenaza para la población natural de plantas, animales, abastecimiento público e irrigación, generalmente eso suele suceder a medida que las aguas de un río bajan hasta el punto menos elevado de las cuencas (Davis & Masten, 2005)

Las concentraciones de los cuatro cationes principales, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , y de los cuatro aniones principales, HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- determinan la salinidad total del agua. Las concentraciones de componentes ionizados de otros elementos, como el nitrógeno, fósforo y hierro, así como otros elementos secundarios, tienen gran importancia biológica, pero desde el punto de vista de la composición de las aguas dulces son insignificantes; las aguas de manantiales, ríos y lagos, todavía no influenciadas ni contaminadas por el hombre, contienen entre 0.01% y 0.2% de sustancias inorgánicas sólidas y también sales disueltas, principalmente compuestos de calcio (Ca) y magnesio (Mg), aunque



también de sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe) y manganeso (Mn). Los aniones más frecuentes son el carbonato (CO_3^{2-}), el cloruro (Cl^-) y el sulfato (SO_4^{2-}), donde predominan concentraciones bajas de bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y cloruros (Geissler & Arroyo, 2011; Wetzel, 1981).

El total de número de iones se estima mediante STD, salinidad y conductividad. La conductividad es una medida de la capacidad el agua para conducir electricidad, y es la más usada debido a la facilidad de determinarla. Tanto los nutrientes como las sales influyen la conductividad del agua, sin embargo, se utiliza a menudo como sustituto de la salinidad en el agua (Dodds, 2002).

Otra característica que forma parte de la composición química del agua es la alcalinidad, la cual indica la capacidad del agua para reaccionar con un ácido o una base, respectivamente y a su vez la capacidad del agua para llevar a cabo estas reacciones depende de los iones de hidrógeno (H^+), los cuales tienen importancia tanto biológica como química y definen la acidez del agua, entre más pequeño sea el valor de pH mayor es la actividad de los iones de hidrógeno en el agua y un incremento en la actividad de estos iones propicia reacciones que pueden alterar la calidad del agua como la solubilidad de metales tóxicos en el agua (Dodds, 2002).

La dureza es la suma de los iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) presentes en el agua, es el indicador de la habilidad del agua para precipitar jabones, esto es de particular interés debido a las descargas de aguas domésticas en los ríos. Cabe mencionar que sus altas concentraciones facilitan la precipitación de sales y en ocasiones la obstrucción de tuberías e instalaciones (Dodds, 2002).

Los nutrientes que principalmente se toman en cuenta son el nitrógeno y el fósforo, dos nutrientes muy importantes, fundamentales para la vida, ya que todos los seres vivos los necesitan para su crecimiento, pero que se consideran contaminantes cuando existen cantidades excesivas. En consecuencia deben estar presentes en los ríos y lagos para soportar la red alimenticia natural. Los problemas surgen cuando las concentraciones de nutrientes se vuelven excesivas y se perturba el equilibrio del sistema, lo que favorece que algunos organismos proliferen a expensas de otros. Con frecuencia el exceso de nutrientes causa grandes crecimientos de algas, que a su vez impiden el paso de luz al sistema y se convierten en material demandante de oxígeno cuando mueren y se asientan en el fondo. Algunas de las fuentes principales de nutrientes son detergentes y fertilizantes que contienen fósforo y los desechos del procesamiento de alimentos, así como el excremento animal y humano (Davis & Masten, 2005).

La forma más común del nitrógeno en el planeta es el N_2 gaseoso; en el agua se lo puede encontrar como gas disuelto, en combinaciones inorgánicas y en combinaciones orgánicas. El flujo del nitrógeno en el agua es naturalmente regulado por bacterias capaces de reducir y oxidar los nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) y de transformar el amonio (NH_4^+) en compuestos orgánicos (aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos). El sulfuro (S^{2-}) a menudo se presenta en aguas por descomposición de materia orgánica y por reducción bacteriana del sulfato (SO_4^{2-}).



Calidad del agua.

En el mundo antiguo los romanos se preocupaban por seleccionar fuentes adecuadas de agua; Vitruvio, ingeniero hidráulico del siglo I a.C., escribió un tratado en el que se señalaban los cinco criterios básicos: 1) la salud de la gente que vivía en las inmediaciones del manantial debía ser buena, 2) el agua debía poder ser salpicada en una vasija de bronce y no debía dejar manchas, 3) el agua debía poder hervirse y verterse después sin dejar sedimentos, 4) las verduras debía cocerse rápidamente, y 5) el agua debía ser clara, y no tener musgo ni juncos. Cuando había una evidente diferencia de calidad entre dos fuentes las aguas no se mezclaban y se utilizaban para distintos propósitos: la del acueducto de Marcia, por ejemplo, era potable mientras que la de Anio Vetus se usaba exclusivamente para el lavado de ropa (Guerrero, 2006).

La calidad del agua no es una característica absoluta, es más un atributo definido socialmente en función del uso que se le piense dar al líquido; cada uso requiere un determinado estándar de calidad. El agua utilizada para la generación de energía hidroeléctrica, con fines industriales, y el transporte no requiere un alto nivel de pureza. Por esa razón, en la calidad del agua deben ser tomadas en cuenta las características físicas, químicas y biológicas de la misma, ya que es necesaria para sostener los usos del agua deseados. Controlar la calidad del agua es importante porque el agua limpia es necesaria para la salud humana y ecosistémica. Los ecosistemas limpian el agua, por ejemplo, los humedales proporcionan un servicio muy importante, ya que filtran el agua mediante la interceptación de la escorrentía superficial, atrapando los sedimentos, favoreciendo la eliminación de nitrógeno y fósforo al incorporarlo al suelo y organismos y el aprovechamiento de los minerales del agua (WRI, 2000).

Un número de factores químicos, físicos y microbiológicos afectan negativamente la calidad del agua, tales como exceso de materia orgánica, incremento en la concentración de nutrientes, metales pesados, contaminación microbiana, componentes orgánicos tóxicos, salinización, acidificación, el exceso de evaporación, las partículas suspendidas y cambios en la temperatura (WRI, 2000).

Contaminación del agua.

La contaminación es la introducción de energía y de sustancias al medio ambiente, causada por el hombre directa o indirectamente, que con cierta probabilidad amenazan la salud humana, dañan recursos vivos y sistemas ecológicos, zonas recreativas o influyen (negativamente) sobre la explotación legítima y sustentable del medio ambiente (Geissler & Arroyo, 2011).

La contaminación hídrica de las aguas continentales y los océanos, es generada por vertimientos industriales y domésticos a los flujos de agua, las actividades productivas han puesto una enorme presión sobre el medio ambiente, lo que ha causado un cambio climático que altera e intensifica el uso del agua, destruye y contamina los ecosistemas acuáticos y sobreexplota los recursos pesqueros debido a que muchas de las zonas domésticas e industriales descargan sus aguas contaminadas directamente en ríos y quebradas (Maldonado, 2009).



Panorama del Agua en el Mundo y el Acceso Humano al Agua.

Como ya se mencionó, existe en el mundo una abundante cantidad de agua; sin embargo, no toda ella es apta para el consumo humano, ni suficiente para satisfacer sus necesidades básicas, lo cual provoca que su escasez sea constante para algunos sectores de la población e, incluso, en ciertas regiones, el acceso a ella sea nulo (Mendizábal & Sedano, 2014).

El acceso humano al agua ha sido definido como:

“Derecho de todos a disponer del agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico. Un abastecimiento adecuado de agua salubre es necesario para evitar la muerte por deshidratación, para reducir el riesgo de las enfermedades relacionadas con el agua y satisfacer las necesidades de consumo y cocina, y las necesidades de higiene personal y doméstica” (Consejo Económico Social de la ONU, 2003. Citado en: Mendizábal & Sedano, 2014).

El derecho humano al agua y el saneamiento fue aprobado por la ONU el 28 de julio de 2010 donde quedó establecido que además es indispensable para el cumplimiento de todos los demás derechos. Entre las decisiones que afectan el agua, la mayor parte son las relativas a cómo un país cumple con sus objetivos para la energía y la seguridad alimentaria, el empleo, la preparación para desastres, la sostenibilidad del medio ambiente y otros objetivos sociales; el nivel de contaminación del agua está en función de la estructura de la economía de un país y su capacidad institucional y legal para hacerle frente (UNESCO, 2009; Mendizábal & Sedano, 2014).

La crisis del agua es la faceta más penetrante, aguda e invisible de la devastación ecológica de la Tierra. En 1998, 28 países experimentaron tensión o escasez hídrica y se prevé que esta cifra aumente a 56 para el año 2025. (Shiva, 2003).

Se dice que un país enfrenta una grave crisis del agua cuando el agua disponible no llega a 1000 metros cúbicos por persona al año. Cualquier cifra inferior a ésta implica un gran menoscabo de la salud y el desarrollo económico de una nación. Cuando el agua anual disponible por persona es inferior a 500 metros cúbicos, la vida del pueblo queda gravemente comprometida (Shiva, 2003). Según la UNESCO (2003), las principales presiones que sufren los ecosistemas de aguas continentales se resumen en la cuadro 1.



Cuadro 1. Principales actividades antropogénicas que afectan a los recursos hídricos.

| Actividad Humana | Efecto Potencial | Función en Peligro |
|---|--|---|
| Crecimiento demográfico y del consumo | Aumenta la extracción de agua y la adquisición de tierras cultivadas mediante el drenaje de humedales; aumenta la necesidad de todas las demás actividades, con los riesgos consiguientes. | Prácticamente, todas las funciones del ecosistema, incluyendo funciones de hábitat, producción y regulación. |
| Desarrollo de infraestructura (presas, canales, diques, desvíos, etc.) | La pérdida de la integridad altera el ritmo y la cantidad de las corrientes fluviales, la temperatura del agua y el transporte de nutrientes y sedimentos, y como resultado el rellenado del delta bloquea las migraciones de peces. | Cantidad y calidad del agua, hábitats, fertilidad de la llanura de inundación, pesquerías, economías del delta. |
| Conversión de tierras. | Elimina componentes clave del entorno acuático: pérdida de funciones; integridad; hábitat y biodiversidad; altera pautas de escurrimiento; inhibe la recarga natural, rellena de limo los cuerpos de agua. | Control natural de inundaciones, hábitats para pesquerías y aves acuáticas, recreo, suministro del agua, cantidad y calidad del agua. |
| Exceso de cosecha y explotación. | Reduce recursos vivos, las funciones del ecosistema y la biodiversidad (agotamiento de aguas subterráneas, colapso de pesquerías) | Producción de alimentos, suministro de agua, calidad y cantidad de la misma. |
| Introducción de especies exóticas. | Competencia de especies introducidas; altera la producción y ciclo de nutrientes; y causa pérdida de biodiversidad de especies nativas. | Producción de alimentos, hábitat de fauna y flora, actividades recreativas. |
| Descarga de contaminantes en tierra, aire o agua. | La contaminación de cuerpos de agua altera la química y la ecología de ríos, lagos y humedales; las emisiones de gas invernadero producen notables cambios en los patrones de escurrimiento y precipitación. | Suministro de agua, hábitat, calidad del agua; producción de alimentos; cambio climático, pueden también repercutir en la energía hidráulica, capacidad de dilución, transporte, control de inundaciones. |

Panorama del Agua en México.

La Ley de Aguas Nacionales en su artículo 14 BIS 5, fracción I y II, se establece que “*el agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional*”.

México se caracteriza por la complejidad de su fisiografía y topografía, un patrón de distribución climática que obedece a su ubicación latitudinal, distribución de agua en sus alrededores y corrientes de vientos, así como por una precipitación que se distribuye de manera desigual a lo largo del territorio. En México 69% del escurrimiento natural de que dispone el país (incluyendo aportaciones de otros países) se concentra en las cuencas de los ríos Balsas, Santiago, Verde, Ometepec, Fuerte, Grijalva–Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Pánuco, Tecolutla, Bravo y Tonalá (De la Lanza & Hernández, 2007; SEMARNAT-CONAGUA, 2014).

El mayor crecimiento poblacional y económico se ha generado en las zonas con menor disponibilidad de agua; así, en el centro y norte, donde se tiene 31% de disponibilidad de agua, se encuentra el 77% de



la población, situación que contrasta con la prevaleciente zona sureste, donde existe 69% de la disponibilidad de agua y únicamente alberga 23% total de los habitantes. Lo cual indica que la disponibilidad del agua depende no sólo de la cantidad, sino también de la calidad y es altamente influenciada por el desarrollo tecnológico e industrial de las poblaciones, es decir, en algunas regiones del país el agua es suficiente para satisfacer las demandas sin conflicto de por medio, en dos tercios del territorio, donde ocurre el mayor desarrollo económico y la concentración demográfica más importante, existe una gran presión sobre el vital líquido, de por si escaso, al encontrarse comprometido para usos previamente establecidos. Entonces resulta de gran importancia articular un modelo de gestión de recursos hídricos cada vez más eficiente y flexible, acorde con su entorno, sin limitar el desarrollo económico del país (Alarcón & Angélicaume–Descamps, 2014; SEMARNAT-CONAGUA, 2014).

La disponibilidad natural media per cápita de agua en México era en 1950 de 18, 035 m³/hab. /año (figura 5), en 1970 fue de 9, 645 m³/hab. /año, en 2008 fue de 4, 288 m³/hab. /año y en 2013 pasó a 3, 982 m³/hab. /año, cifra calificada como baja por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (Alarcón & Angélicaume–Descamps, 2014; SEMARNAT-CONAGUA, 2014).

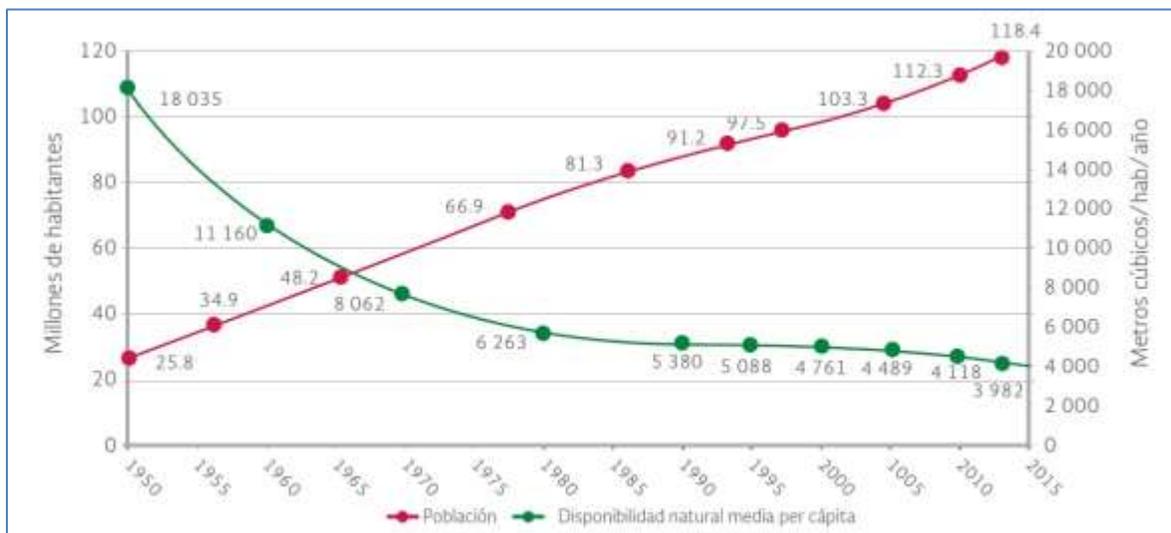


Figura 5. Disponibilidad natural media per cápita en México.

Fuente: SEMARNAT-CONAGUA, 2014.

Cuencas Hidrográficas.

El agua es un agente íntimamente vinculado a la vida en todas sus formas, que se mueve sobre la superficie terrestre en respuesta a las fuerzas de gravedad, labrando cauces y confluyendo en las partes más bajas del relieve. El espacio geográfico en el cual transcurre el movimiento superficial del agua es la cuenca hidrográfica; una unidad espacial en la que se conjuntan condiciones particulares de clima,



relieve, suelo y vegetación que controlan los procesos hidrológicos que a su vez determinan la cantidad y calidad del agua así como su distribución espacial y temporal (Burgos & Bocco, 2015).

El agua interviene en procesos de tipo físico-químico y ecológico, como la erosión, sedimentación y disolución entre los primeros, o la distribución espacial de comunidades vegetales entre los últimos. Pero también el agua interviene en la expresión de procesos sociales. Ejemplos son el establecimiento de asentamientos humanos, la intensidad de actividades productivas e industriales – y el consecuente crecimiento económico –, la construcción de normas y reglas para el acceso y distribución del agua, e incluso la creación de instituciones y el diseño de políticas públicas. Es así que el agua, un componente natural, se transforma en un recurso hídrico, esto es, un componente social (Burgos & Bocco, 2015).

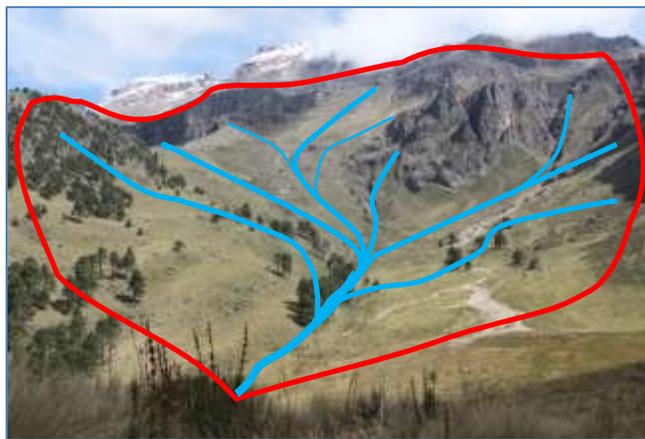


Figura 6. Cuenca hidrográfica. Imagen: Cecilia Cornejo–Mancera.

Se define como cuenca hidrográfica a una zona geográfica que abastece de agua, mediante flujos superficiales o subterráneos, a un sistema de drenaje o cuerpo de agua, ya sea un arroyo, río, humedal, lago o mar. Las características del flujo de agua y su relación con la cuenca son un producto de las interacciones entre el suelo y el agua, tales como la geología, pendiente, régimen de lluvias, los suelos y la biota, así como el uso y manejo de los mismos. Una cuenca hidrográfica es, pues, la unidad básica de abastecimiento de agua y el elemento clave para una planificación integrada del uso del agua y de la tierra (World Bank, 2008).

Cuando se habla de cuenca (figura 6) se enmarca la integración de elementos y procesos que ocurren en un espacio delimitado, los cuales se refieren a recursos como agua, suelo y vegetación o a las relaciones causales implicadas en los impactos y externalidades entre sectores aguas arriba – aguas abajo. También se refiere a la interacción de múltiples actores sociales que interactúan y se afectan mutuamente con intervenciones, conscientes o no, sobre el soporte biofísico de la cuenca (Burgos & Bocco, 2015).

El manejo integrado de cuencas es, hoy en día, el concepto clave en la construcción de relaciones de colaboración, cooperación y coordinación a diferentes niveles de organización social e institucional, y



escalas. El fin último es concertar intereses y necesidades en un mismo espacio habitado para el acceder al agua, resguardar las condiciones que la aseguran y establecer un rumbo para el desarrollo local y regional (Burgos & Bocco, 2015). Este concepto incluye también el aspecto político y económico a tal grado que en México la Ley de Aguas Nacionales establece que “*la gestión integrada de los recursos hídricos por cuenca hidrológica es la base de la política hídrica nacional y que la gestión de recursos hídricos se llevará a cabo en forma descentralizada e integrada privilegiando la acción directa y las decisiones por parte de los actores locales y por cuenca hidrológica*” (fracciones II y III del artículo 3° de la Ley de Aguas Nacionales).

Ambientes ribereños.

La limnología como ciencia encargada del estudio de los sistemas acuáticos epicontinentales, incluyendo sistemas lénticos (lagos, lagunas, presas) como lóticos (ríos, arroyos, manantiales), ha tenido avances académicos continuos, pero el incremento de la problemática ambiental producto de las actividades humanas es mayor. Dentro de estas dos grandes ramas, los estudios publicados acerca de los sistemas lóticos representan una mínima cantidad y diversidad dentro de las revistas científicas (De la Lanza & Hernández, 2007).

Las cuencas fluviales constituyen generalmente las zonas con una alta densidad de población, debido a las condiciones de vida favorables, tales como la disponibilidad de tierras fértiles, agua para fines de riego, industriales o de beber, e instrumentos eficaces de transporte. Los ríos desempeñan un papel importante en la asimilación o llevándose las aguas residuales industriales y municipales, los vertidos de estiércol y aguas de escorrentía de los campos agrícolas, caminos y calles, que son responsables de la contaminación del río (Vega *et al.*, 1998).

La conectividad, representa teóricamente la interacción entre distintos sistemas. El concepto es tema recurrente en ecología y ha sido relacionado con la dinámica y estabilidad de los sistemas ecológicos, la diversidad biológica y su función, y la complejidad espacial (Díaz *et al.*, 2009). Los ambientes ribereños o riparios, definidos como el conjunto de elementos bióticos y abióticos que ocurren en el área transicional entre los sistemas acuáticos y terrestres, o de manera simple como la interfase entre estos dos, son de gran importancia en el mantenimiento de los servicios ecosistémicos (Bautista *et al.*, 2011). A escala de cuenca, los cauces (canales) y áreas aledañas son completamente interdependientes con el paisaje del que forman parte. Las zonas de transición entre el medio terrestre y los ecosistemas acuáticos poseen un “poder tampón” (buffer), es decir tienen la capacidad de absorber y almacenar elementos (Granados *et al.*, 2006).

Además por sus condiciones microclimáticas particulares (áreas más húmedas y frescas que su entorno) constituyen unos excelentes corredores ecológicos que permiten la penetración de una fauna y flora procedente de zonas más oceánicas y montañas hacia espacios más áridos y esteparios (Montes, 2003).

Las zonas ribereñas son capaces de ofrecer una gama de regulación de los servicios ambientales hidrológicos (Pert *et al.*, 2010) debido a que los ríos constituyen también los principales recursos hídricos en las zonas del interior con fines industriales, potable, riego y; por lo tanto, es importante para



una gestión eficaz y eficiente del agua tener una información fiable de la calidad del agua (Vega *et al.*, 1998).

Las características de los ambientes ribereños están dadas debido a que operan en 4 dimensiones (Giller & Malmqvist, 2002):

1. *Longitudinal*: aguas arriba y aguas abajo, a lo largo de lo que normalmente hay un cambio profundo y predecible en las condiciones fisicoquímicas que a su vez conducen a patrones longitudinales en las variables.
2. *Lateral*: con la participación de las interacciones entre el canal de flujo, la zona de ribera y la cuenca circundante (es decir, la incorporación de la interfaz tierra-agua). También hay cierta interacción lateral por debajo de la superficie del sustrato, donde los extensos sistemas hiporreicos se extienden hasta 2 km desde el cauce del río.
3. *Vertical*: dimensión vertical, que afecta principalmente a la interacción entre las aguas de los ríos y las aguas subterráneas. La extensión de esta zona depende de la permeabilidad sustrato. En esta dimensión vertical, también hay que considerar la interfase aire-agua, que desempeña un papel en la función del ecosistema.
4. *Temporal*: donde los cambios previsibles en los factores fisicoquímicos y la biota relacionados con aspectos estacionales y cambios menos predecibles en la estructura y función de los ecosistemas de ríos y arroyos pueden estar relacionados con alteraciones en la llanura de inundación, cambios climáticos y los cambios en el uso del suelo o de la vegetación de la cuenca.

Es tal la importancia de los ambientes ribereños que en México, en la fracción XLVII del artículo 3° de la Ley de Aguas Nacionales (Diario Oficial de la Nación, 2004) se define la “Ribera o Zona Federal”, lo que resalta la importancia que juegan los ríos y las zonas ribereñas, no sólo como integradores de ecosistemas, sino como parte importante de las políticas públicas a niveles federales y de la propia seguridad nacional.

Clasificación en ciencias naturales.

La clasificación es uno de los procesos fundamentales de la ciencia que ordena los fenómenos para poderlos entender (De la Garza *et al.*, 2013); en un sentido genérico, clasificar significa ordenar o agrupar objetos u organismos de modo que los miembros de un mismo grupo compartan uno o más atributos o caracteres que no son compartidos por miembros de otros grupos. Todas las disciplinas biológicas emplean clasificaciones, dado que estas constituyen la clave del sistema de almacenamiento de la información.

La supervivencia fue lo que impulso a los primeros seres humanos a ser agudos observadores de la naturaleza, debido a las necesidades más básicas como cosas comestibles y no comestibles, húmedo o seco, peligroso o indefenso; antropólogos y etnobotánicos han descubierto que los pueblos primitivos



establecieron esquemas de clasificación bastante sofisticados como medio de comprensión y adaptación a su entorno (Everitt & Horton, 2011; Magner, 2002). A lo largo de la historia se pueden apreciar importantes clasificadores, en ciencias naturales se destacan Aristóteles (mundo animado e inanimado) del que se considera el primer método lógico y sistemático de clasificación (Ledesma, 2000); Linneo (sistema binomial de clasificación biológico), Dimitri I. Mendeléiev (tabla periódica de los elementos); en antropología se clasificaron los tipos raciales, así como las culturas y religiones. Las ciencias mismas se clasifican a menudo; todo esto teniendo como base que en la clasificación de cualquier elemento en cuestión se debe prestar mayor atención a las afinidades y rasgos naturales que caracterizan a cada objeto para formar grupos, no obstante la clasificación en ciencias naturales se consideraba *no objetiva* hacia el final del siglo XIX (Wilkins & Ebach, 2013).

Es un hecho que la clasificación es esencial en las actividades científicas y de gestión para la elaboración de inventarios, la interpretación de datos, extrapolación de la información, el establecimiento de criterios estratégicos y monitoreo de la singularidad de cada zona; la clasificación proporciona un marco necesario para la investigación y el desarrollo de estrategias de gestión específicas de cada grupo así como programas de monitoreo además es una forma de simplificar información compleja (Naiman *et al.*, 2005), todo esquema de clasificación debe de proveer un método conveniente de organización de un gran conjunto de múltiples datos (Everitt & Horton, 2011). En este trabajo se pretende clasificar un recurso renovable, el cual está bajo una fuerte presión de demanda y representa la base de la vida en el planeta tierra desde el origen de la misma.

Subcuenca: delimitación del área de estudio y la escala en la investigación.

La generación de información acerca de los ambientes ribereños debe ser en el marco de cuencas hidrográficas y éstas se deben de considerar como entidades funcionales organizadas jerárquicamente en ecosistemas interdependientes, en las cuales la alteración de un nivel del sistema afecta generalmente a los componentes más pequeños (Montes, 2003).

Los factores y procesos que determinan los patrones característicos de los niveles jerárquicos presentan dimensiones propias, es decir, los ecosistemas organizados en el marco de cuencas funcionan a través de una amplia gama de escalas espaciales y temporales. De tal manera que si se desea interpretar correctamente los fenómenos ambientales es trascendental escoger la escala adecuada a la observación del análisis.

La elección de la escala correcta de estudio y gestión incrementa la capacidad de explicación y predicción del proceso o patrón ecológico que se está analizando o el problema ambiental que se pretende solucionar (Montes, 2003). Por este motivo la selección de la escala o escalas apropiadas de observación se convierte en un tema clave en el diseño de cualquier programa de investigación y conservación de la integridad de los ecosistemas (Montes, 2003).



En 1970 la Secretaría de Recursos Hidráulicos en sus Boletines Hidrológicos, dio a conocer una regionalización del país a nivel de subcuencas hidrológicas a escala 1:1000000. CONABIO (1998b) llevó a cabo la digitalización de estos datos cartográficos, con un total de 3, 115 subcuencas para el país publicadas en formato digital el 11 de mayo de 2001 y disponible en línea en la actualidad.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han descrito como una integración de datos, hardware y software diseñado para visualizar, manejar, analizar y generar nueva información geográfica que no está disponible mediante el estudio de las partes por separado (Decker, 2001; Neteler y Mitasova, 2004). Durante la última década, los SIG han evolucionado a partir de un nicho altamente especializado a una tecnología que afecta a casi todos los aspectos de nuestras vidas, desde la búsqueda de rutas para conducir a la gestión de recursos naturales o efectos de un desastre natural; en consecuencia la cartografía ha pasado de ser un terreno exclusivo de profesionales del sector a ser una labor abierta donde las nuevas tecnologías, sobre todo de corte colaborativo, han permitido que otro tipo de usuarios desarrollen y compartan información cartográfica (Neteler y Mitasova, 2004; Olaya, 2011).

Los problemas espaciales de México pueden abordarse incorporando la perspectiva geográfica, siempre y cuando se tenga un enfoque multidisciplinario, integrativo, de trabajo de campo, interrelación tanto espacial como temporal, y como consecuencia la generación de cartografía actualizada y la posibilidad de aplicar los conocimientos generados (Fernández, 2011). Por lo tanto, los recursos naturales, tales como el agua y sus cuencas, que se distribuyen sobre espacios concretos y por ende son susceptibles de ser representados en mapas, una vez inventariados y clasificados (Bocco, 2004), pueden ser abordados desde esta perspectiva al tratar las problemáticas específicas.

El inventario y clasificación de cuencas se basa en dos tipos de datos: los obtenidos en campo y los derivados de la percepción remota (los cuales también se verifican en campo). La forma más eficiente de almacenar y analizar estos datos es mediante los sistemas de información geográfica (SIG), que además permite la elaboración y manipulación de mapas (Bocco, 2004). De tal manera que los SIG nos permiten generar además nueva información geográfica actual, ubicando espacialmente los fenómenos ambientales que acontecen en un área delimitada y permitiendo analizar las causas y consecuencias de dichos fenómenos.

Esto nos permite relacionar de manera eficiente datos cualitativos y cuantitativos de los recursos hídricos y su localización geográfica, lo que facilita la visión integral y territorial de nuestros datos (Bocco, 2004).

Los componentes de una cuenca están definidos por el relieve, es decir, la altitud y cambios en la altitud: canales o cursos principales y tributarios, laderas, divisoria de aguas, y nivel de base. Las cuencas y sus canales se organizan a nivel jerárquico: subcuencas y órdenes de cauces. (Bocco, 2004).

La web de la Open Source Geospatial Foundation ha sido creada para apoyar y construir el software geoespacial de la más alta calidad. El objetivo de la fundación es animar el uso y desarrollo



colaborativo de proyectos liderados por la comunidad. Este sitio sirve como portal para usuarios y desarrolladores para compartir ideas y contribuir al desarrollo de los proyectos (OSGeo, 2014).

El software libre ha experimentado en los últimos años un crecimiento impensable tiempo atrás. En la mayoría de áreas existen ya alternativas libres al software privativo, suficientemente maduras como para dar respuesta a todas las necesidades de los usuarios. Lejos de aquella imagen de aplicaciones muy alejadas de las necesidades y conocimientos del usuario medio, las aplicaciones libres están cada día más presentes en todos los ámbitos y a cualquier nivel de utilización, siendo su penetración muy elevada y, más importante aún, creciente. Los SIG, por supuesto, no son ajenos al movimiento del software libre, se dispone el día de hoy de excelentes alternativas en ese campo (Olaya, 2011).

Quantum Gis (QGIS), es un software de uso libre que permite el procesamiento de información espacial georreferenciada y que no crea conflictos por licencia de uso, también es amigable con el usuario y posee las herramientas básicas para la generación de nueva información cartográfica en estudios como este.

Parque Nacional Iztaccíhuatl–Popocatepetl.

La Región Terrestre Prioritaria (RTP) número 107 llamada Sierra Nevada es el parteaguas que separa las cuencas de México y del alto Balsas, descienden numerosos arroyos que irrigan los valles de México, Puebla y Morelos. De estos arroyos, y de la infiltración del agua en la sierra depende el abastecimiento de agua para uso doméstico, agrícola e industrial de una vasta región (Arriaga *et al.*, 2000).

Dentro de la RTP-107 se encuentra el Área Natural Protegida Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP), la cual brinda servicios ambientales tales como la regulaciones micro y meso climáticas, captación y flujos hidrológicos, protección frente a fenómenos naturales, productividad de suelos, captura de carbono, control de la erosión, biodiversidad y acervos genéticos, entre otros; una de las razones por las que se decretó como Parque Nacional es por ser la cabeza de dos importantes cuencas hidrológicas (CONANP, 2013).

Los municipios que forman parte del Parque Nacional y al mismo tiempo colindan con la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, han tenido un crecimiento demográfico explosivo, lo que se traduce en una urbanización acelerada y en la consecuente demanda de recursos naturales, particularmente agua, de tal manera que dada la importancia del PNIP en la prestación de servicios hidrológicos, es muy importante evaluar el estado de los recursos hidrológicos ya que el ciclo del agua se ha visto deteriorado por las actividades antropogénicas y lo anterior repercute en las zonas de captación y a su vez en los sistemas lóticos de la cuenca (CONANP, 2013).

Recientemente la UNESCO (2010), declaró la Reserva de la Biósfera Los Volcanes (RBLV), de la cual el PNIP forma parte, la importancia de este sitio radica en que se encuentra dentro de la región del Eje



Neovolcánico Transmexicano en la parte centro–oriental, constituyendo así el límite biogeográfico entre las regiones neártica y neotropical. Comprende un gradiente muy marcado de ecosistemas, derivados de la altimetría, favoreciendo la gran riqueza específica y la presencia de endemismos. Su diversidad ecosistémica consiste en bosques de pino, oyamel y pradera de alta montaña. Sus geoformas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesitas. Su rango altitudinal va desde los 2, 589 m s. n. m. hasta los 5, 452 m s. n. m., lo que la refiere como un área de interés prioritaria para el centro del país.

Análisis multivariante.

La estadística es un conjunto de teorías y métodos que han sido desarrollados para recolectar datos, manejarlos, analizarlos, encontrar medidas que permitan describir e interpretar la información, con el fin de concluir y poder tomar decisiones. A la información recabada en una investigación se le llama *dato*, un dato es una colección de observaciones numéricas o no numéricas con una característica en común. Una *variable* es un símbolo que puede tomar un valor cualquiera y representar a un conjunto determinado de datos; cuando se tiene una variable se busca información que describa su comportamiento, el cual puede ser descrito por diferentes medidas tales como indicadores de posición, indicadores de mayoría, indicadores de tendencia o indicadores de variabilidad (De la Garza *et al.*, 2013).

El análisis multivariante se puede definir como el conjunto de métodos o técnicas diseñados para el análisis e interpretación de la información contenida en un conjunto de variables sin perder la interacción o grado en que se afectan unas con otras (De la Garza *et al.*, 2013), y con ello entender las relaciones entre las variables (Schuenemeyer & Drew, 2010). Existen numerosas técnicas en estadística multivariante, en este trabajo se aplicaron los siguientes:

1) El ***análisis de correlaciones múltiples*** (ACM) tiene que ver con el concepto de *correlación* que va ligado al de *covarianza* y se definen como la asociación que hay entre dos variables aleatorias. La covarianza es una medida de la asociación lineal de dos variables, y la medida estandarizada de la covarianza es la correlación o el *coeficiente de correlación*, sin embargo, la correlación no siempre indica causa–efecto (Schuenemeyer & Drew, 2010).

2) El ***análisis de componentes principales*** (ACP) es una técnica exploratoria originalmente propuesta por K. Pearson en 1901, sin embargo fue desarrollada más detalladamente por Hotelling en 1933; el objetivo es transformar un sistema de variables correlacionadas en uno de variables no correlacionadas llamadas *componentes principales* con el propósito de reducir la dimensionalidad e identificar nuevas variables significativas, lo que facilita también la forma de graficar y procesar estas nuevas variables que representan tanta varianza como sea posible (Everitt & Horton, 2011; Dallas, 2000; Morrison, 2005; Schuenemeyer & Drew, 2010).

3) El término ***análisis de conglomerados*** (AC) fue utilizado por primera vez por Tyron en 1939; a esta técnica también se le conoce como *análisis de agrupamiento*, *análisis de segmentación de datos* o *cluster analysis*, por su nombre en inglés, y tiene sus inicios en biología en la *taxonomía numérica*



(*clustering*) fue tomado como sinónimo de clasificar diferentes especies en grupos homogéneos (Mardia *et al.*, 1995). La cuestión básica para el análisis de conglomerados es si es posible idear una clasificación o esquema de agrupación que permita dividir las unidades experimentales en clases o grupos, de modo que estas unidades sean lo más homogéneas posible entre sí; es decir, al comparar los elementos que conforman un grupo deberían ser tan parecidos como sea posible, y lo más heterogéneos al compararse un grupo con otro (Dallas, 2000; De la Garza *et al.*, 2013).

Para llevar a cabo el análisis de conglomerados es necesario tener en cuenta:

1. Formular el problema.
2. Observar lo que rodea a los posibles grupos y seleccionar las variables que en forma natural realicen una segmentación.
3. Definir la medida de proximidad.
4. Elegir el método de segmentación o agrupación.
5. Determinar la técnica o criterio para agrupar individuos en conglomerados.

La *medida de proximidad* es un indicador que refleja el grado de similitud o diferencia que existe entre individuos, objetos y variables. En este trabajo se utiliza la medida de disimilaridad o desemejanza *distancia euclidiana* cuya medida se calcula:

$$d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^r (X_{ik} - X_{jk})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

El método de segmentación o agrupación es un algoritmo que se sigue para formar grupos de objetos similares, estos se dividen en *jerárquicos* y *no jerárquicos*, en este caso se utiliza el método jerárquico. Los métodos jerárquicos se dividen a su vez en *aglomerativos* en el cual se supone que cada objeto de estudio es un grupo distinto y se van fusionando con base en lo parecido que son los objetos, hasta obtener un solo grupo; y *divisionales* el cual supone que existe en principio un solo grupo que contiene todos los objetos y se basa en las diferencias entre ellos para terminar con tantos grupos como se tienen objetos (De la Garza *et al.*, 2013).

Dentro de los métodos divisionales se encuentra el método de *Ward* o también llamado *método de la varianza mínima*, busca a los dos grupos o conglomerados cuya unión conlleve el menor incremento de la varianza. Esto significa que en cada paso se debe probar con todas las combinaciones posibles de dos grupos, calcular el valor del índice de la suma de cuadrados y seleccionar aquel con el menor valor. Utiliza más información sobre el contenido de los grupos que otros métodos, la desventaja es que tiende a formar grupos del mismo tamaño, pero es el que ha demostrado mayor eficacia en los estudios (De la Garza *et al.*, 2013). El análisis de conglomerados es una herramienta importante para el entendimiento de sistemas complejos, especialmente cuando se tienen observaciones con relaciones espaciales (Schuenemeyer & Drew, 2010), y es la técnica de mayor importancia en este trabajo ya que con ella se obtienen los grupos *a priori* de la clasificación.



4) El *análisis discriminante* (AD) es una técnica que se usa para generar reglas con las que se pueden clasificar los objetos experimentales u observaciones, el objetivo básico es producir un modelo que permita predecir la ubicación de un individuo u objeto con base en sus características en alguno de los grupos conocidos con anterioridad basándose en especificaciones exactas de las poblaciones (Mardia *et al.*, 1995; Dallas, 2000).

En años recientes la aplicación de estadística multivariada ha sido la herramienta adecuada para el proceso e interpretación de mediciones físicas y químicas, además de que se utiliza para caracterizar y evaluar la calidad del agua de los ríos, como el análisis de conglomerados (AC) que se emplea efectivamente para la clasificación de los datos de calidad de agua y detectar similitudes entre muestras o variables en muchos estudios de investigación (Chandra *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2012).

ANTECEDENTES

Existen distintas clasificaciones propuestas para las corrientes y zonas ribereñas con diversos enfoques, a continuación se bosqueja una cronología de tipologías y clasificaciones de corrientes y canales riparios:

En 1875, John Wesley Powell realizó el estudio “*Exploration of the Colorado River of the West and Its Tributaries*”, en el cual detalla el origen geológico y la formación del río Colorado y describe la primera delimitación amplia de los tipos de canales. Posteriormente en 1914 G. K. Gilbert continúa con el trabajo de Powell acerca de la delimitación de canales (Hunt, 1969), y en 1977 reconoce que existen diferencias en la capacidad de transporte de sedimentos entre los canales aluviales y rocosos (Naiman *et al.*, 2005).

Davis y Barmuta publican “*An ecologicall useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers*” donde proponen una clasificación de ríos en función del tipo del sustrato en relación con la velocidad y la profundidad. Obtienen como resultados cinco categorías las cuales identifican patrones espaciales en el régimen de corriente asociados con el sustrato del río. Los patrones espaciales no fueron identificados, sin embargo, se pueden predecir cambios en el patrón espacial como resultado de los cambios en las descargas del río (Davis & Barmuta, 1989).

Robert E. Horton (1945), introduce el concepto de orden de las corrientes en su trabajo “*Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology*”, la idea principal de este trabajo fue que la composición de los sistemas de corrientes de una cuenca pueden ser expresados en términos cuantitativos de orden de corriente, densidad de drenaje, radio de bifurcación y la relación flujo–longitud (Horton, 1945).



Leopold & Wolman en 1957 publican “*River Channel Patterns: braided, meandering, and straight*” donde establecen la diferenciación entre los patrones rectilíneo, meandro y trenzado de los ríos los cuales están en función de la pendiente y de las descargas de agua (Leopold & Wolman, 1957).

Illies & Botosaneanu en 1963 publican “*Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation ecologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique*” en el cual proponen una zonificación en tramos definidos dentro de los ríos en los que las unidades de paisaje determinan la composición de las comunidades de invertebrados bentónicos (Bernal *et al.*, 2006; Statzner & Higl, 1986).

En 1977 Stanley A. Schumm publica “*The Fluvial System*” en el cual establece una clasificación de los canales de acuerdo con la forma de transporte de sedimentos. Resalta las zonas 1, 2 y 3 (Geological Journal, 1978; Naiman *et al.*, 2005).

En 1980 Vannote y colaboradores publican “*The River Continuum Concept*” en el cual proponen el concepto del río como un continuo, es un modelo que describe el gradiente continuo de las condiciones físicas y químicas de un sistema de ríos, el cual, provoca una serie de respuestas dentro de las poblaciones, es decir, la fauna utiliza la energía del sistema en función de las entradas al mismo. Por lo tanto, el sistema biológico se desplaza hacia un equilibrio entre la tendencia de uso eficiente de entradas de energía a través de la repartición de recursos (comida, sustrato, etc.) y una tendencia opuesta para una velocidad uniforme de procesamiento de energía durante todo el año (Vannote *et al.*, 1980).

En 1986 Frissell y colaboradores en el trabajo “*A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context*” en el cual desarrollan una jerarquía de escalas espaciales que reflejan las diferencias en los procesos y controles de la morfología de los canales, reconociendo también que los procesos a escalas grandes son fundamentales para la clasificación de los hábitats de los ríos (Frissell *et al.*, 1986).

Amoros & Roux en 1988 realizan un análisis de la conectividad hidrológica (Naiman *et al.*, 2005), en su publicación “*Interaction between water bodies within the floodplain of large rivers: function and development of connectivity*” en el cual se resalta la existencia de la conectividad entre el curso de un río y los diversos cuerpos de agua extendidos en la llanura aluvial (Amoros & Bornette, 2002).

“*A classification of natural rivers*” (1994) David L. Rosgen reconoce casi 50 tipos de canales basados en distintos patrones (Naiman *et al.*, 2005), es un sistema de clasificación para los ríos naturales en los que una disposición morfológica de las características de la corriente se divide en tipos de flujo relativamente homogéneos. Se describen siete categorías principales de tipo de corriente que difieren en afianzamiento, relación entre anchura y profundidad, sinuosidad, pendiente y tamaño del material del lecho (Rosgen, 1994).

En “*Linking riparian vegetation types and fluvial geomorphology along the Sabie River within the Kruger National Park, South Africa*” (1997), Van Coller y colaboradores utilizan técnicas estadísticas



para relacionar los tipos de comunidades vegetales riparias con las características geomorfológicas del río, distinguiendo cuatro tipos de vegetación establecidas a lo largo del continuo geomorfológico basada en 12 unidades morfológicas fluviales las cuales se distinguen debido a la anchura de la zona inundable, la acumulación de sedimentos al lado del canal, barras estabilizadas en zonas aluviales anastomosadas.

“*Process Domains and the River Continuum*” propone una alternativa al Concepto del Continuo en la cual considera que los procesos geomorfológicos considerando como unidad la cuenca, ya que en sentido amplio, el proceso de Concepto de Influencia de Procesos es una hipótesis de escala múltiple de la variabilidad espacial en el proceso geomorfológico que gobierna los patrones temporales de las perturbaciones que influyen en la estructura y dinámica de los ecosistemas acuáticos y ribereños (Montgomery, 1999).

John Levin (2001) realizó una clasificación geomorfológica de los sistemas aluviales en 4 grupos correspondientes a niveles espaciales que poseen distintas tipologías en “*Alluvial Systematics*” (Levin, 2011; Naiman *et al.*, 2005).

En “*Geomorphic thresholds in riverine landscapes*” Michael Church (2002) clasificó y delimitó los paisajes y hábitats fluviales con base en el régimen del flujo, la cantidad y calibre de los sedimentos, y el entorno topográfico mediante un método de clasificación del canal del río y de los bancos de estabilidad en función del criterio de Shields el cual relaciona el tamaño de los clastos del sedimento transportado con la corriente y la morfología del canal estableciendo cinco categorías que reflejan distintas características del paisaje ribereño (Church, 2002).

Allan & Castillo (2007) mencionan una clasificación de la química de las aguas de río propuesta por Gibbs en 1970 y posteriormente por Payne en 1986, en esta clasificación Gibbs argumenta que las aguas se pueden clasificar dependiendo de las concentraciones de iones y cationes en relación con los sólidos totales disueltos y que los principales mecanismos que permiten la formación de grupos de aguas de los ríos son tres: i) precipitación atmosférica; ii) disolución de rocas; y iii) evaporación.

Los cuales considera como los principales mecanismos que afectan los iones disueltos de las aguas superficiales del mundo. Otros factores tales como el relieve, la vegetación, la composición de las rocas y los suelos pueden explicar las diferencias entre los grupos obtenidos con esta clasificación. Sin embargo este trabajo fue muy cuestionado debido a que la interpretación puede ser muy subjetiva debido a la ubicación del río evaluado en la gráfica de “*boomerang*” que Gibbs propuso (figura 7), los argumentos en contra del trabajo de Gibbs minimizaban el rol de la evaporación y la precipitación y sugerían que la geología local de la cuenca es el factor primario que determina la química del agua de los ríos muy por encima de los mecanismos que Gibbs proponía; a pesar de ello la mayoría de los ríos del mundo se pueden ubicar en la mitad del diagrama más que en los extremos (Allan & Castillo, 2007), el comportamiento que Gibbs graficó sugiere, de cualquier modo, diferencias entre las composiciones iónicas de las aguas superficiales, las cuales están dominadas por los iones de calcio y los bicarbonatos.

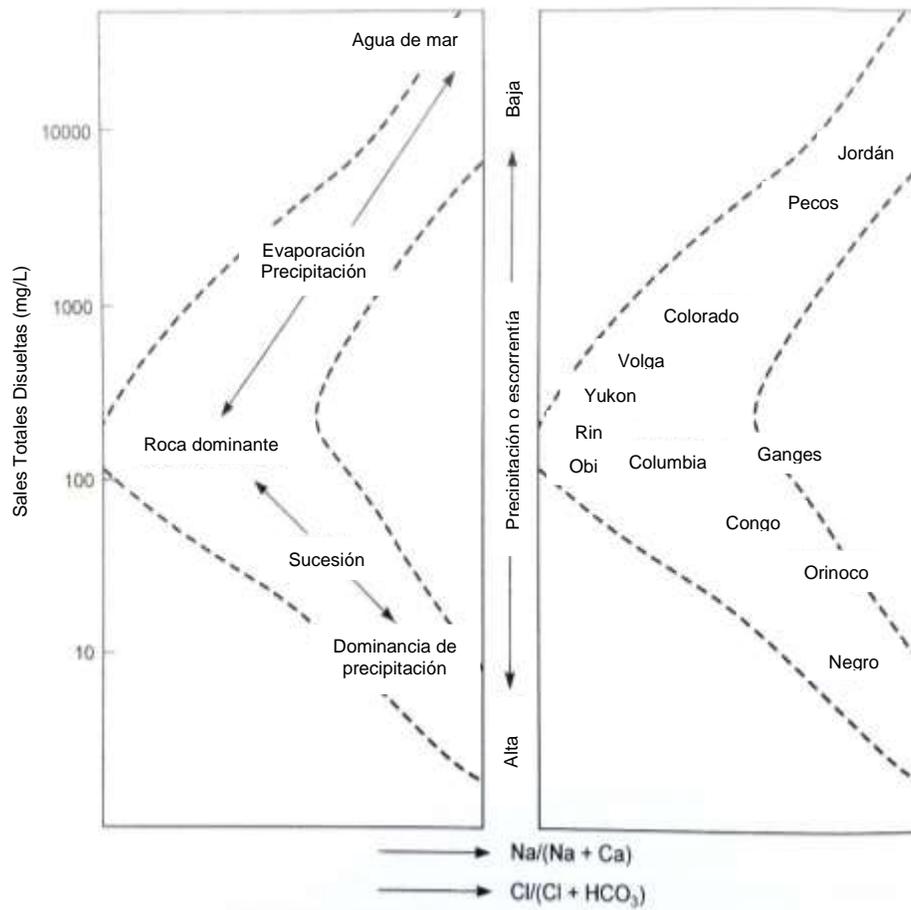


Figura 7. Clasificación de aguas superficiales de río basada en las proporciones de sodio, calcio, cloro y bicarbonatos en relación con los sólidos totales disueltos (Modificado de Gibbs 1970 y Payne 1986, tomado de Allan & Castillo, 2007).

Rodríguez & Morales (2014) realizan una compilación de investigaciones acerca del río Atoyac, donde se toman en cuenta aspectos socio – económicos y su relación con la calidad del agua del río Atoyac. De particular interés es el trabajo *Impacto de la contaminación de los cuerpos de agua en el medio ambiente, en la población y en las actividades económicas en el escurrimiento de la presa Valsequillo* el cual se centra en explorar la problemática ambiental del municipio de Tepetitla de Lardizabal, Tlaxcala debido a la contaminación del río Atoyac en principio explicado por las descargas al río de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento. Sin embargo, en el trabajo de campo realizado en la región se determinó que la contaminación se explica por las descargas residuales de los pueblos e industrias que se ubican aguas arriba de la comunidad. Es así que se concluyó que la problemática de Tepetitla, en lo que se refiere a dinámica ambiental, económica y social, es similar a la de la región en que se encuentra inmersa y resulta difícil separar la problemática del municipio de la regional (Rodríguez *et al.* 2014). Lo anterior sugiere que San Martín Texmelucan Labastida y las



localidades subcuenca arriba son un importante contribuyente de la contaminación del río Atoyac ya que en la región de Tepetitla de Lardízabal que se encuentra cuenca abajo, las aguas que llegan al lugar ya se encuentran en un estado de contaminación importante y por ende la problemática debe abordarse de manera regional (subcuenca) y no local. Lo anterior es bastante alarmante tomando en cuenta que estos escurrimientos provienen principalmente del volcán Iztaccíhuatl, siendo éste un área natural protegida.

En la zona de estudio existen investigaciones acerca de aguas subterráneas: *Calidad iónica del agua en relación a la nutrición del gladiolo y patógenos del cormo* (González, 2006); *Monitoreo de la concentración de nitrato en el acuífero del valle de Puebla* (Brenes et al., 2011); *Cambios en los procesos de irrigación en las zonas de recarga y descarga de agua subterránea: subcuenca San Martín Texmelucan, Puebla, siglo XX* (Galicia, 2013); *Estudio hidrogeológico de la subcuenca hidrográfica Atoyac–San Martín Texmelucan, Puebla*, (Vázquez, 2012). Así como estudios sociológicos de conflictos por el agua: *Las disputas por el agua en el Valle de Texmelucan, Puebla, México a fines del siglo XVII* (Davidson, 2007), no obstante no existe información disponible en lo referente a las aguas superficiales y los ambientes ribereños dentro del contexto de subcuenca.

Es importante destacar que en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza se ha realizado una amplia investigación sobre los sistemas ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl a cargo de la M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández y el Dr. Gerardo Cruz Flores que ha derivado en la realización de varios trabajos de investigación integrada sobre ecosistemas ribereños, entre ellos se encuentran trabajos de tesis sobre diferentes problemáticas, entre los que se encuentran diagnóstico, variabilidad y evaluación de características físicas, químicas y biológicas de agua, suelo y vegetación en ambientes ribereños de montaña en las vertientes occidental y oriental de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, esto desde 2009 incluyendo el desarrollo del proyecto PAPIME PE206413 “*Elementos didácticos y uso de las TIC’s en el estudio de ecosistemas ribereños de montaña*” realizado durante los años 2013, 2014 y 2015.

La SEMARNAT y la CONAGUA realizan un estudio en los ríos Atoyac y Zahuapan (CONAGUA, 2008) de acuerdo con lo establecido en el artículo 87 de la Ley de Aguas Nacionales en materia de declaratorias de clasificación de cuerpos de agua donde establece la capacidad de asimilación y dilución, las metas de calidad del agua y los plazos para alcanzarlas en un cuerpo de agua específico. Donde la *autoridad* determinó los parámetros que deberán cumplir las descargas y se señala que no existe una norma que evalúe el color de las descargas de la industria. Clasificaron los ríos en seis zonas, de las cuales el río Cotzala (ubicado en la subcuenca San Martín Texmelucan) se encuentra en la zona II con descargas municipales principalmente. Posteriormente se expide la declaratoria el miércoles 6 de julio de 2011 en el Diario Oficial (CONAGUA, 2011), en la cual se señalan seis zonas de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan donde se establecen los plazos a cumplir en cuanto a descargas y calidad del agua de los ríos mencionados y sus afluentes.



PROBLEMA

Uno de los problemas más graves del deterioro ambiental es la contaminación del agua porque la disminución de su calidad daña a los ecosistemas, la salud humana y la disponibilidad de fuentes de agua. La información disponible al respecto es reducida, por lo que es necesario realizar investigaciones sobre la capacidad de recuperación de zonas afectadas (CONANP, 2013; SEMARNAT-CONAGUA, 2014). La Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, que sirve para conocer la situación de la calidad de las aguas nacionales se ha incrementado, sin embargo aún resulta insuficiente para monitorear los recursos hídricos del país y no contempla todos los parámetros que afectan la salud (SEMARNAT-CONAGUA, 2014).

En el PNIP se han desarrollado proyectos para mejorar los servicios ambientales que este brinda, no obstante no se han determinado criterios de conservación o recuperación de cuerpos de agua. Por su parte, el gobierno federal establece en el Programa Nacional Hídrico 2014 – 2018 que incrementará el número de declaratorias de clasificación de cuerpos de aguas nacionales, así como de estudios de calidad del agua, para determinar la capacidad de autodepuración de los cuerpos de agua y los límites máximos permisibles de contaminantes y establecer las metas de calidad que debe tener cada cuerpo de agua, así como el uso al que se destinará (CONANP, 2013; SEMARNAT-CONAGUA, 2014), sin embargo este programa no indica los procesos a seguir ni las instituciones que estarán implicadas en la realización de dichas acciones.



JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS

La calidad del agua de los ambientes ribereños refleja el estado de los mismos, una clasificación basada en las similitudes físicas y químicas del agua para los diferentes sitios corroborará la influencia de las actividades económicas que se llevan cabo en la zona. De tal manera que este análisis permitirá definir modelos de clasificación que facilitarán la visualización de escenarios útiles para la toma de decisiones en pro de la conservación, gestión o restauración de los ambientes ribereños de la zona.

Por otra parte si se analizan los grupos formados e interacciones entre los parámetros físicos y químicos se podrán identificar las posibles causas y factores que influyen en los sistemas ribereños. Esto permitirá proponer para la Subcuenca San Martín Texmelucan un modelo de clasificación de recursos hídricos con base en las características físicas y químicas del agua y en función de los usos del suelo.

Si bien este no es un trabajo experimental, se propone a manera de hipótesis el siguiente planteamiento:

La calidad de ríos y arroyos refleja el estado de los ecosistemas ribereños, si se agrupan los sitios de estudio con base en las similitudes que presentan en el comportamiento físico y químico del agua, la clasificación obtenida en función de la calidad del agua, deberá coincidir con los usos de suelo que se presentan en torno a los sistemas ribereños.

OBJETIVOS

General.

Clasificar las corrientes superficiales de diferentes ambientes ribereños en función de sus propiedades físicas y químicas, así como el uso de suelo de cada sitio.

Particulares.

- I. Evaluar las características físicas y químicas del agua para determinar su calidad.
- II. Describir las condiciones ecológicas de los sitios de muestreo para identificar la influencia que ejercen en el ambiente ribereño.
- III. Analizar las relaciones que existen entre los parámetros físicos y químicos para determinar la dinámica del sistema.
- IV. Generar criterios de clasificación para analizar si existen diferencias entre grupos basándose en métodos estadísticos.
- V. Generar un mapa con la clasificación obtenida para dimensionar el fenómeno.



ZONA DE ESTUDIO.

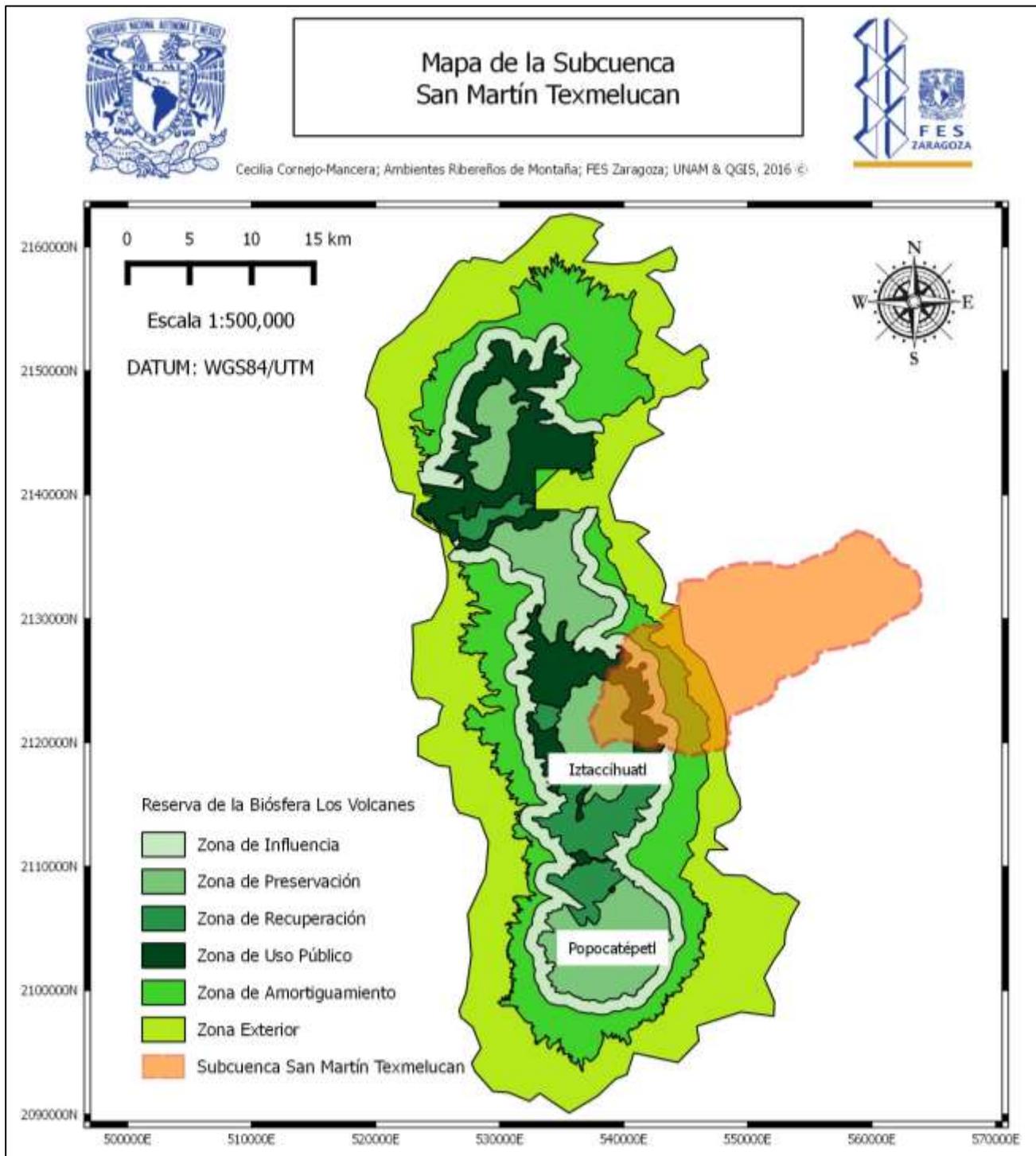


Figura 8. Localización de la subcuenca San Martín Texmelucan, converge con cuatro zonas del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y dos zonas de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes.



La subcuenca San Martín Texmelucan (CONABIO, 1998a) está ubicada dentro de la cuenca Atoyac – San Martín Texmelucan en las coordenadas extremas 19° 9' 37.7920" y 19° 18' 10.0043" Latitud Norte, y 98° 38' 31.6585" y 98° 24' 1.0036" Longitud Oeste (figura 8).

Se ubica dentro de la zona territorial de los municipios de San Martín Texmelucan, Chiautzingo, San Felipe Teotlalcingo, San Salvador El Verde, Santa Rita Tlahuapan, Huejotzingo (en Puebla), y Tepetitla de Lardizábal (en Tlaxcala), es abastecida por el deshielo de los glaciares y manantiales del volcán Iztaccíhuatl y la precipitación pluvial.

La subcuenca pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las cuencas más importantes del estado, y que tiene su nacimiento cerca de los límites del estado de México y Puebla en la vertiente oriente de la Sierra Nevada. Por su ubicación la subcuenca San Martín Texmelucan pertenece a la parte occidental de la cuenca alta del Atoyac. Los Ríos que la atraviesan, generalmente de oeste a este, provienen de la Sierra Nevada y son tributarios del Atoyac; en tanto que los ventisqueros del Iztaccíhuatl pueden almacenar agua y alimentar los poblados y terrenos de sus faldas en la época de sequía; las rocas y suelos dejan infiltrar el agua hasta grandes profundidades, por lo que al pie de los volcanes puede obtenerse agua de pozos durante todo el año (INAFED, 2010).

La caracterización de otros aspectos ecológicos se realizó según lo establecido por INEGI (1984):

Clima: templado subhúmedo, semifrío subhúmedo y Polar de Alta montaña.

Suelos: litosol, regosol dístico, andosol húmico, regosol éutrico, cambisol húmico, fluvisol éutrico, regosol éutrico, phaeozem háplico y cambisol éutrico.

Geología: roca ígnea extrusiva de tipo Andesita perteneciente al Cenozoico, roca ígnea extrusiva de tipo Toba intermedia perteneciente al Cenozoico y roca ígnea extrusiva de tipo Brecha volcánica básica perteneciente al Cenozoico (INEGI, 2014). Las andesitas y riolitas de edad Cuaternaria de esta zona descansan discordantemente sobre rocas volcánicas del Terciario y sobre calizas y lutitas del Mesozoico (Rodríguez & Morales, 2010).

Las zonas más elevadas del Iztaccíhuatl están cubiertas de nieve que tiende a desaparecer en los próximos 10 años y a su alrededor presenta praderas de alta montaña; las faldas inferiores de la Sierra Nevada están dedicadas en su mayoría a la agricultura de temporal. Al oriente presenta zonas de agricultura de riego, que forma parte de la gran zona de regadío que circunda San Martín Texmelucan y la más grande de valle de Puebla.

Vegetación: pradera de alta montaña, bosque de pino, bosque de oyamel, vegetación secundaria de bosque de pino-encino, bosque de pino-encino, agricultura de temporal anual y permanente y agricultura de riego anual y semipermanente.



Existe una vegetación secundaria, originada por la destrucción de la primaria, está compuesta de bosques de pinos, encinos, semiárido (pino oaxaqueño, pino cembroides y encinos desiduos), combinada con terrenos de agricultura de riego y temporal, dedicados al cultivo de maíz, frutas y legumbres regionales.

La fauna está representada por: *Romerolagus diazi* (zacatuche o teporingo), *Sorex vagrans* (musaraña oscura), *Taxidea taxus* (tejón o tlacoyote), *Dipodomys phillips* (rata canguro), *Lynx rufus escuinapae* (lince o gato montés), *Sceloporus grammicus* (lagartija escamosa de mezquite), *Pithuophis deppei* (culebra sorda mexicana), *Thamnophis scalaris* (culebra listonada de montaña), *Thamnophis eques* (culebra listonada), *Crotalus ravus* (cascabel pigmea mexicana), *Eumeces copei* (eslaboncillo), *Pseudoeurycea leprosa* (tlaconete leproso), *Pseudoeurycea cephalica* (tlaconete regordete), *Chiropterotriton chiropterus* (salamandra de pie plano), *Ambistoma altamirani* (ajolote), *Hyla plicata* (rana plegada), *Hyla lafrentzi* (la ranita), *Sitta pygmaea* (sita enana), *Poecile sclateri* (carbonero mexicano), *Melanerpes formicivorus* (carpintero bellotero), *Aphelocoma ultramarina* (chara pecho gris neovolcánica), *Tachycineta thalassina* (golondrina verdemar), *Buteo jamaicensis formosus* (aguililla cola roja), *Dendrortyx macroura* (codorniz coluda), *Streptoprocne semicollaris* (vencejo nuca blanca), *Ridgwayia pinicola* (mirlo pinto), *Xenospiza baileyi* (gorrión serrano), *Hylocharis leucotis* (zafiro oreja blanca), *Molothrus bonariensis* (Tordo común), *Melospiza fusca* (toquí pardo/ rascador viejita), *Quiscalus mexicanus* (zanate mexicano), *Spinus psaltria* (jilguerito dominico), *Pyrocephalus rubinus* (mosquero cardenal), *Cyanicitta stelleri* (chara crestada), *Toxostoma ocellatum* (cuitlacoche moteado), *Passer domesticus* (gorrión doméstico), *Falco sparverius* (cernícalo americano). Aves migratorias como *Ardea alba* (garza blanca), *Ardea herodias* (garza morena), *Danaus plexippus* (mariposa monarca), Orden *Orthoptera* (grillos, chapulines y parientes), *Juniperus monticola* (género *Juniperus*), *Eryngium carlinae* (cabezona).

MÉTODO.

Trabajo de gabinete.

Aunque existen abundantes estudios del PNIP y de sus zonas de influencia, existen escasas investigaciones sobre los recursos hídricos a nivel de subcuenca de San Martín Texmelucan. Debido a ello se seleccionó esta subcuenca hidrográfica, la cual fue propuesta por la Secretaría de Recursos Hidráulicos de México en su boletín hidrológico de 1970 (CONABIO, 1998a). CONABIO fue la encargada de digitalizar esta información de referencia y ponerla a disposición del público en general, misma que en este caso se utilizó para la delimitación de la zona de estudio.



Se utilizó la subcuenca de San Martín Texmelucan (CONABIO, 1998b), modificada por Soria (*sin publicar*) y con ayuda de la Red Hidrográfica 1:1, 000, 000, las curvas de nivel del INEGI 1:50, 000 (todos los anteriores en formato shape) y ortofotografías, utilizando el software QGIS 2.2.0-Valmiera (QGIS, 2013) de uso libre se procesó toda la geoinformación. Por medio de fotografías aéreas de los años 1993, 1999 y 2003, y de la red hidrográfica se seleccionaron los sitios de muestreo en función de diferentes usos de suelo, altitudes y accesibilidad. Se ubicaron 20 sitios de muestreo, se realizó la caracterización general.

Trabajo de campo.

La colecta de muestras se llevó a cabo mensualmente de septiembre de 2013 a noviembre de 2014, se determinaron 20 sitios de muestreo con base en la Red Hidrográfica, mapas topográficos y ortofotografías del INEGI, la accesibilidad y los diferentes usos de suelo y grados de conservación basada en la presencia o ausencia de actividades antrópicas. Una vez en los sitios de muestreo, se georeferenciaron con un GPS (Garmin 62SCX) con datum WGS83 y coordenadas UTM, y se realizó la caracterización ecológica de cada uno de ellos recabando los siguientes datos: altitud, uso de suelo, vegetación predominante y actividades realizadas alrededor del sitio.

La toma de muestras se realizó de forma manual en botellas de vidrio de 50 mL para las determinaciones de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, y en botellas de polietileno de 1L y 600 mL, las cuales fueron preservadas conforme a los requerimientos de los parámetros a analizar según lo establecido en el APHA, AWWA and WPCF (1992) y conservadas a 4°C durante su traslado al laboratorio. Los parámetros analizados *in situ* y laboratorio se señalan en la figura 9.

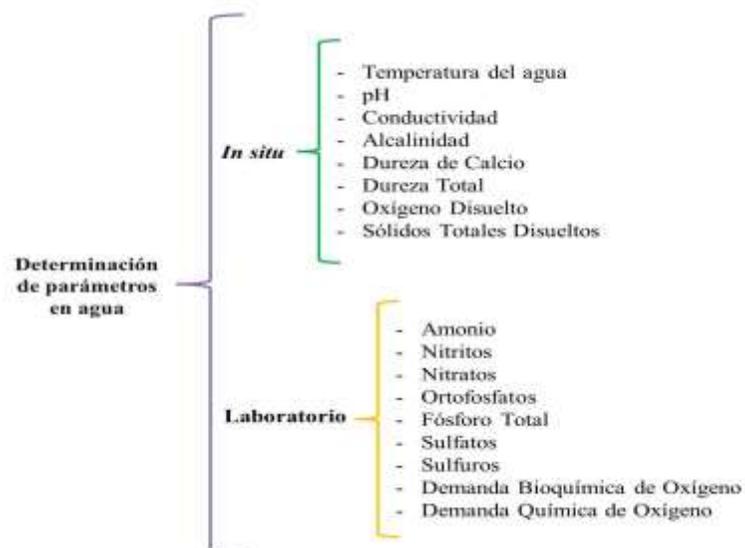


Figura 9. Parámetros *in situ* y en *laboratorio*.



Las pruebas analíticas (cuadros 2 y 3) se realizaron según lo establecido en APHA, AWWA and WPCF (1992) y, según sea el caso, en las NMX para el análisis de aguas; las determinaciones se realizaron con la adaptación a la microescala según lo establecido por Blancas *et al.* (2011) y Guerra & Cruz (2014).

Cuadro 2. Parámetros *in situ*.

| Parámetro | Abreviatura | Unidades | Método |
|---------------------------|------------------|-------------------------|---|
| Alcalinidad | Alc | mg CaCO ₃ /L | Complejométrico |
| Dureza de Calcio | D-Ca | mg CaCO ₃ /L | Complejométrico |
| Dureza Total | D-Tot | mg CaCO ₃ /L | Complejométrico |
| Oxígeno Disuelto | O ₂ D | mg/L | Instrumental Winkler (modificación Azida de Sodio) |
| Temperatura del agua | TEMP | °C | Termómetro analógico |
| Conductividad Eléctrica | CE | μ/cm | Instrumental |
| pH | pH | Unidades de pH | Instrumental |
| Sólidos Totales Disueltos | STD | mg/L | Instrumental |

Los niveles de oxígeno disuelto se evaluaron instrumentalmente con oxímetro YSI MOD 55-25 FT. Los STD, el pH y la conductividad eléctrica se evaluaron con un combo HANNA MOD HI 98129.

| Alcalinidad | Complejométrico |
|---|---|
| Este método se fundamenta en la detección de las bases predominantes (carbonatos y bicarbonatos) en el agua por medio de una titulación de la muestra utilizando dos indicadores ácido-base y como disolución valorante ácido sulfúrico (1 ml H ₂ SO ₄ 0.02N = 1 mg CaCO ₃). Se realizó en dos etapas: 1) alcalinidad a la fenoftaleína y 2) alcalinidad total. En la primera se valoraron los carbonatos usando fenoftaleína como indicador, posteriormente se valoraron todos los bicarbonatos usando como indicador el anaranjado de metilo (Blancas <i>et al.</i> , 2011; Guerra & Cruz, 2014, NMX-AA-036-SCFI-2001). |  |

| Temperatura del agua | Termómetro análogo |
|--|---|
| Se refiere al grado de calor o energía térmica referido a un cierto cuerpo y es un factor determinante tanto para la vida acuática como en la interacción de algunos elementos. Se realizó la medición directamente en el cuerpo de agua con termómetro análogo de inmersión parcial y se reportó en grados Celsius (°C) de acuerdo a lo establecido en la NMX-AA-007-SCFI-2011. |  |



| Oxígeno Disuelto | Oxímetro (YSI modelo 55) |
|---|---|
| <p>En el método electrométrico los electrodos de membrana sensible al oxígeno, ya sean galvánicos o polarizados están constituidos por dos electrodos de metal en contacto con un electrolito soporte, separado de la disolución de muestra por medio de una membrana selectiva. En el cátodo, que usualmente es oro o platino, ocurre la reducción del oxígeno mientras que en el ánodo ocurre la oxidación del metal (plata o plomo), (NMX-AA-012-SCFI-2001). El método Winkler (modificación Azida de Sodio) se describe en el apartado DBO₅ en la página 46.</p> |  |

| Dureza Total | Complejométrico |
|---|--|
| <p>El método se basa en la formación de complejos estables de EDTA (sal disódica del ácido etilediamintetracético) con los iones calcio y magnesio (Ca²⁺-EDTA y Mg²⁺-EDTA). La muestra se lleva a pH 10, con disolución buffer de amonio, para favorecer la formación de un complejo color rojo vino con los iones calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺). El eriocromo negro T será posteriormente desplazado por el EDTA y se formará un nuevo complejo (Ca²⁺-EDTA y Mg²⁺-EDTA) de color azul. (Blancas <i>et al.</i>, 2011; Guerra & Cruz, 2014; NMX-AA-072-SCFI-2001).</p> |  |

| Dureza de Calcio | Complejométrico |
|--|---|
| <p>La determinación de este parámetro se realizó utilizando indicador Calcón, que en presencia de calcio forma un complejo estable de color rojizo o rosa, observándose que al agregar EDTA en medio básico (pH 12 a 13) el calcio se disocia de su complejo y se formar un nuevo complejo (Calcón-EDTA) de color azul intenso (Blancas <i>et al.</i>, 2011; Guerra & Cruz, 2014).</p> |  |



| Sólidos Totales Disueltos | Instrumental (multiparámetro HANNA MOD HI 98129) |
|---|---|
| Son los sólidos constituidos por los sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión, los cuales no son retenidos en el elemento filtrante, el fundamento de (NMX-034-SCFI-2001). |  |
| Conductividad Eléctrica | |
| Este método se basa en la propiedad que adquiere al agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. Mediante la disociación electrolítica, cuando se disuelve un ácido, una base o una sal, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos. Los iones se mueven independientemente y se dirigen a los electrodos de carga opuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico. La cantidad de moléculas que se han disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones obedecen la Ley de Ohm, por lo tanto si en una solución electrolítica se colocan dos electrodos separados por una distancia y se aplica un campo eléctrico, la diferencia de potencial entre los electrodos será proporcional a la distancia y al campo eléctrico. (NMX-AA-093-SCFI-2000). | |
| pH | |
| Se basa en la medición de la fuerza motriz de celda electroquímica, que consta de la muestra, un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia; el electrodo de referencia presenta un potencial constante y el otro es un electrodo indicador que asume un potencial dependiente de la actividad iónica de la solución; definiéndose el potencial electrodo como la diferencia en potencial entre el electrodo y la solución en la cual está inmerso, para ello se calibró el dispositivo con al menos dos disoluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10. Es importante tener en cuenta que el $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$, por lo tanto las variaciones en pH son cambios en la concentración de iones hidronio pero en escala logarítmica. (Blancas <i>et al.</i> , 2011; Guerra & Cruz, 2014; NMX-AA-008-SCFI-2011). | |

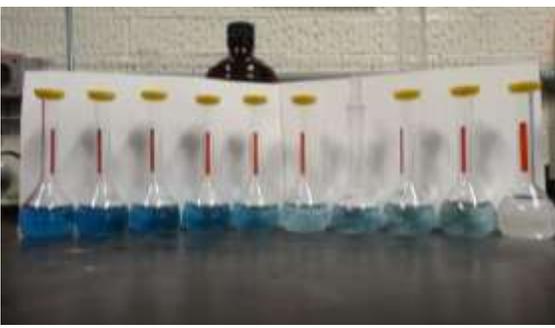
Trabajo de laboratorio.

Cuadro 3. Pruebas analíticas realizadas en laboratorio.

| Parámetro | Abreviatura | Unidades | Método |
|--|--------------------|----------|------------------------------------|
| Amonio | NH_4^+ | mg/L | Azul de indofenol |
| Nitritos | NO_2^- | mg/L | Método del ácido sulfanílico |
| Nitratos | NO_3^- | mg/L | Método colorimétrico |
| Ortofosfatos | PO_4^{3-} | mg/L | Método del fosfomolibdato |
| Fósforo Total | PT | mg/L | Método de digestión con persulfato |
| Sulfuros | S^{2-} | mg/L | Yodométrico |
| Sulfatos | SO_4^{2-} | mg/L | Turbidimétrico |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días) | DBO_5 | mg/L | Winkler (Azida de sodio) |
| Demanda Química de Oxígeno | DQO | mg/L | Colorimétrico de reflujo cerrado |



| Fósforo Total | <i>Método de digestión con persulfato</i> |
|---|--|
| <p>El principio del método consiste en que las diferentes formas de fósforo (principalmente orgánicas) son hidrolizadas a fosfatos por tratamiento con ácido, calentamiento y presión reduciendo el tiempo del proceso. Después de haber obtenido los fosfatos, el análisis se realiza por el método del fosfomolibdato (Guerra & Cruz, 2014; Blancas <i>et al.</i>, 2011; NMX-AA-029-SCFI-2001).</p> |  |

| Ortofosfatos | <i>Método del fosfomolibdato</i> |
|--|---|
| <p>Este método determina las especies iónicas de ortofosfatos solubles en la muestra de agua provenientes de la ionización del ácido ortofosfórico, al reaccionar con el ácido molibdico para formar el ácido 12-molibdofosfórico que es reducido por el cloruro de estaño, presentándose la coloración azul de molbdeno que se incrementa en forma proporcional a la cantidad de iones ortofosfatos presentes ya que este método es específico. La intensidad del color azul puede medirse por colorimetría, calculando la concentración de las muestras en comparación con una curva patrón de soluciones de concentración conocida (Guerra & Cruz, 2014).</p> |  |

| Amonio | <i>Azul de indofenol</i> |
|---|--|
| <p>Esta técnica no requiere destilación, y se basa en la reacción entre el amonio, el fenol y el hipoclorito en condiciones alcalinas, para formar un indofenol de color azul, utilizando sulfato manganoso como catalizador. El color desarrollado es proporcional a la concentración de amonio en la muestra, y se mide en espectrofotómetro visible, lo anterior se llevó a cabo a microescala según lo establecido por Blancas <i>et al.</i>, 2011 y Guerra & Cruz, 2014.</p> |  |



| Nitritos | <i>Método del ácido sulfanílico</i> |
|---|--|
| <p>El método se basa en la formación de una sal de diazonio formada por la reacción de Griess, en la cual, los nitritos requieren un pH ácido (2–2.5) para que el ácido sulfanílico reaccione con el clorhidrato de alfa-naftilamina. Mediante copulación, la sal de diazonio y el dihidrocloruro de N-(1-Naftil)-Etilendiamina, producen un color púrpura, cuya intensidad está en función de la cantidad de nitritos presentes en la muestra, los cuales se miden colorimétricamente en comparación con una curva patrón. Adaptación a microescala. (Blancas <i>et al.</i>, 2011; Guerra & Cruz, 2014; NMX-AA-154-SCFI-2011).</p> |  |

| Nitratos | <i>Método colorimétrico</i> |
|---|---|
| <p>Se requiere evaporar la muestra a sequedad para concentrar los nitratos y que estos reaccionen con el ácido fenoldisulfónico para formar un nitro-derivado, que en un medio alcalino produce un color amarillo, la intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de nitratos presentes en la muestra y se determinó por colorimetría en comparación con una curva patrón (Guerra & Cruz, 2014).</p> |  |

| Sulfuros | <i>Yodométrico</i> |
|---|--|
| <p>Se determinaron sulfuros totales; el principio del método se basa en la reacción del yodo con el sulfuro en solución ácida, oxidándolo hasta azufre. Las muestras se tomaron con un mínimo de aeración preservándolas a 4°C y con acetato de Zinc para eliminar las sustancias que provocan interferencias ya que son reductoras, tales como el yodo, sulfatos, tiosulfatos y varios compuestos orgánicos ya sean sólidos o disueltos (APHA, AWWA, WEF, 2012; NMX-AA-084-SCFI-1982). Las muestras que presentaron precipitación fueron filtradas para su evaluación.</p> |  |



| Sulfatos | Turbidimétrico |
|--|--|
| <p>El método se basa en la precipitación del ion sulfato con cloruro de bario, en un medio ácido, formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La concentración del ion sulfato se midió por comparación de la lectura con una curva de calibración analítica (APHA, AWWA, WEF, 2012; NMX-AA-074-SCFI-2014).</p> |  |

| DQO | Colorimétrico de reflujo cerrado |
|---|---|
| <p>Se basa en la oxidación de las muestras mediante digestión con los ácidos crómico y sulfúrico. La muestra sometida a reflujo en solución ácida fuerte con exceso conocido de $K_2Cr_2O_7$ en presencia de Ag_2SO_4, la plata actúa como catalizador para oxidar la materia orgánica más resistente. La cantidad de dicromato utilizada en la oxidación de la muestra se determinó midiendo la absorbancia del Cr^{3+} es una longitud de onda de 600 nm y se compara con una curva patrón preparada con concentraciones definidas de Ftalato de ácido de potasio (NMX-AA-030/2-SCFI-2011; Guerra & Cruz, 2014).</p> |  |

| DBO₅ | Winkler (Azida de sodio) |
|---|--|
| <p>El método depende de la formación de un precipitado de hidróxido manganoso que absorbe el oxígeno disuelto, formando óxido mangánico bajo condiciones alcalinas; en esta forma el ion manganoso es oxidado por el oxígeno molecular para formar dióxido manganoso, generando así un precipitado color café. En condiciones de anoxia, se puede presentar también la formación de un precipitado blanco, ya que el ion manganeso formará hidróxido manganoso. Una posterior acidificación en presencia de yoduro disuelve el precipitado color café y produce condiciones ácidas para la oxidación de yodo a yoduro por la acción del óxido manganeso; se libera yodo en cantidades equivalentes al oxígeno disuelto en la muestra. El yodo liberado se titula con tiosulfato de sodio de concentración conocida utilizando una solución de almidón como indicador para determinar el punto final del vire. Al agregar el almidón la muestra presenta un color azul y cuando todas las moléculas de I_2 han sido tituladas, la solución se vuelve incolora (APHA, AWWA, WPCF, 1992, Blancas <i>et al.</i>, 2011). En el caso de DBO₅ se debe determinar después de cinco minutos de haber tomado la muestra y posteriormente a los cinco días de tomada la muestra, se determina el oxígeno disuelto en ella. Para calcular la DBO₅ se resta la concentración final (cinco días después de colectada la muestra) de la concentración de O_2 que se registró <i>in situ</i>.</p> |  |



Tratamiento estadístico de datos

Con los datos obtenidos en campo y laboratorio se realizó el tratamiento estadístico mediante el software Statgraphics Centurion XV. Se realizó análisis de correlaciones múltiples (ACM) para identificar las relaciones existentes o ausentes entre los datos de las variables del agua. Esto facilitó la interpretación de la dinámica de los nutrientes en el sistema.

Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales (ACP), para reducir la dimensionalidad de los datos, identificando los componentes que explicaron en mayor porcentaje la variabilidad del sistema. Con el ACP se identificaron las variables que dominan la dinámica del sistema, y las que representan un papel con mayor relevancia de acuerdo al comportamiento del agua de los sitios muestreados. Se realizaron gráficas exploratorias de las relaciones de las variables obtenidas en el ACP y los usos de suelo determinados en las caracterizaciones ecológicas.

Una vez identificadas las variables más importantes de la física y química del agua en el sistema, se utilizaron estas variables para realizar el análisis de conglomerados o *clúster* (AC) con el cual se obtuvieron los grupos *a priori* de la clasificación. Este análisis toma los valores de las variables y reconoce semejanzas entre las observaciones (características del agua) y como resultado se obtuvo un dendrograma con la clasificación preliminar usando como código de identificación el nombre de los sitios de muestreo.

Los grupos obtenidos mediante AC se sometieron a comprobación mediante análisis discriminantes (AD), con el cual se obtuvieron funciones discriminantes basadas en las diferencias entre grupos. Se obtuvo la función que establece el modelo matemático que discriminó cada observación y comprobó los grupos *a priori* del AC. Con los resultados del AD se obtuvieron los porcentajes de clasificación correctos y con esto se comprobó la veracidad de los grupos preliminares.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sitios de muestreo.

Se evaluaron 20 sitios de muestreo (cuadro 4), para cada uno de los cuales se analizaron 18 parámetros en dos épocas, con un total de 39 muestras de agua.

Cuadro 4. Sitios de muestreo en la subcuenca.

| ID | Nombre | Altitud m s. n. m. | Longitud (UTM) | Latitud (UTM) | Uso de Suelo |
|----|--|-----------------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | Pilares | 4054 | 539758 | 2122505 | Forestal |
| 2 | Cocoyuco | 3745 | 541132 | 2124459 | Forestal |
| 3 | Rincón del Cocoyuco | 3729 | 541078 | 2124572 | Forestal Pecuario |
| 4 | El Corral | 3593 | 541502 | 2124858 | Forestal Pecuario |
| 5 | Atzompa | 3144 | 544378 | 2121745 | Forestal |
| 6 | Palo Obispo (manantial) | 2917 | 543379 | 2128047 | Forestal |
| 7 | Palo Obispo (Río) | 2897 | 543364 | 2128064 | Forestal |
| 8 | Río Cotzala (represa) | 2861 | 546640 | 2121293 | Forestal |
| 9 | Xoquititla | 2821 | 544287 | 2128212 | Forestal Ecoturístico |
| 10 | Pozo San Juan Tlale | 2746 | 546793 | 2125254 | Forestal |
| 11 | Atzomaco | 2744 | 544059 | 2129030 | Forestal |
| 12 | Río Cotzala (hidroeléctrica) | 2713 | 548297 | 2121794 | Agrícola |
| 13 | San Felipe Teotlalcingo 2 (arroyo) | 2388 | 553301 | 2127460 | Agrícola Urbano |
| 14 | San Felipe Teotlalcingo 1 (manantial) | 2386 | 553273 | 2127458 | Agrícola |
| 15 | San Felipe Teotlalcingo 3 (río) | 2380 | 553435 | 2127623 | Urbano |
| 16 | San Simón Atzitzintla | 2314 | 555817 | 2129943 | Agrícola Urbano |
| 17 | San Rafael Tlanalapan 3 | 2279 | 556617 | 2133356 | Urbano |
| 18 | San Rafael Tlanalapan 1 (manantial) | 2272 | 556297 | 2133853 | Urbano |
| 19 | San Rafael Tlanalapan 2 (arroyo) | 2272 | 556297 | 2133853 | Urbano |
| 20 | Distrito Atoyac- Zahuapan | 2235 | 561235 | 2132340 | Urbano |

Se obtuvo un mapa de la subcuenca de San Martín Texmelucan, donde están contemplados los 20 sitios de muestreo, los cuales abarcan las áreas territoriales de seis municipios (cinco del estado de Puebla y uno de Tlaxcala). *Palo Obispo Río* sólo fue muestreado en una ocasión debido a que según la carta



topográfica de Huejotzingo de INEGI éste es un río intermitente, por lo que en época seca no hay curso de agua en ese lugar. Los principales ríos que hay en la subcuenca son Atzomaco, Ayotla, Huilostoc, Huahuatlaco, Tenango, Tepeyac, Tepozantla, Texcalco, La Presa, Santa Elena, Santa Cruz, San José, San Francisco, Tehuapantla, Cotzala y Atoyac.

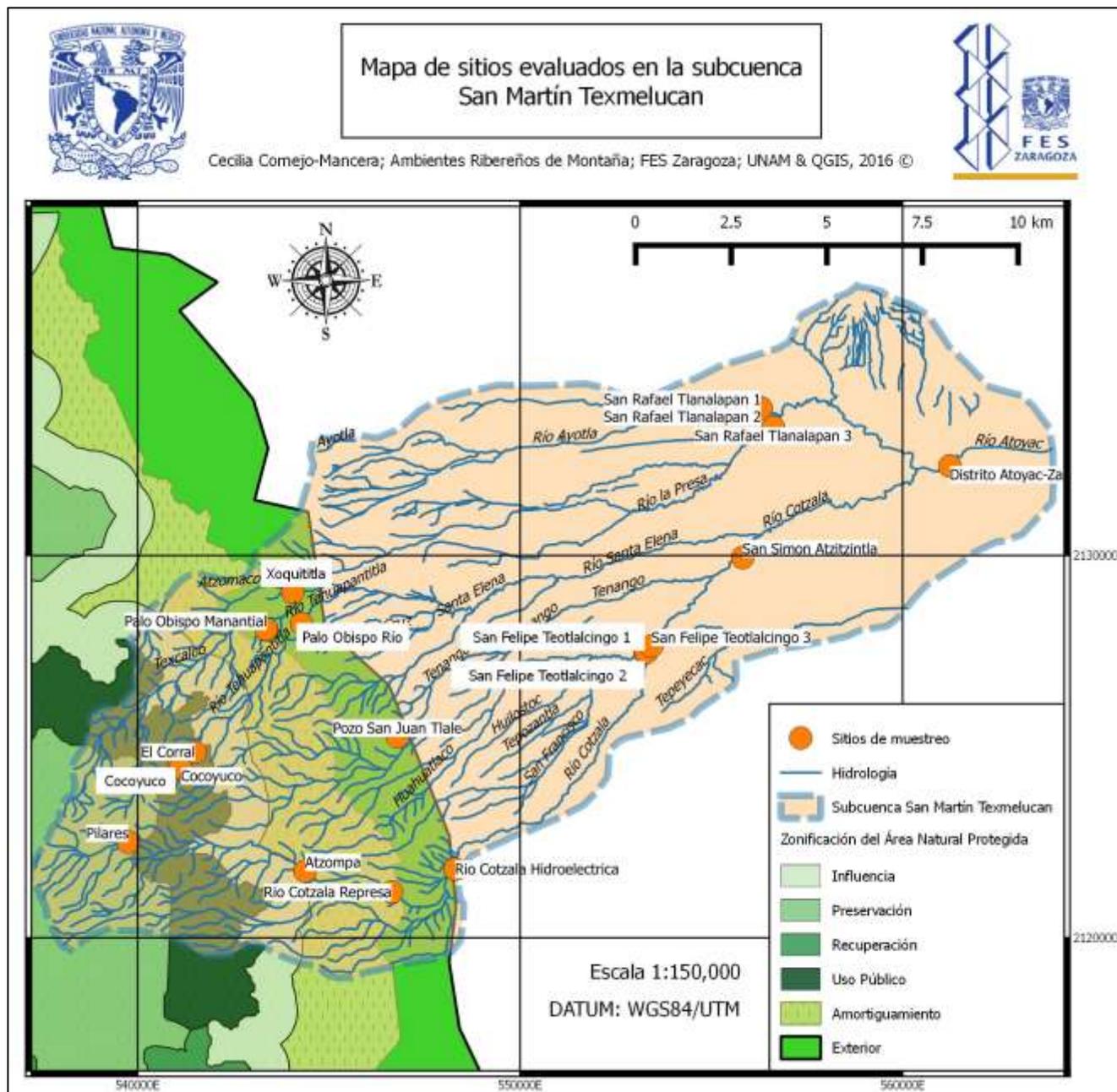


Figura 10. Ubicación de los sitios de muestreo en la subcuenca San Martín Texmelucan.



Descripciones ecológicas de los sitios de muestreo.

Descripciones ecológicas. En orden de altitud, de mayor a menor.

Descripciones realizadas por el equipo de Ambientes ribereños FES – Zaragoza.

1. Pilares.

Altitud: 4054 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 539758 W 2122505 N

Uso de suelo: Patizal Alpino.

Vegetación conformada por algunos ejemplares de *Pinus hartwegii*, presencia de *Juniperus monticola*, *Cirsium* sp. y pastizal alpino, siendo éste último el tipo de vegetación dominante del sitio.





2. Cocoyuco (manantial entubado).

Altitud: 3745 m s. n. m.

Coordenadas UTM: 14Q 541132 W

2124459 N

Uso de suelo: Forestal.



Sitio bien conservado con vegetación predominante de *Pinus hartwegii*, *Cupressus* sp y pastizal alpino. Algunos individuos de *Eupatorium* sp. A 10 metros del sitio, aproximadamente, hay tala de árboles.

El bosque está conformado por tres estratos: 1) alto: 30 m; 2) bajo: 5 – 10 m; 3) herbáceo < 0.5 m.

Manantial entubado, sitio bien conservado con *P. hartwegii* y pastizal montano.

Estrato arbóreo alto de 30 metros, estrato arbóreo bajo de 5 a 10 metros de alto. Estrato herbáceo menor a 0.5 m. *Pinus hartwegii*, *Cupressus*, *Mulhembergía*, *Festuca*, zacatonal (poaceae), *senecio* sp., *lupinus* sp., muérdago (presente en pinus y cupressus).

A 10 metros del sitio hay señales de tala. (*Cupressus* y *Eupatorium* presentes).



3. Rincón del Cocoyuco (manantial).

Altitud: 3729 m s. n. m.

Coordenadas UTM: 14Q 541078 W

2124572 N

Uso de suelo: Forestal Pecuario.



La vegetación está conformada por *Pinus teocote*, *P. patula*, *P. hartwegii*, *P. pseudostrobus* y pastizal alpino. Se aprecian afloramientos rocosos de riolita, andesita y dacita.



El río corre en dirección Este – Sur. Afloramiento rocoso de riolita, andesita, dacita. Suelo: leptosol andico, franco arenoso. Orilla rocosa. Disminuye el tamaño conforma se avanza en el cauce. Lecho rocoso (en poca profundidad), con bastante sedimento donde es profundo y la velocidad es lenta.



Corriente subterránea. *P. hartewii* y pastizal montano. Dirección del río: este. Relieve convexo (sur). Estrato arbóreo alto de 25 a 30 metros de altura. Estrato arbóreo medio de 8 a 10 metros de altura. Estrato arbóreo bajo de 1 – 2.5 metros de altura. Estrato herbáceo menor de 50 cm de altura. *P. hartwegii*, *Poaceae* (zacatonal). Considerado pecuario debido a que se utilizan zonas cercanas para el pastoreo.

4. El Corral.

Altitud: 3593 m s. n. m.

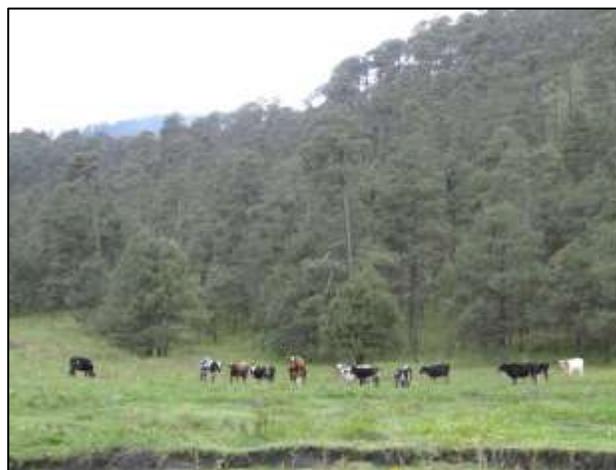
Coordenadas UTM: 14Q 541502 W

2124858 N

Uso de suelo: Forestal.



El género *Pinus* es el dominante en la vegetación, representado principalmente por *Pinus hartwegii*, también hay *Eupatorium* sp presente en la zona. La estructura está conformada por estratos: 1) Alto: 20 – 25 m; 2) Medio: 8 – 15 m; 3) Bajo: 1 – 2m; y 4) Herbáceo: 10 – 50 cm. Los primeros tres estratos están conformados principalmente por *Pinus* sp de diferentes edades, mientras el estrato herbáceo está conformado principalmente por pastos. La corriente del manantial fluye en dirección Norte. Sotobosque abundante en relación con la visita de marzo.





5. Atzompa.

Altitud: 3144 m s. n. m.

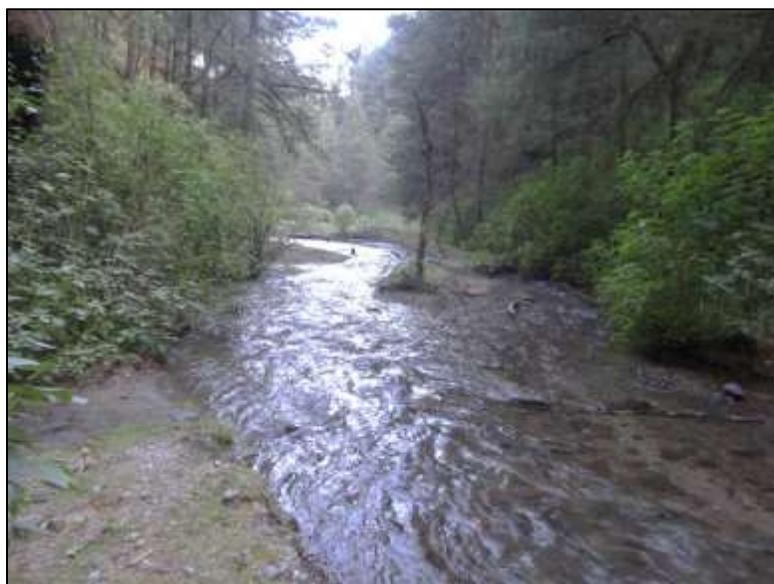
Coordenadas UTM: 14Q 544378 W

2121745 N

Uso de suelo: Forestal



La vegetación es bosque de Pino – Oyamel con presencia de arbustos *Cestrum* sp.



Estrato arbustivo de 1 a 3 metros de alto (*Eupatorium*). Estrato herbáceo de 0.1 a 1 metros de alto. (*Poaceae*, Polipodiaceas).



El río corre de W a E, el sustrato del lecho del río es graviloso con cantos rodados de más de 15 cm en su diámetro más pequeño. El suelo del bosque ribereño presenta grava. Estrato arbóreo alto de 30 a 35 m de alto. Estrato arbóreo medio de 15 a 20 metros de alto. Estrato arbóreo bajo de 10 metros de alto. *A. religiosa*, *P. ayacahuite*.

6. Palo Obispo Manantial.

Altitud: 2917 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 543379 W 2128047 N

Uso de suelo: Forestal.



El agua que sale del manantial es llevada a las zonas más bajas mediante un canal de concreto y posteriormente en tubos.

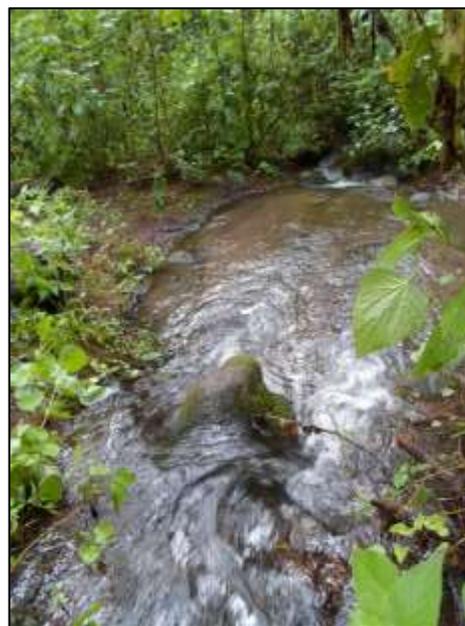


7. Palo Obispo Río.

Altitud: 2897 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 543364 W 2128064 N

Uso de suelo: Forestal. Bosque de pino-oyamel, dominando el pino con tres estratos.

La vegetación está dominada por *Pinus* sp., hay manejo forestal por parte de los habitantes, el suelo está cubierto por hojarasca de pino. Presencia de *lupinus* sp. *Pinus pseudostrobus*, *Abies religiosa*. Suelos tipo leptosol y andosol, texturas franco arenosas limosas. Geología: rocas andesíticas con anfíboles y riolitas.



El sitio es un río intermitente, por lo que en la época seca no existe el flujo.





8. Río Cotzala Represa.

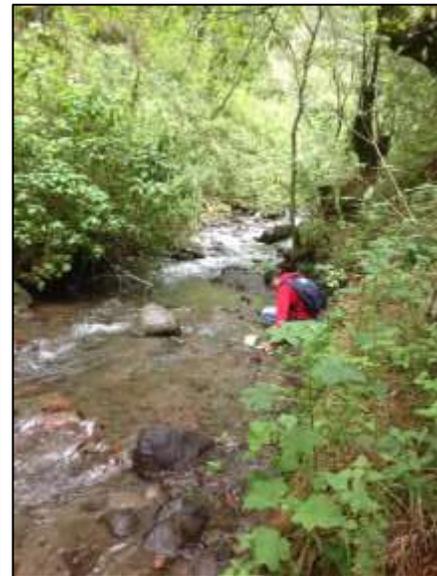
Altitud: 2861 m s. n. m.

Coordenadas UTM: 14Q 546640 W

2121193 N

Uso de suelo: Forestal.

Bosque de Pino – Oyamel.





9. Xoquititila.

Altitud: 2821 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 544287 W 2128212 N

Uso de suelo: Forestal Ecoturístico (recreativo).

Manantial con rocas menores >1 cm y guijarros en el lecho del río. Alrededor del suelo compactado con poca materia orgánica.



Zona donde llega más agua entubada, con gran fuerza para las truchas.



No hay vegetación ribereña, toda la zona tiene ausencia de vegetación ribereña por limpieza y rozamiento. Sólo hay presencia de árboles de pino.



10. Pozo San Juan Tlale (manantial).

Altitud: 2746 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 546793 W 2125254 N

Uso de suelo: Forestal.

La vegetación es bosque mixto con elementos de bosque mesófilo de montaña tales como *Quercus* sp, *Senecio* sp, *Pinus ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *Eupatorium* sp, *Cestrum* sp, *Adiantum* sp, *Bacharis* sp, epífitas y helechos arborescentes. La cobertura arbórea > 75%, zona sombreada. La cañada está orientada de SW a NE. El manantial se encuentra represado en dos cisternas. Se toma la muestra del depósito que recibe la descarga de dos tubos de manera continua y abundante. En la segunda ocasión sólo había agua corriente en la caja de agua y no en el cauce. Dentro de la caja había un polluelo muerto.



La vegetación se describe como “relicto de bosque mesófilo de montaña”, por la presencia de helechos con frondas grandes (de 1.5 m). Estrato arbóreo alto de 25 a 30 metros de altura representado con *Quercus* sp, *Pinus ayacahuite* y *Gnaphalium*. Estrato arbóreo medio de 8 a 12 metros de altura, representado por *Gnaphalium* y *Quercus*. Estrato arbustivo de 1 a 3 metros. Y herbáceo con 0.1 a 1 metros de alto, representado por poaceas, *adiantum*, *salvia*, *polipodiáceas*, *Senecio anguilifolius*.





11. Atzomaco.

Altitud: 2744 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 544059 W 2129030 N Uso de suelo: Forestal.

La vegetación primaria es bosque de Pino – Encino conformando cuatro estratos: 1) Arbóreo alto: con 25 – 35 m de alto representado por *Pinus teocote*; 2) Arbóreo medio: con 15 – 20 m de alto representado por *Quercus laurina* y *Cletra* sp.; 3) Arbóreo bajo: con 8 m de alto representado por *Alnus* sp y *Arbutus* sp (madroño); 4) Arbustivo: con 1 – 6 m representado por *Cestrum* sp, *Bacharis* sp, *Eupatorium* sp, *Senecio* sp, *Salvia* sp, *Melastomataceae*, *Poaceae*, briofitas, helechos y hepáticas.



Las orillas del cauce tienen clastos de 10 – 30 cm de diámetro. Abundancia de briofitas en ellas. El fondo del cauce es pedregoso con rocas de 1 – 5 cm de diámetro. Principalmente riolitas. La corriente nace de Norte a Sur, y cambia de curso hacia el Este.





12. Río Cotzala Hidroeléctrica.

Altitud: 2713 m s. n. m.

Coordenadas UTM: 14Q 548297 W

2121794 N

Uso de suelo: Agrícola.



Presencia de rocas andesitas y riolitas. La vegetación está representada por *Alnus* sp y *Pinus* sp conformando el estrato arbóreo alto con 20 – 25 m de alto. El estrato arbóreo medio con 15 m de alto aproximadamente representado por *Alnus* sp y *Cestrum* sp. El estrato herbáceo representado por helechos y equisetos. Vegetación herbácea abundante, pino y aile, helecho aiantum, cercano a la hidroeléctrica y zona de cultivo de maíz.



Lecho del cauce rocoso, con rocas de 1 cm de diámetro máximo, y disminuye a cantos y grava. Cobertura del suelo con hojarasca de pino. Orilla del río consolidada. Es el río antes de que se incorpore al canal de la hidroeléctrica y antes del llenado de caja de agua y cisterna.



13. San Felipe Teotlalcingo 2 (arroyo).

Altitud: 2388 m s. n. m.

Coordenadas UTM: 14Q 553301 W

2127460 N

Uso de suelo: Agrícola.



14. San Felipe Teotlalcingo 1 (manantial).

Altitud: 2386 m s. n. m.

Coordenadas UTM: 14Q 553273 W

2127458 N

Uso de suelo: Agrícola.

Presenta orilla perturbada, la vegetación ribereña fue removida en su totalidad para realizar actividades de agricultura. El manantial está rodeado, a modo de protección, por un empedrado.





La zona es completamente de cultivo, presenta suelos arenosos con profundidad de 12 – 65 cm aproximadamente. Hay depósitos de arena (fluvisoles) y afloramientos rocosos de riolita. Dentro de los cultivos hay áreas de melgas de 12 – 20m, de árboles frutales (pera, manzana, ciruela y durazno), que delimitan los diferentes cultivos.

15. San Felipe Teotlalcingo 3 (asilo).

Altitud: 2380 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 553435 W 2127623 N

Uso de suelo: Agrícola.

El cauce corre de W a E, la vegetación ribereña está representada con *Cletra* sp, abundante *Garrya* sp y *Prunus capulí* (capulín). Melgas de árboles de durazno. El material aluvial favorece la formación de fluvisoles en la zona ribereña. El estrato arbóreo posee una altura aproximada de 10 – 15 metros.

La orilla Sur del cauce no está consolidada. Presenta un talud de 3 – 4 metros, raíces descubiertas, afloramientos rocosos y presencia de macrofitas. La orilla Norte está medianamente consolidada con presencia de gramíneas. En el cauce hay afloramientos rocosos redondeados, así como la presencia de riolitas y andesita con alto grado de oxidación. El río presenta un alto grado de contaminación visible por residuos sólidos como plástico, vidrio, textiles, aluminio, llantas y un animal muerto.





16. San Simón Atzitzintla.

Altitud: 2314 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 555817 W 2132340 N

Uso de suelo: Agrícola – Urbano.

Río adyacente a la zona urbana de San Simón. Visiblemente el agua presenta un alto contenido de materia orgánica, además de presentar un aroma fétido.

El suelo del ambiente ribereño está cubierto de césped con un espesor de 1 m aproximadamente. El relieve es cóncavo y la orilla del río no está consolidada. El río intersecta con un camino que es usado continuamente como paso peatonal y vía de transporte automovilístico.

Los cultivos se encuentran a 30 m del cauce aproximadamente. En la superficie de los suelos agrícolas se muestra alta pedregosidad. Ribera del río, con agua turbia, vegetación en la ribera por fragmento, vegetación herbácea y pocos árboles (aproximadamente 6 en el transecto de 30 metros), hay fresno y pasto alrededor.



Orilla del cauce consolidada con pastos, el lecho del cauce con poca grava y mucha arena, ocasionalmente rocas. La zona está rodeada de cultivo de amaranto y maíz, el agua del río es utilizada para lavar hortalizas y cruza directamente con una vía terrestre. La vegetación ribereña es principalmente de tipo secundaria, representada por *Quercus* sp, *Alnus* sp, *Prunus capulí*, *Senecio* sp, *Salvia* sp y leguminosas. Conformando un estrato arbóreo de 3 – 5 m.





Durante el muestreo, el agua era turbia pero permitía la visibilidad del fondo del cauce al inicio del muestreo, aproximadamente 20 minutos después el agua comenzó a llegar muy turbia, y en consecuencia la visibilidad no permitía ver el fondo del cauce.

17. San Rafael Tlanalapan 3.

Altitud: 2279 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 556617 W 2133356 N

Uso de suelo: Urbano.

La estructura de la vegetación está conformada por tres estratos: 1) Arbóreo: 8 – 10 m de altura, representado por pirul, álamo, *Alnus* sp y laurel; 2) Arbustivo: 2 – 4 m de altura, compuesto por higuera y *Cupressus* sp; 3) Herbáceo: 50 cm – 1 m de altura representado con ricino y pastos.



La orilla del cauce está consolidada por compactación del suelo y gramíneas. El suelo es de tipo fluvisol. La zona ribereña está drásticamente afectada por el uso intensivo como pastoreo de pequeños animales como cabras y borregos. Los asentamientos se encuentran prácticamente dentro de la zona ribereña. El cauce se encuentra por debajo de dos vías de comunicación que representan un serio daño a la estructura de la zona ribereña. En toda la zona y en el río hay presencia de desechos sólidos tales como plástico, textiles, vidrio, sanitarios, incluso un ave de corral muerta, lo que provoca un olor fétido del agua.





18. San Rafael Tlanalapan 1 (manantial).

Altitud: 2272 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 556297 W 2133853 N

Uso de suelo: Urbano.

El manantial se encuentra adyacente a las raíces de un árbol, está rodeado por muros de concreto y tiene dos salidas que van hacia el río, una frontal y una lateral.



19. San Rafael Tlanalapan 2 (arroyo).

Altitud: 2272 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 556297 W 2133853 N

Uso de suelo: Urbano.

Río muy contaminado, con olor fétido, gran perturbación en las orillas del cauce. Poca vegetación ribereña representada por *Alnus* sp. y *Quercus* sp.





20. Distrito Atoyac – Zahuapan.

Altitud: 2235 m s. n. m. Coordenadas UTM: 14Q 561235 W 2132340 N

Uso de suelo: Urbano.

Río adyacente a los asentamientos urbanos, cruza directamente con varias vías de transporte terrestre, se encuentra junto a una planta de tratamiento de agua de San Martín Texmelucan.



La vegetación ribereña se encuentra perturbada con presencia de desechos sólidos como vidrio, textiles, plástico, llantas, aluminio, residuos sanitarios, de comida, etc.





Antes del punto de muestreo se encuentra una presa, la cual está severamente contaminada con residuos sólidos visibles.



Caracterización del agua de la subcuenca San Martín Texmelucan.

Cuadro 5. Características físicas y químicas del agua de la subcuenca.

| Parámetro | Unidades | Mínimo | Máximo | Promedio | Coefficiente de Variación |
|-------------------------|---------------------------------------|--------|---------|------------|---------------------------|
| Temperatura del agua | °C | 6.8 | 20 | 11.7923 | 28.4597% |
| Conductividad Eléctrica | µS | 18 | 849 | 178.692 | 105.112% |
| pH | pH | 5.62 | 8.15 | 6.8128 | 8.6884% |
| Oxígeno Disuelto | mg/L | 0.14 | 11.533 | 6.9067 | 32.5482% |
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L | 10.3 | 259.56 | 67.7607 | 78.4999% |
| Dureza de Calcio | mg CaCO ₃ /L | 4.204 | 685.818 | 94.3304 | 140.431% |
| Dureza Total | mg CaCO ₃ /L | 2.002 | 936.215 | 139.663 | 146.254% |
| Nitritos | mg N-NO ₂ ⁻ /L | ND | 0.247 | 0.00854872 | 452.368% |
| Nitratos | mg N-NO ₃ ⁻ /L | ND | 24.2 | 1.28995 | 317.322% |
| Amonio | mg N-NH ₄ ⁺ /L | ND | 20.796 | 2.16392 | 223.136% |
| Fósforo Total | mg P-PO ₄ ⁻ /L | ND | 4.006 | 0.540103 | 145.844% |
| Ortofosfatos | mg P-PO ₄ ³⁻ /L | ND | 1.261 | 0.173297 | 153.707% |
| Sulfatos | mg SO ₄ ²⁻ /L | ND | 44.02 | 9.56975 | 117.813% |
| DBO5 | mg O ₂ /L | ND | 12.741 | 1.71438 | 165.96% |
| Sulfuros | mg S ²⁻ /L | ND | 20 | 3.52531 | 95.1876% |
| STD | mg/L | 9 | 424 | 83.7895 | 105.883% |
| DQO | mg O ₂ /L | ND | 391.954 | 58.8021 | 131.935% |

ND= No detectado con el método utilizado.



Análisis de componentes principales.

En el cuadro 6, el valor propio (*eigenvalor*) representa el número de variables que explica la varianza de cada componente y el porcentaje acumulado es el porcentaje de la varianza total que explica cada uno de ellos. Del análisis se obtuvieron 17 componentes principales, de los cuales los primeros tres componentes conformados por la temperatura del agua, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, amonio, ortofosfatos, sólidos totales disueltos, dureza de calcio, dureza total, nitritos, alcalinidad y sulfatos explican el **70.009 %** de la varianza total del sistema.

Cuadro 6. Componentes Principales.

| <i>Número de Componente</i> | <i>Valor Propio</i> | <i>Porcentaje de varianza</i> | <i>Porcentaje Acumulado</i> |
|-----------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 7.22897 | 42.523 | 42.523 |
| 2 | 3.17949 | 18.703 | 61.226 |
| 3 | 1.49305 | 8.783 | 70.009 |
| 4 | 1.20826 | 7.107 | 77.116 |
| 5 | 0.972423 | 5.720 | 82.836 |
| 6 | 0.845933 | 4.976 | 87.813 |
| 7 | 0.598773 | 3.522 | 91.335 |
| 8 | 0.460866 | 2.711 | 94.046 |
| 9 | 0.277421 | 1.632 | 95.678 |
| 10 | 0.217213 | 1.278 | 96.955 |
| 11 | 0.210644 | 1.239 | 98.194 |
| 12 | 0.142931 | 0.841 | 99.035 |
| 13 | 0.0739062 | 0.435 | 99.470 |
| 14 | 0.0359125 | 0.211 | 99.681 |
| 15 | 0.0282888 | 0.166 | 99.848 |
| 16 | 0.0217391 | 0.128 | 99.975 |
| 17 | 0.0041676 | 0.025 | 100.000 |

Cuadro 7. Pesos de las variables en cada componente.

| <i>Parámetro</i> | <i>Componente 1</i> | <i>Componente 2</i> | <i>Componente 3</i> |
|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Temperatura del agua | 0.271997 | 0.0508097 | 0.11022 |
| Conductividad | 0.348743 | -0.0631325 | -0.220752 |
| pH | 0.141689 | 0.160905 | 0.0160347 |
| Oxígeno Disuelto | -0.311594 | 0.0901661 | -0.0914382 |
| Alcalinidad | 0.254404 | 0.161083 | -0.387011 |
| Dureza de Calcio | 0.107475 | 0.47802 | 0.113077 |
| Dureza Total | 0.106237 | 0.460741 | 0.0941957 |
| Nitritos | 0.130447 | 0.349329 | 0.313922 |
| Nitratos | 0.281323 | -0.220862 | 0.082709 |
| Amonio | 0.332913 | -0.0198927 | 0.225386 |
| Fósforo Total | 0.253668 | -0.266443 | 0.361756 |
| Ortofosfatos | 0.258129 | -0.253095 | 0.353314 |
| Sulfatos | 0.249813 | 0.166604 | -0.402841 |
| DBO 5 | 0.0901263 | 0.316242 | 0.251811 |
| DQO | 0.265248 | -0.158502 | -0.201781 |
| Sulfuros | -0.079973 | 0.178067 | 0.0947216 |
| Sólidos Totales Disueltos | 0.338261 | 0.0427437 | -0.267962 |



Para el análisis de los pesos, cada componente está representado por el peso de ciertas variables que explican la dinámica del sistema (cuadro 7). El primer componente (figura 11) muestra una interacción entre la temperatura del agua, los sólidos totales disueltos, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, nitratos, amonio y ortofosfatos, en la cual el oxígeno disuelto tiene una relación negativa o inversa al resto de las variables representativas del componente 1, lo que significa que las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyen en el sistema debido a que está oxidando otros compuestos como ortofosfatos.

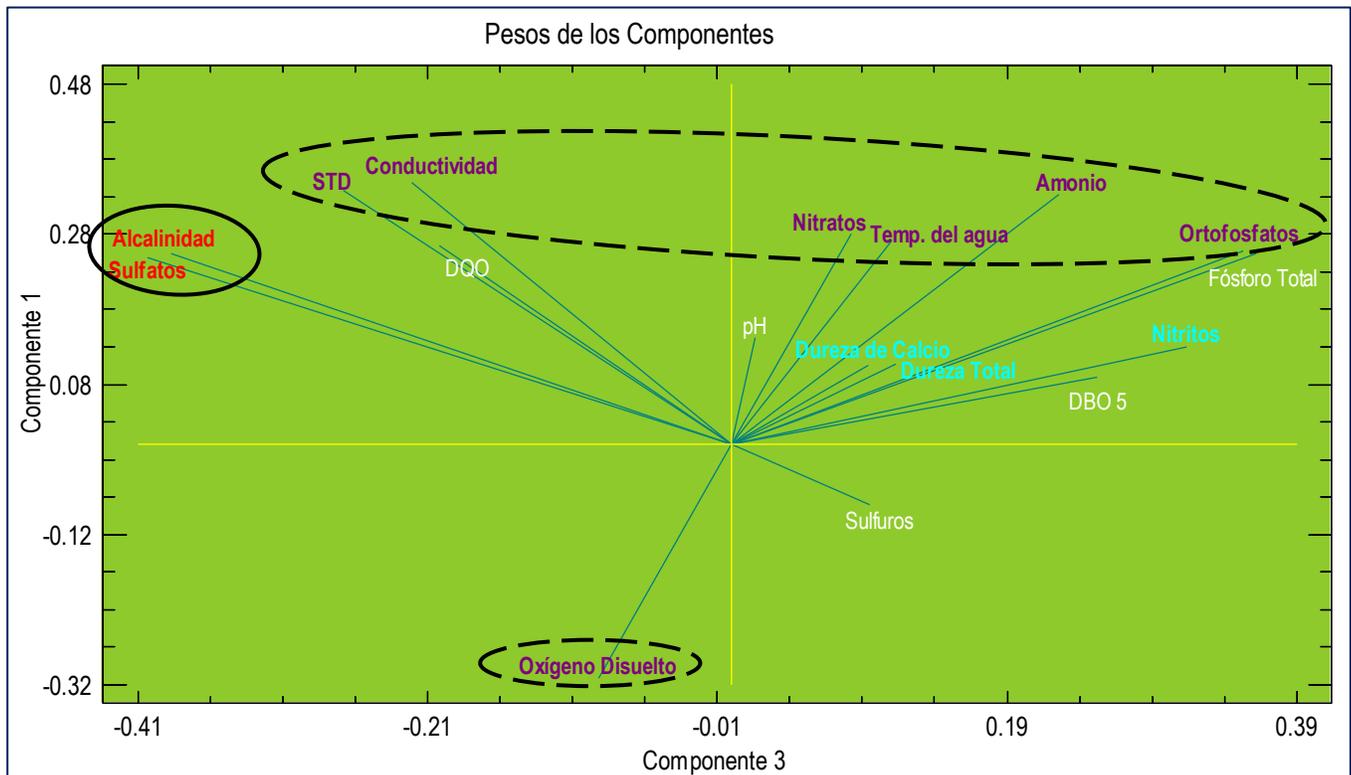


Figura 11. Componente 1 en color morado y componente 3 de color rojo.

El componente número dos (figura 12, línea punteada), explica una interacción positiva entre las durezas y los nitritos del agua, lo que significa que la composición geológica de la subcuenca juega un papel importante en la química del agua ya que cabe mencionar que el calcio y el magnesio son elementos que constituyen un porcentaje de la composición química de las rocas ígneas que se encuentran en el sustrato adyacente y en el lecho, incorporándose al agua por disolución continua. El tercer componente (figura 11, línea sólida), está dominado por la alcalinidad y los sulfatos que complementan el complejo salino del sistema.

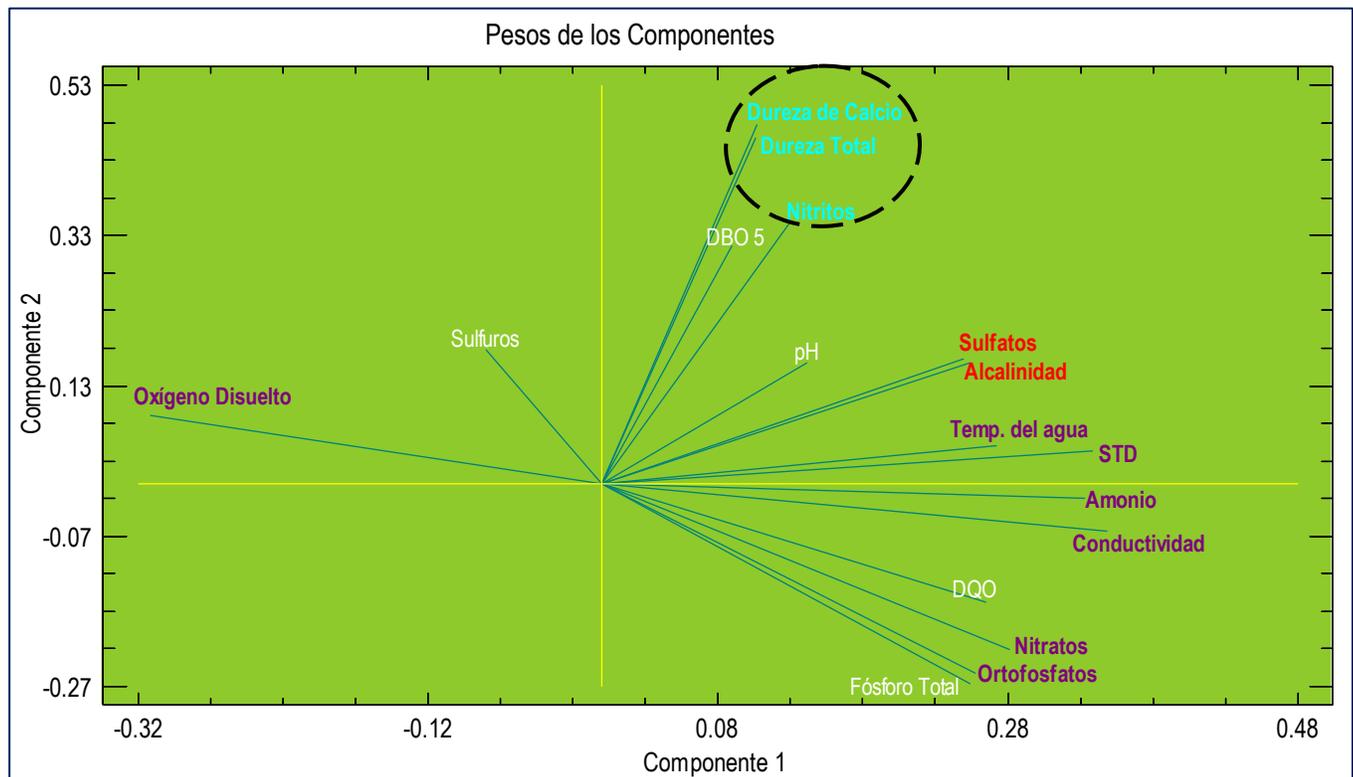


Figura 12. Componente 2.

Comportamiento del sistema.

Se registraron datos de temperatura del agua y STD, que fueron los parámetros que presentaron correlación significativa con el resto de las variables, por ello se utilizó la temperatura del agua, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, amonio, ortofosfatos, sólidos totales disueltos, dureza de calcio, dureza total, nitritos, alcalinidad y sulfatos para describir el comportamiento del sistema por su importancia en la mayoría de los procesos que se llevan a cabo. Dado que la velocidad y el equilibrio de las reacciones químicas en el agua, dependen de la temperatura y además influye en los procesos microbiológicos dentro del agua analizada (Geissler & Arroyo, 2011).

En cada uno de los gráficos de burbuja se representan cuatro variables, una en el eje X , otra en el eje Y , y las burbujas, las cuales representan la concentración de sólidos totales disueltos (STD) en relación con la temperatura (eje X), los cuales son fijos para todos los gráficos, el eje Y representa el tercer parámetro y la leyenda de colores representa los diferentes usos de suelos utilizados en este trabajo. La variable que se encuentra en el eje de Y , es la variable que se va a cambiar, el resto permanecerán iguales en los gráficos de burbujas.

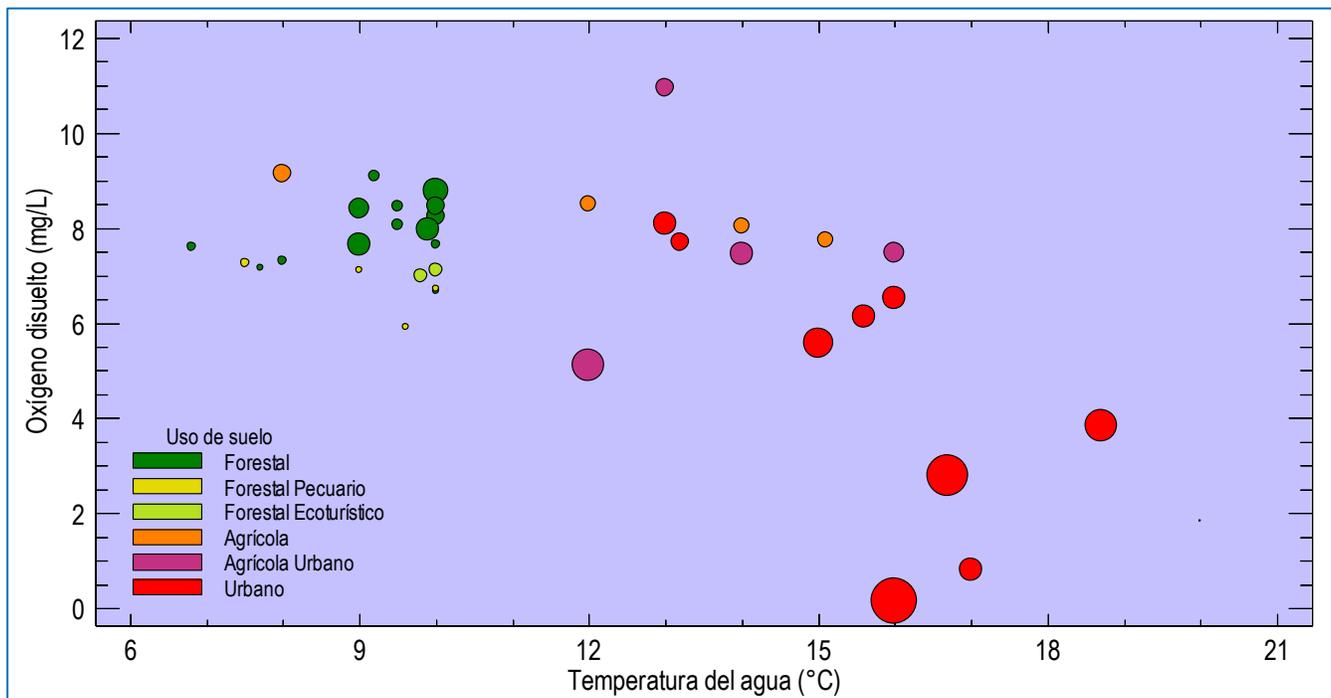


Figura 13. Oxígeno disuelto en relación con la temperatura, los usos de suelo y los STD.

La figura 13 muestra las concentraciones de oxígeno disuelto en relación con el uso de suelo, los STD y la temperatura del agua, se observa que el agua de arroyos adyacentes a los usos de suelo urbano presentan bajas concentraciones de oxígeno disuelto, siendo *San Rafael Tlanalapan 3* (en temporada seca) el sitio con menor concentración de oxígeno disuelto ($0.15 \text{ mg O}_2/\text{L}$) y altas concentraciones de STD (424 mg/L). Los sitios con usos de suelos forestales: forestal, forestal-pecuario y forestal-ecoturístico presentan niveles de oxígeno constantes en ambas temporadas de muestreo lo que muestra estabilidad y resiliencia en éstos ambientes, a diferencia de los sitios urbanos y agrícolas, donde las concentraciones de STD y oxígeno disuelto aumentan considerablemente y por ello se aprecian burbujas naranjas y rosas entremezcladas.

En el análisis de correlaciones realizado, el oxígeno disuelto presentó una relación negativa significativa con la temperatura, las concentraciones de oxígeno disuelto decrecen cuando aumentan la salinidad (Allan & Castillo, 2007), también cuando aumenta la temperatura (Cole & Hannan, 1990). El aumento de temperatura y salinidad generan anoxia en el sistema acuático, por lo que los procesos de oxidación se ven alterados y se incrementa la DQO, que muestra una relación con STD significativa y positiva, lo que implica que el agua de arroyos de los sitios urbanos están dominados por un régimen de bajas concentraciones de oxígeno disuelto de hasta $0.15 \text{ mg O}_2/\text{L}$ en el caso de *San Rafael Tlanalapan*, donde los procesos de degradación de materia y nutrientes están siendo limitados por las bajas concentraciones de oxígeno disuelto.

La figura 13 muestra que las concentraciones de oxígeno disuelto del agua son mayores en los usos de suelo Forestal, Forestal-Pecuario y Forestal-Ecoturístico con un rango de $7.467 \text{ mg O}_2/\text{L}$ a $9.090 \text{ mg O}_2/\text{L}$. Bajo estas condiciones, las aguas de sitios con uso de suelo Forestal presentan un intervalo de



temperaturas de 6.5 a 10.5 °C, lo que beneficia a la solubilidad del oxígeno disuelto en las aguas ya que ésta se ve afectada por la temperatura (Wetzel, 1981). Por otro lado las concentraciones de STD son mayores en los usos de suelo Urbano que alcanzan un máximo de 424 mg O₂/L, los cuales son altos en relación con los usos de suelo Forestales. A menudo las concentraciones de oxígeno disuelto en los ríos, presentan marcadas variaciones espacio-temporales que a menudo están directamente asociadas con las descargas de materia orgánica (Wetzel, 2001), por ello en los sitios donde las descargas de aguas residuales, domésticas e industriales son mayores, existe una baja concentración de oxígeno disuelto, regularmente son características de los afluentes que transitan por asentamientos humanos, como se ve en la gráfica las burbujas rojas representan los sitios urbanos con altas concentraciones de STD y las temperaturas más altas de este estudio, así como bajas concentraciones de oxígeno disuelto.

La calidad del agua de un sistema acuático superficial está controlada por la enorme aportación cuantitativa y cualitativa de cargas de nutrientes externas (material alóctono). La naturaleza de estas entradas de nutrientes refleja el régimen climático, las características de la subcuenca tales como morfología, tipo de suelo y uso de suelo (Kennedy & Walker, 1990) debido a los procesos de lixiviación de las rocas, interacción del agua de escorrentía con el suelo y del agua de infiltración con las partículas del suelo. Wetzel (1981), menciona que las aguas naturales no contaminadas poseen concentraciones de nitrógeno en forma de amonio de 0 a 5 mg N-NH₄⁺/L, el nivel de nitritos considerado para aguas no contaminadas es de 0 a 0.01 mg N-NO₂⁻/L y para nitratos se consideran no contaminadas cuando presentan un intervalo de concentración de 0 a 10 mg N-NO₃⁻/L.

Las figuras 14, 15 y 16 se muestra el comportamiento del amonio, nitritos y nitratos respectivamente, observándose que los sitios urbanos presentan las concentraciones más elevadas de nitratos, *San Rafael Tlanalapan 3* (24.20 mg N-NO₃⁻/L) y *Distrito Atoyac-Zahuapan* (10.500 mg N-NO₃⁻/L). Por lo anterior las aguas consideradas contaminadas con amonio se encuentran en: *San Rafael Tlanalapan 2*, *San Rafael Tlanalapan 3*, *San Simón Atzitzintla* y *Distrito Atoyac-Zahuapan*. El NH₄⁺, el NO₂⁻ y el NO₃⁻ tienen una correlación negativa con un *p-valor* < 0.05, lo que indica que las concentraciones de oxígeno disuelto están bajando mientras las concentraciones de amonio, nitritos y nitratos aumentan, lo anterior explica que debido a los procesos de nitrificación de las aguas, existe una demanda química de oxígeno para llevar a cabo la oxidación del amonio a nitritos y posteriormente a nitratos, sin embargo, la DQO se relaciona positivamente (con valor de *p* < 0.05) sólo con el amonio y con el nitrato del sistema (ver ANEXO III), esto podría atribuirse a que los nitritos se están siendo transformados rápidamente a nitratos.

Las concentraciones van en aumento conforme disminuye la altitud de los sitios muestreados con uso de suelo Urbano. Brenes y colaboradores (2011) reportan un comportamiento espacial de los nitratos orientado hacia el municipio San Martín Texmelucan, en el cual se encuentra el sitio *Distrito Atoyac-Zahuapan*. San Felipe Teotlalcingo no presenta índices altos de concentraciones de nitratos a pesar de las actividades agrícolas, lo anterior explica que las altas concentraciones en el sitio de muestreo *Distrito Atoyac-Zahuapan* se deben a que recibe descargas agrícolas, domésticas y de la industria textil de los afluentes que le alimentan.

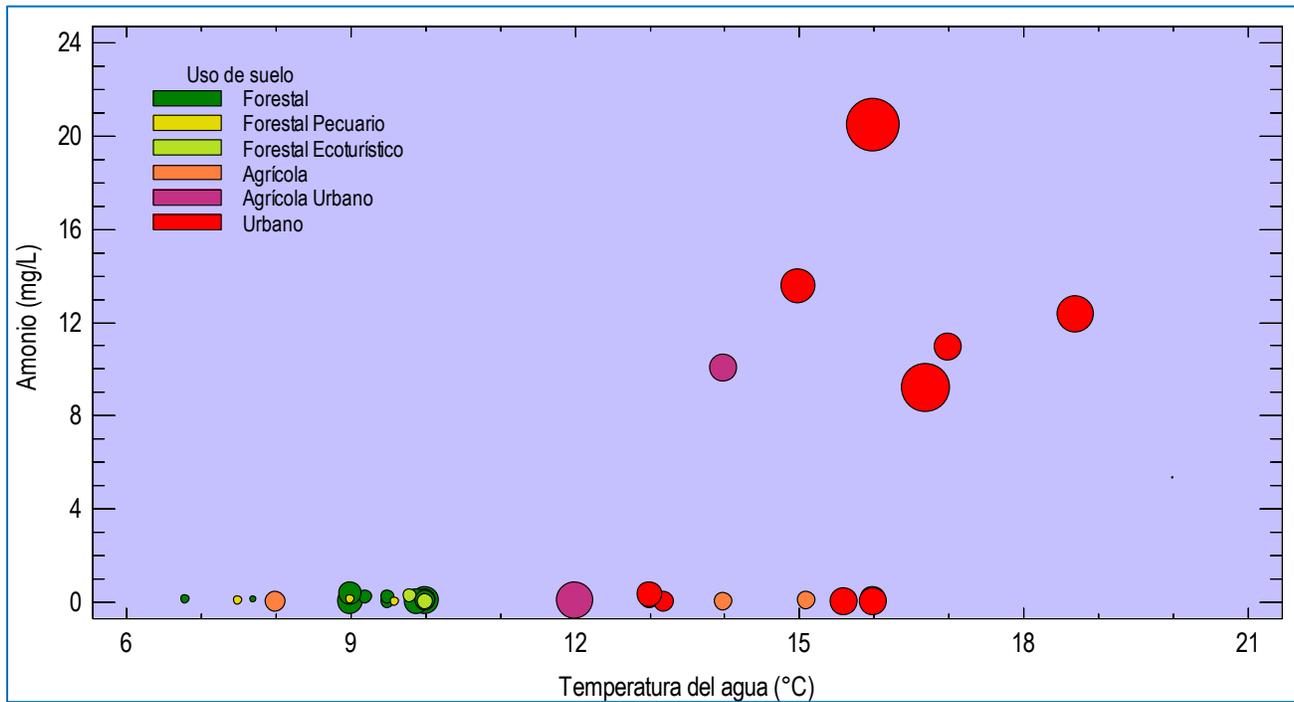


Figura 14. Amonio-STD en relación con Temperatura del agua y usos de suelo.

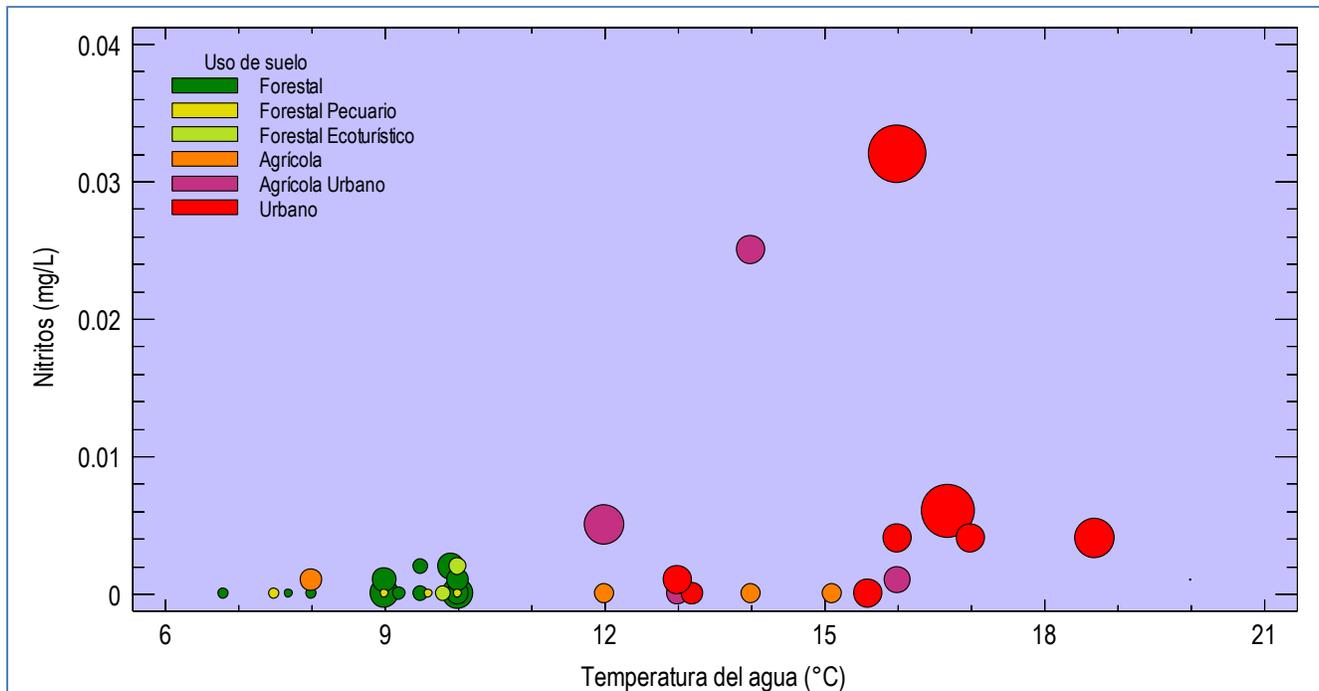


Figura 15. Nitritos – STD en relación con temperatura del agua y usos de suelo.

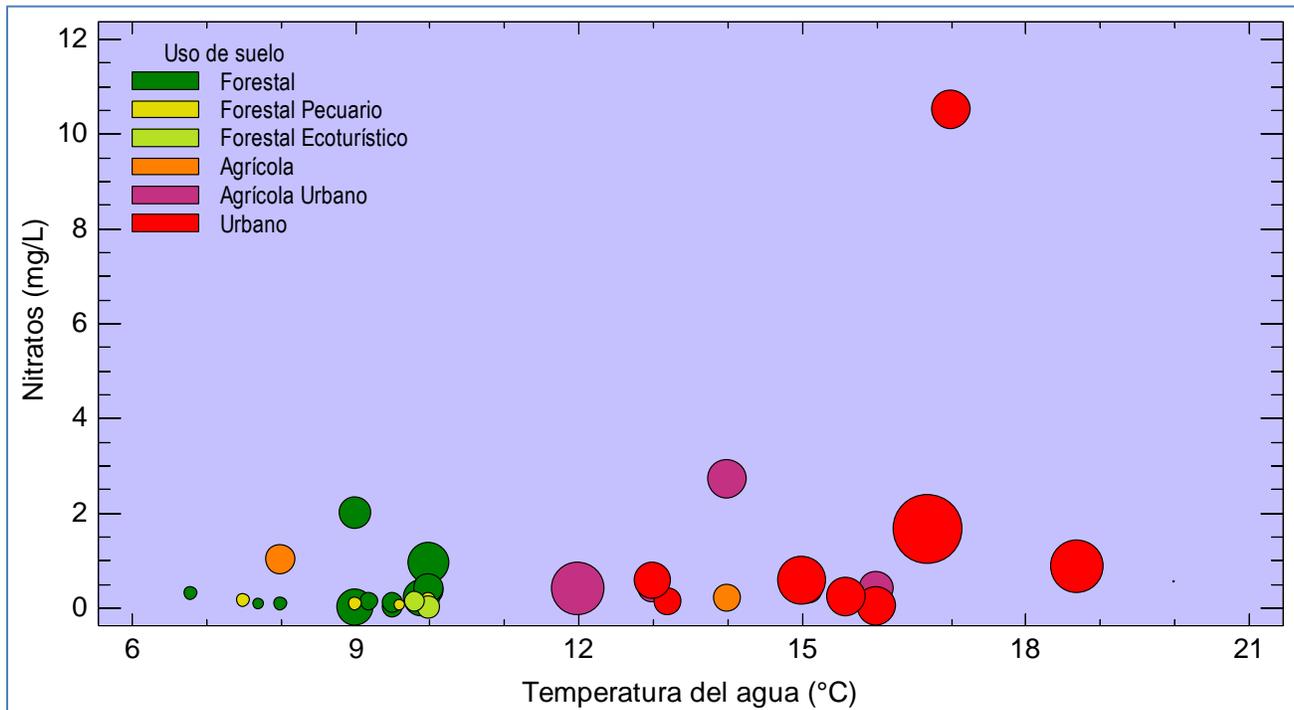


Figura 16. Nitratos – STD – Temperatura de agua y usos de suelo.

En cinco de los sitios *Atzomaco*, *San Simón Atzitzintla*, *Cotzala hidroeléctrica*, *San Rafael Tlanalapan 1, 2 y 3*, hay presencia de árboles *Alnus* los cuales están identificados como fuente importante de nitrógeno por fijación biológica, aportan nitrógeno a los ríos debido a que las hojas de *Alnus* contienen cuatro veces más nitrógeno que otras especies deciduas (Wetzel, 2001), esto debido a que establecen una asociación con bacterias fijadoras de N_2 , esto provoca que el nitrógeno fijado ingrese al sistema acuático a través de la lixiviación o al caer las hojas (Dodds & Whiles, 2010), de tal manera que hay una contribución importante de nitrógeno al río, cabe mencionar que el género *Alnus* es considerado como un componente de la vegetación ribereña en altitudes propicias para este género (Granados *et al.*, 2006).

Esto permite explicar otros elementos que contribuyen a las variaciones de nitrógeno además de la mineralización y las descargas de aguas de uso doméstico. La vegetación propia de la franja ribereña, en la cual se establecen especies que favorecen la absorción de nutrientes y la consolidación de la orilla, afectan de manera significativa la concentración de materia orgánica cuando sus hojas y restos se acumulan en el cauce del río incrementando la demanda química de oxígeno.

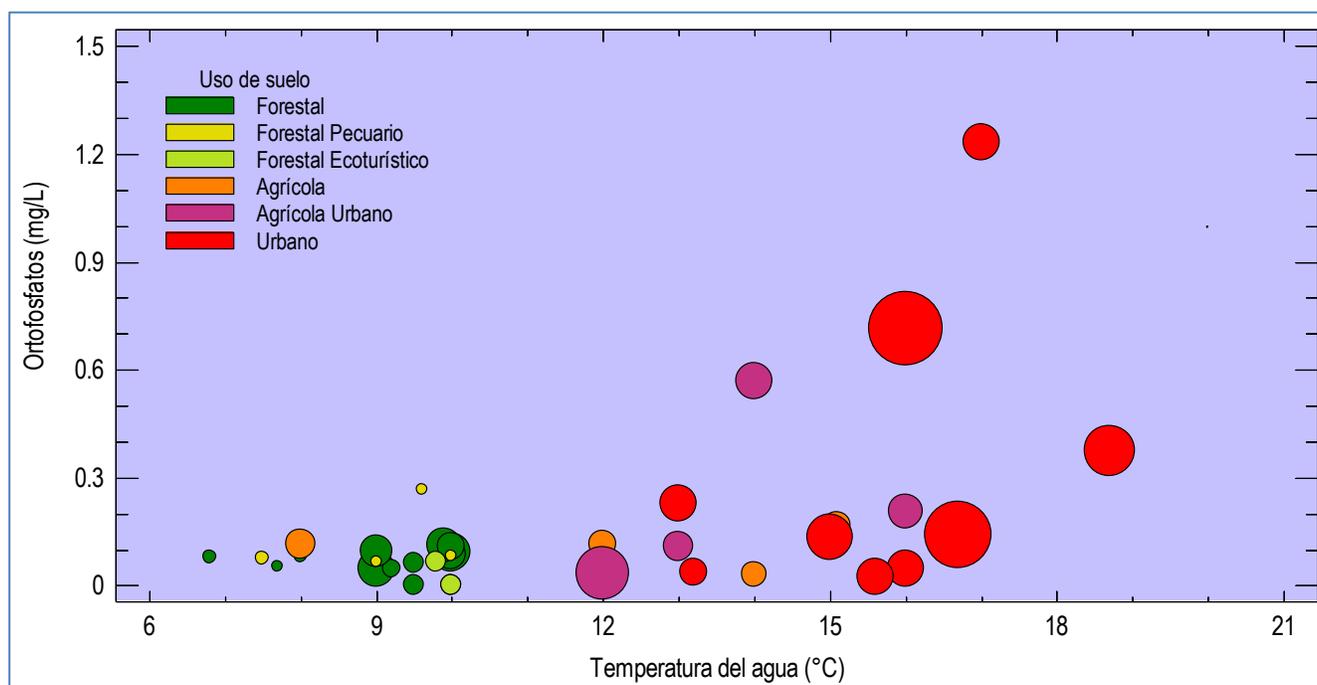


Figura 17. Ortofosfatos – STD – Temperatura del agua y usos de suelo.

De acuerdo a la figura 17, para ortofosfatos se encontró una correlación positiva con los STD y con la temperatura del agua, lo que significa que su comportamiento es directamente proporcional. Las zonas urbanas (en rojo) presentan las concentraciones más altas de STD y de ortofosfatos, así como las mayores temperaturas y son sitios que presentaron también mayores concentraciones de ortofosfatos como: *Distrito Atoyac-Zahuapan* en época seca (1.231 mg P-PO₄³⁻/L), *San Rafael Tlanalapan 3* seca (0.714 mg P-PO₄³⁻/L), *San Simón Atzitzintla* seca (0.568 mg P-PO₄³⁻/L) y *San Felipe Teotlalcingo 3* lluvia (0.227mg P-PO₄³⁻/L). Los sitios *Atzomaco*, *Xoquititla*, *Palo Obispo Manantial* y *Palo Obispo Río* en época de lluvias mostraron niveles no detectables con el método utilizado para P-PO₄³⁻. Las concentraciones de fosfatos en aguas naturales son bajas (Dodds & Whiles, 2010) sobretodo en regiones montañosas con presencia de rocas ígneas, además los ortofosfatos son la única forma de fósforo inorgánico directamente utilizable (Wetzel, 2001), por lo que es aprovechado rápidamente por los organismos del ambiente.

San Rafael Tlanalapan 1, *San Felipe Teotlalcingo 1*, *2* y *3* (todos en época seca) presentaron las concentraciones más bajas de P-PO₄³⁻ con 0.024 mg/L, 0.032 mg/L, 0.035 mg/L y 0.037 mg/L respectivamente. Los cultivos de temporal aportan cantidades de fósforo inorgánico al sistema en época de lluvias, por esto en *San Felipe Teotlalcingo 3* hay altas concentraciones de P-PO₄³⁻ debido a los aportes de los fertilizantes y abonos, se considera que las descargas agrícolas incrementan los niveles de fósforo inorgánico a niveles que van de los 0.05 – 0.1 mg P-PO₄³⁻/L y por descargas municipales hasta 1 mg P-PO₄³⁻/L (Wetzel, 2001). Los usos de suelo forestales se mantienen dentro de un rango de



0 a 0.2 mg P-PO₄³⁻/L, mientras que los usos de suelo agrícolas van de 0 – 0.6 mg P-PO₄³⁻/L, y los urbanos de 0 – 13 mg P- PO₄³⁻/L.

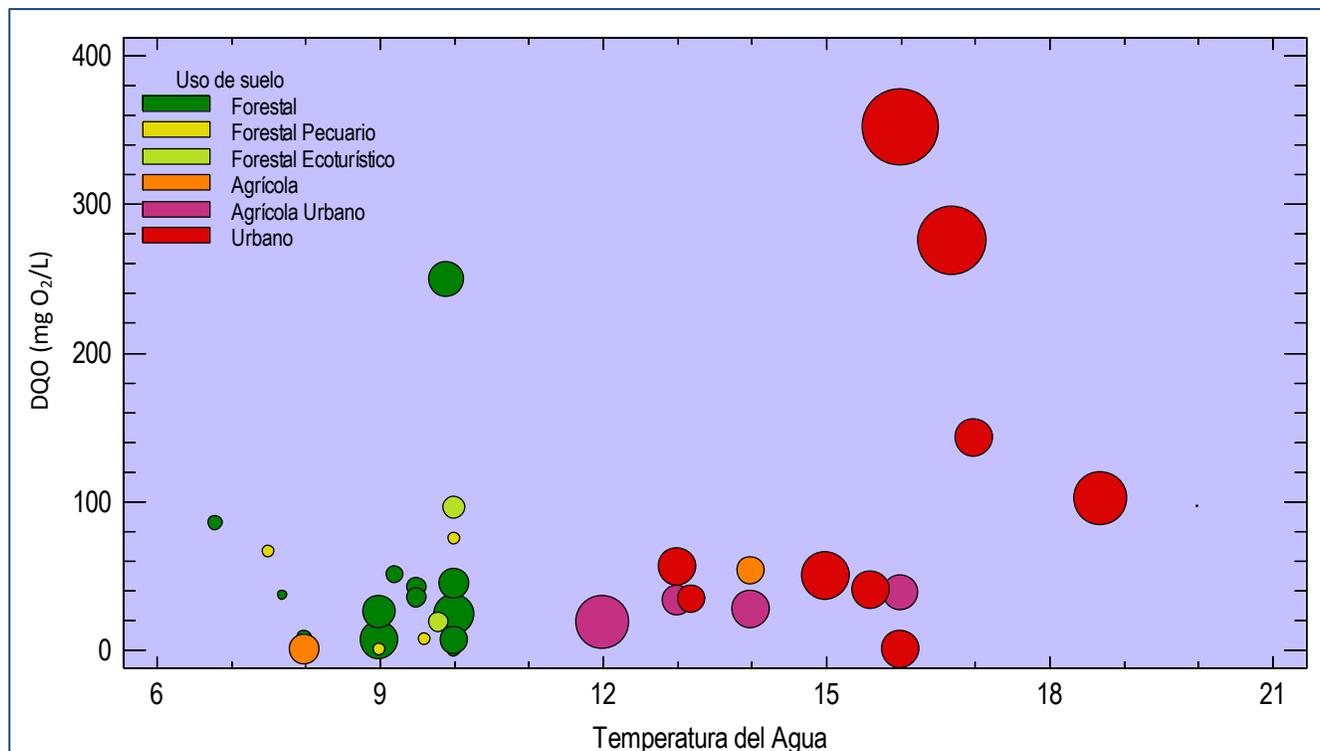


Figura 18. Demanda Química de Oxígeno – STD – Temperatura del agua y usos de suelo.

La Demanda Química de Oxígeno (figura 18) es un indicador de contaminantes oxidables, incluyendo los no biodegradables (Geissler & Arroyo, 2011). De acuerdo con la clasificación (cuadro 8) que utiliza CONAGUA (2015) según la DQO, los sitios con agua **Excelente** (no contaminada) son: *Cocoyuco*, *Rincón del Cocoyuco*, *El Corral*, *Atzompa*, *Palo Obispo Río* y *Pozo San Juan Tlale*. Con **Buena Calidad** se encuentran: *Pilares*, *Río Cotzala Represa*, *Atzomaco* y *Río Cotzala Hidroeléctrica*. Los sitios con agua **Aceptable** son *Palo Obispo Manantial*, *San Felipe Teotlalcingo 2*, *San Simón Atzitzintla* y *San Rafael Tlanalapan 1*. *San Felipe Teotlalcingo 2*, *San Simón Atzitzintla* y *San Rafael Tlanalapan 1* que son sitios con usos de suelo agrícola – urbano y urbano, a excepción de *Palo Obispo Manantial* posiblemente los niveles de DQO en este manantial se pueden atribuir a la conversión de NH₄⁺ a NO₃⁻ ya que esto consume grandes cantidades de oxígeno disuelto (Davis & Masten, 2005) así como la acumulación de materia orgánica en torno del manantial. Los sitios con agua en la clasificación como **Contaminada** son: *San Felipe Teotlalcingo 1* (agrícola), *San Felipe Teotlalcingo 3* (agrícola) y *Distrito Atoyac-Zahuapan* (urbano). Finalmente las **Fuertemente Contaminadas** corresponden a los sitios de: *San Rafael Tlanalapan 3* con 351.43 mg O₂/L y *San Rafael Tlanalapan 2* con 275.068 mg O₂/L, la Comisión Nacional del Agua utiliza como indicador de calidad del agua la Demanda Química de Oxígeno (cuadro 8). Los resultados obtenidos en el análisis para DQO son



similares a lo reportado por CONAGUA (2008) en la zona II del río Atoyac correspondiente al río Cotzala con una DQO = 143 – 172 (mg O₂/L), ubicando los escurrimientos provenientes de la cuenca San Martín como agua Contaminada.

Cuadro 8. Escala de clasificación de calidad del agua: demanda química de oxígeno.

| Criterio | Clasificación | Color |
|----------------|--|----------|
| DQO ≤ 10 | EXCELENTE → No contaminada. | AZUL |
| 10 < DQO ≤ 20 | BUENA CALIDAD → Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable. | VERDE |
| 20 < DQO ≤ 40 | ACEPTABLE → Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. | AMARILLO |
| 40 < DQO ≤ 200 | CONTAMINADA → Aguas superficiales con descarga de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal. | NARANJA |
| DQO > 200 | FUERTEMENTE CONTAMINADA → Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales. | ROJO |

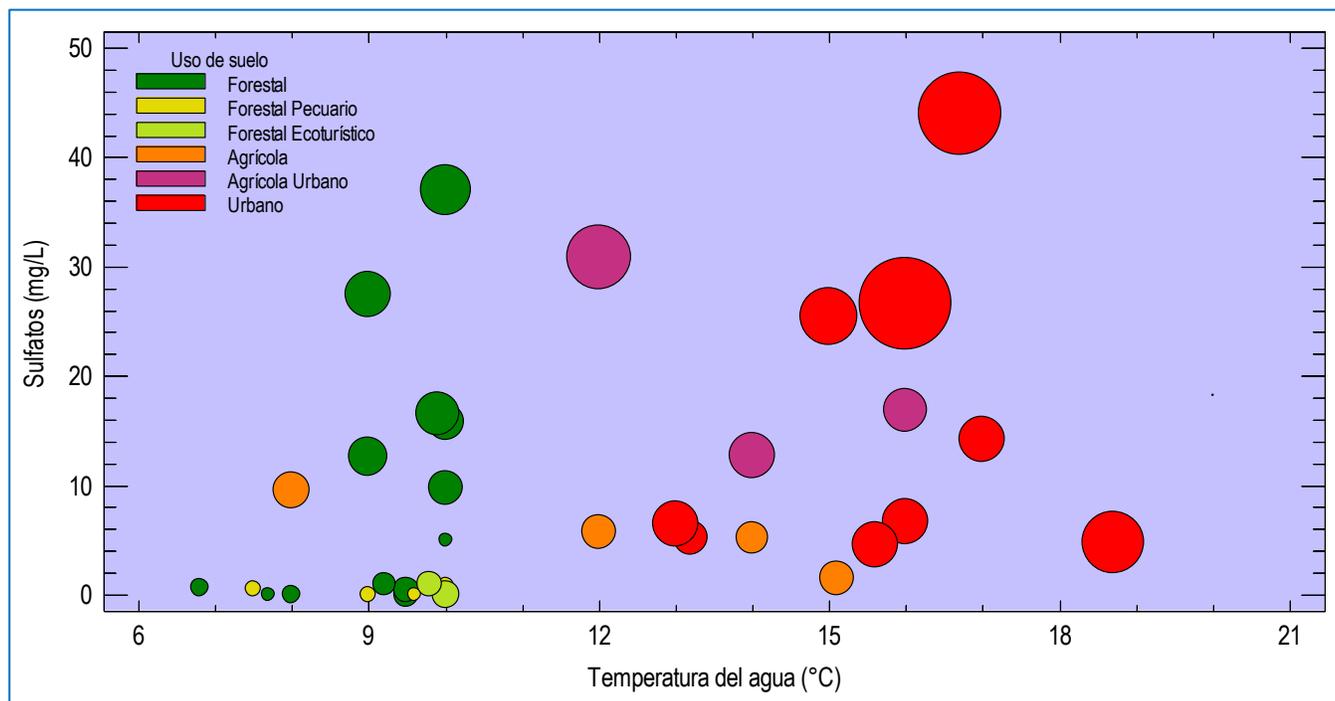


Figura 19. Sulfatos – STD – Temperatura del agua y usos de suelo.

La figura 19 explica el comportamiento de los sulfatos, los cuales presentan una correlación positiva con los STD y con la temperatura, sin embargo tiene una correlación negativa con el oxígeno, la reducción del sulfato por microorganismos produce una acumulación de sulfuro en el sedimento lo que a su vez crea una demanda química de oxígeno (Barnes & Mann, 1991). La relación entre sulfatos y sulfuros es inversa de acuerdo con el análisis, esto debido a las transformaciones donde el uso de sulfuro como un donador de electrones para la fotosíntesis anoxigénica, produce sulfato en un proceso

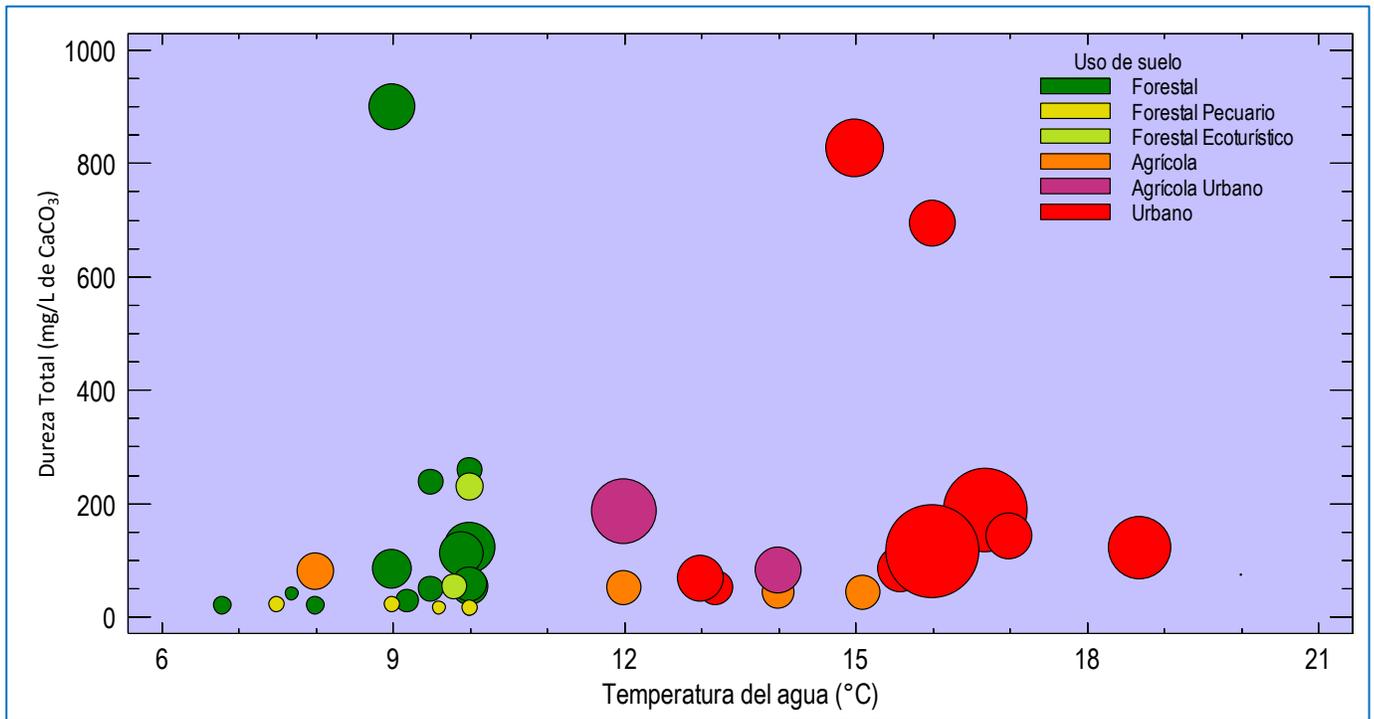


Figura 21. Dureza Total – STD – Temperatura del agua y usos de suelo.

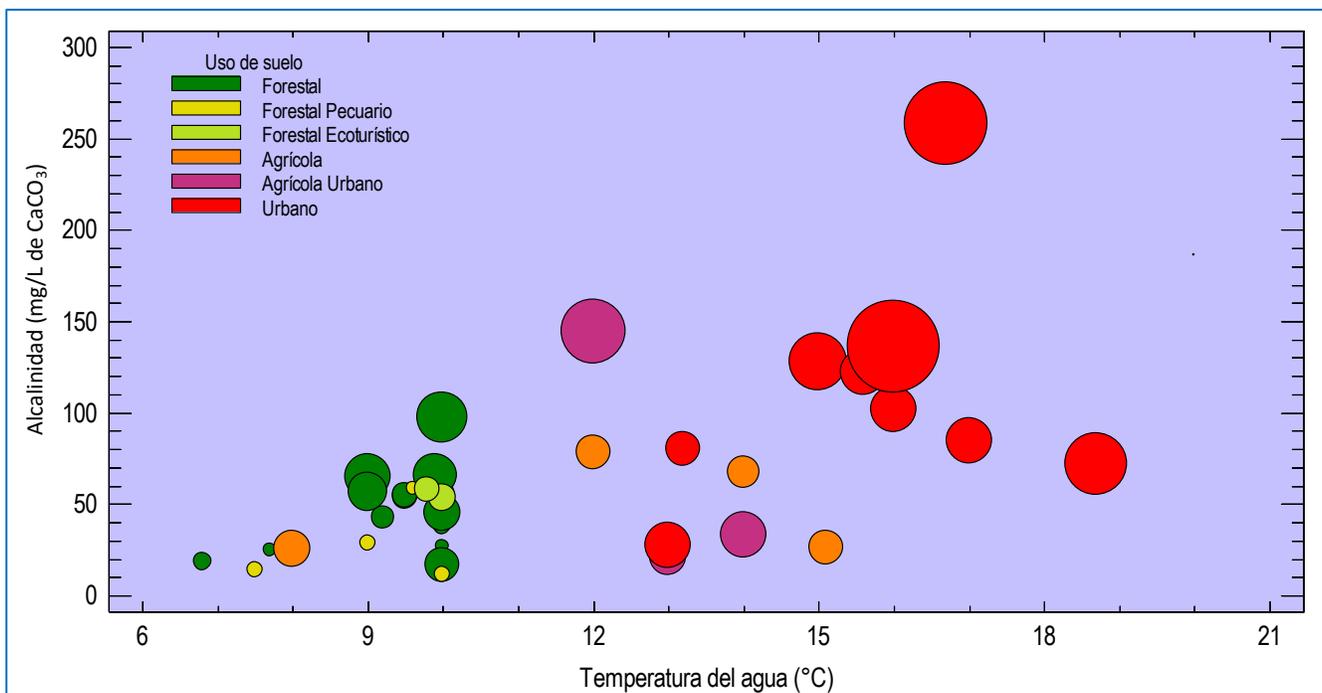


Figura 22. Alcalinidad–STD–Temperatura del agua y usos de suelo.



La dureza total (figura 21) se refiere a los iones de calcio y magnesio presentes en el agua. Según la clasificación del cuadro 9, los sitios con agua **Suave** son *Pilares* (26.326 mg CaCO₃/L) y *El Corral* (14.414 mg CaCO₃/L) con uso de suelo forestal; los sitios con agua **Ligeramente Dura** son de uso de suelo forestal *Cocoyuco* y *Rincón del Cocoyuco* y con uso de suelo agrícola *San Felipe Teotlalcingo 1* (41.641 mg CaCO₃/L) y *San Felipe Teotlalcingo 3* (58.058 mg CaCO₃/L).

Respecto a la alcalinidad (figura 22) los sitios *Pilares*, *Cocoyuco*, *Rincón del Cocoyuco*, *El Corral*, *Atzompa*, *Palo Obispo Manantial*, *Palo Obispo Río*, *Xoquititla*, *Pozo San Juan Tlale*, *Atzomaco*, *Río Cotzala Hidroeléctrica* y *San Felipe Teotlalcingo 1* presentan concentraciones de alcalinidad **Baja** según los rangos (cuadro 10) de Kevern *et al.* (1996), niveles bajos de alcalinidad podrían indicar una tendencia a la acidificación de las aguas (Margaleff, 2011) la acidificación se puede medirse mediante la disminución de la reserva alcalina, también representan la capacidad de amortiguamiento de los sistemas acuáticos continentales con importancia como indicador de productividad, con mayor disponibilidad de carbono en aquellos cuerpos de agua que presentan tendencias alcalinas (Guerra & Cruz, 2014). *Río Cotzala Represa*, *San Felipe Teotlalcingo 2*, *San Felipe Teotlalcingo 3*, *San Simón Atzitzintla*, *San Rafael Tlanalapan 1* y *Distrito Atoyac–Zahuapan* tienen alcalinidades **Medias** mientras que *San Rafael Tlanalapan 2* (192.796 mg CaCO₃/L) y *San Rafael Tlanalapan 3* (161.092 mg CaCO₃/L) tienen alcalinidades **Altas**, esto se debe a la naturaleza geológica de la cuenca de origen ígneo, por lo que generalmente las aguas se encuentran poco mineralizadas (Nilsson *et al.*, 1988) por ello sólo dos sitios localizados en zonas urbanas y con evidentes descargas domésticas presentan altas concentraciones de alcalinidad.

Cuadro 10. Clasificación de alcalinidad del agua (Kevern *et al.*, 1996; citado en Cortés & Vega, 2013).

| Rango | Alcalinidad (mg/L) |
|-------|--------------------|
| Baja | <75 |
| Media | 75 – 150 |
| Alta | >150 |



Clasificación.

Se aplicó análisis de conglomerados utilizando las siguientes variables: temperatura del agua, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, amonio, ortofosfatos, sólidos totales disueltos, dureza de calcio, dureza total, nitritos, alcalinidad y sulfatos que fueron elegidas mediante análisis de componentes principales. Como resultado se obtuvieron 4 grupos mediante el método de Ward y la distancia Euclidiana, el agrupamiento resultante se muestra en la figura 22. La distancia (medida de similitud) fue el indicador para seleccionar los grupos obtenidos. Generalmente el número de categorías es con base en el criterio del investigador (De la Garza *et al.*, 2013) en este caso se establecieron 4 grupos a partir de la distancia 50. El dendrograma muestra los sitios de muestreo agrupados en función de sus similitudes en las características físicas y químicas del agua usando como código de identificación el nombre de cada sitio e indicando entre paréntesis la temporada de muestreo (Lluvia o estiaje).

En el cuadro 12 se observa la lista de los nombres de los sitios, los cuales se encuentran dos veces debido a los muestreos en ambas temporadas. Se destaca que los sitios en rojo se ubican en grupos distintos, esto se podría atribuir a las diferencias de estacionalidad en los sistemas. Sin embargo se reubicaron en otro grupo (cuadro 11) de acuerdo a las características de los sitios de muestreo, tales como usos de suelo y las condiciones de alteración ambiental (positiva o negativa) que presentaban los sitios. Para ello se utilizaron las caracterizaciones ecológicas, en las cuales se puntualizó el estado de la vegetación, cercanía con vías de comunicación y transporte, así como de asentamientos humanos, zonas de cultivo y actividades agropecuarias en cada sitio según sea el caso.

Cuadro 11. Sitios que fueron ubicadas en dos grupos por el análisis de conglomerados.

| Sitio | Temporada | Grupo inicial | Grupo final |
|---------------------------|-----------|---------------|-------------|
| Atzompa | Seca | 3 | 2 |
| Río Cotzala (represa) | Seca | 3 | 2 |
| San Felipe Teotlalcingo 2 | Lluvia | 2 | 3 |
| San Rafael Tlanalapan 1 | Seca | 2 | 3 |
| San Simón Atzinzintla | Lluvia | 2 | 4 |

Atzompa (seca) se encuentra a una altitud de 3144 m s. n. m., el uso de suelo se considera forestal (pág. 58). El sitio se encuentra dentro de la zona de bienes comunales, por lo que el acceso al lugar no es libre. La vegetación está dominada por el género *Pinus*, y el suelo está cubierto en su mayoría por hojarasca de pino; el sitio no presentaba evidencia de desechos sólidos ni de explotación ganadera cercana, por lo que se reubicó del grupo 3 al grupo 2.

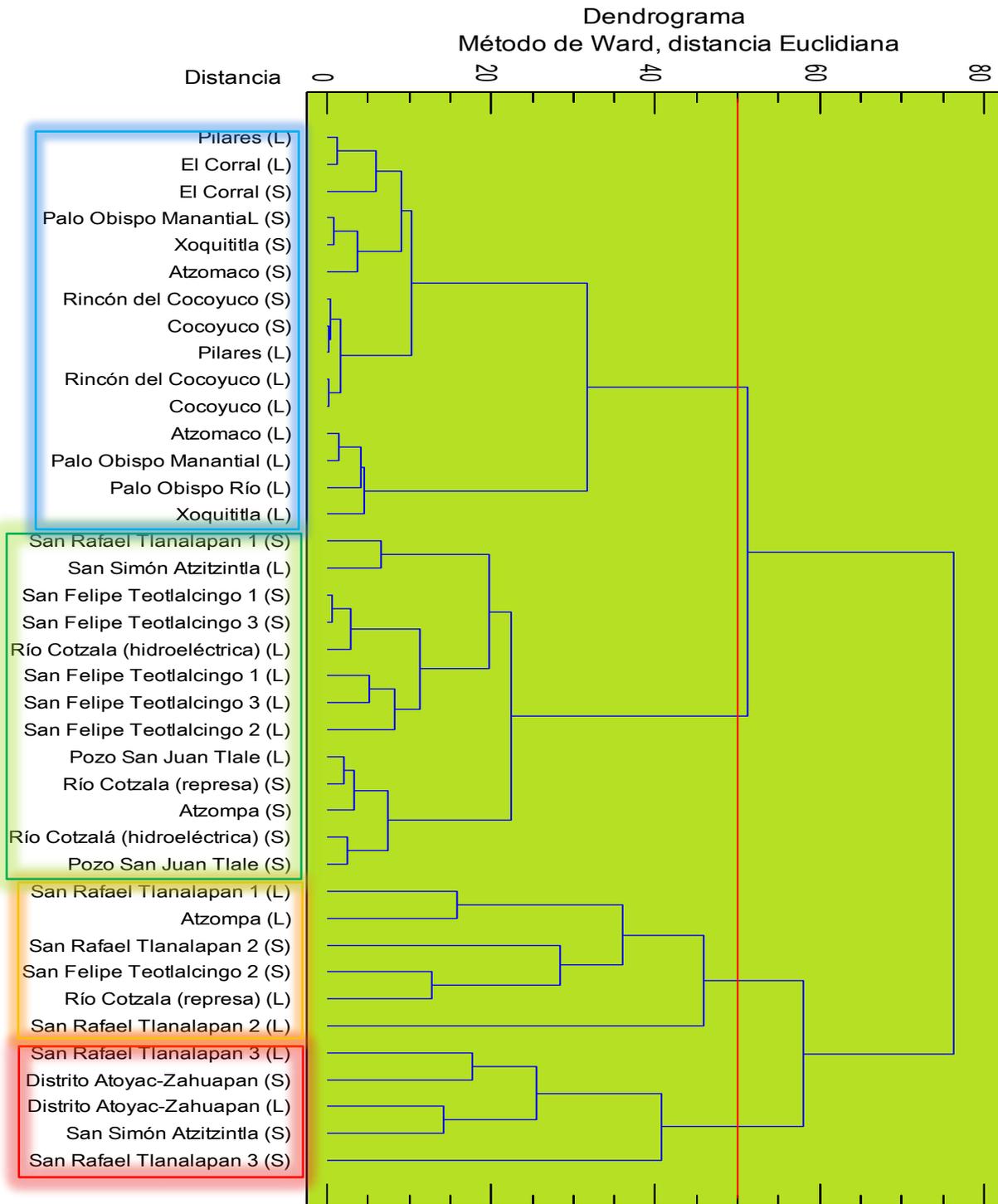


Figura 23. Grupos obtenidos *a priori*.
Nombre del sitio temporada y de muestreo; (L)= Lluvia; (S)=Seca.



Cuadro 12. Grupos resultantes en el dendrograma del análisis de conglomerados.

| Grupo | Sitio | Temporada |
|-------------------------|------------------------------|-----------|
| 1 | Pilares | Lluvia |
| | El Corral | Lluvia |
| | El Corral | Seca |
| | Palo Obispo Manantial | Seca |
| | Xoquititla | Seca |
| | Atzomaco | Seca |
| | Rincón del Cocoyuco | Seca |
| | Cocoyuco | Seca |
| | Pilares | Lluvia |
| | Rincón del Cocoyuco | Lluvia |
| | Cocoyuco | Luvia |
| | Atzomaco | Luvia |
| | Palo Obispo Manantial | Lluvia |
| | Palo Obispo Río | Lluvia |
| Xoquititla | Lluvia | |
| 2 | San Rafael Tlanalapan 1 | Seca |
| | San Simón Atzinzintla | Lluvia |
| | San Felipe Teotlalcingo 1 | Seca |
| | San Felipe Teotlalcingo 3 | Seca |
| | Río Cotzala (hidroeléctrica) | Lluvia |
| | San Felipe Teotlalcingo 1 | Lluvia |
| | San Felipe Teotlalcingo 3 | Lluvia |
| | San Felipe Teotlalcingo 2 | Lluvia |
| | Pozo San Juan Tlale | Lluvia |
| | Río Cotzala (represa) | Seca |
| | Atzompa | Seca |
| | Río Cotzala (hidroeléctrica) | Seca |
| | Pozo San Juan Tlale | Seca |
| 3 | San Rafael Tlanalapan 1 | Lluvia |
| | Atzompa | Lluvia |
| | San Rafael Tlanalapan 2 | Seca |
| | San Felipe Teotlalcingo 2 | Seca |
| | Río Cotzalá (represa) | Lluvia |
| 4 | San Rafael Tlanalapan 2 | Lluvia |
| | San Rafael Tlanalapan 3 | Lluvia |
| | Distrito Atoyac-Zahuapan | Seca |
| | Distrito Atoyac-Zahuapan | Lluvia |
| | San Simón Atzitzintla | Seca |
| San Rafael Tlanalapan 3 | Seca | |

Río Cotzala (represa), es un caso parecido al anterior, el sitio se encuentra a 2861 m s.n.m. antes de una represa (pág. 61), sin embargo en este sitio si existe una influencia de zonas de cultivo que se encuentran a mayor altitud.

San Felipe Teotlalcingo 2 (lluvia) es un arroyo que converge con el flujo que sale del manantial (*San Felipe Teotlalcingo 1*), el uso de suelo es agrícola, los cultivos de maíz y cilantro están delimitados por melgas de pera, manzana, ciruela y durazno. El lugar emanaba un olor desagradable ya que en él se descargan las aguas de riego de los cultivos (pág. 66). Este sitio en la época de lluvias se ubicó primero en el grupo dos esto puede ser atribuido a que los cultivos son de temporal ya que hay una mayor



dilución de los contaminantes presentes en el agua, sin embargo por las condiciones en las que se encontró el sitio y debido al uso que se le da a las tierras, se le reubicó en el grupo 3.

San Rafael Tlanalapan 1 (seca) es un manantial que se ubica en una zona urbana (pág. 70), se encuentra cerca de cultivos, calles y de un terreno usado como campo de fútbol por los habitantes de zona y aledaño a una propiedad privada con jardines y alberca (que en periodos de calor o vacacionales son abastecidos con agua del manantial). Se encuentra “cercado” en una caja de concreto sin tapa y con dos salidas para el agua que dan al arroyo. En el sitio hay presencia de desechos sólidos y olor desagradable. El análisis de conglomerados ubicó la temporada seca de este sitio en el grupo 2, sin embargo, las condiciones del sitio, el estado de la vegetación, el uso de suelo y su cercanía con la zona urbana fueron los fundamentos para reubicar a la temporada seca de este sitio en el grupo 3.

San Simón Atzitzintla (lluvia), es un sitio ubicado en una zona de cultivo de maíz y frijol, muy cercana a los asentamientos urbanos (pág. 68). El río intersecta una vialidad, lo que lo hace más vulnerable a perturbaciones. Los habitantes del lugar usan el río para lavar sus cosechas por lo que ingresan las camionetas al río. Durante el muestreo la corriente de agua sufrió cambios muy evidentes de agua con baja turbiedad a agua muy turbia y concentraciones de oxígeno disuelto que cambiaron de 7.46 mg O₂/L a 7.23 mg O₂/L, en el lecho del río se observaron rastros de las cosechas de frutos y legumbres que estaban siendo lavados en la corriente. Se considera que lo anterior es debido al cultivo de temporal en la zona ya que en la temporada seca no se presentó este cambio tan drástico en la corriente, además de que no había cosechas en las zonas adyacentes a la corriente. Con base en lo anterior se reubicó el sitio de San Simón Atzitzintla en época de lluvia en el grupo 4.

Características de los cuatro grupos:

- 1) ***Forestales (azul)***. El primer grupo fue denominado azul. Dentro de este grupo hay 8 sitios que se encuentran en altitudes que van de los 2700 a los 4050 m s.n.m. con un bajo impacto de la zona ribereña, sin presencia de desechos sólidos en el agua, hay 4 manantiales en este grupo que son Cocoyuco (entubado), Rincón del Cocoyuco, Palo Obispo Manantial y Xoquititla. Cocoyuco se encuentra entubado y protegido rústicamente con tablas y rocas. Los usos de suelo son: forestal, los cuales no presentan un uso intensivo para actividades como pastoreo, agricultura o silvicultura (5 sitios); forestal–pecuario, en estos sitios hay actividades de pastoreo, sin embargo la existencia del bosque permanece ya que no se practica la agricultura en estas zonas; (2 sitios) y forestal ecoturístico, sitios en los cuales hay un manejo por parte de los ejidatarios pero sólo para uso recreativo ya que cuentan con un truchero, un estanque artificial y pequeñas palapas para los visitantes (1 sitio).

La caracterización de las aguas *Forestales o Grupo 1* se muestra en el cuadro 13; las aguas que integran este grupo presentan nitrógeno en forma de amonio la concentración promedio en estas aguas es de 0.085 mg N-NH₄⁺/L, muy bajas de nitritos (máximo 0.002 mg N-NO₂⁻/L) y para nitrato es de [0.084 mg/L N-NO₃⁻]. Según el cuadro 8 de clasificación de dureza de agua, las aguas de este grupo son moderadamente duras con concentraciones promedio de 77.050 mg CaCO₃/L de, Xoquititla es el sitio



que presentó mayor concentración de dureza total. Los valores de alcalinidad que presenta en promedio este grupo es de 37.777 mg CaCO₃/L y una concentración promedio de sólidos totales disueltos 20.200 mg/L. Los sulfuros presentan un intervalo de concentración de 0.640 – 20.000 mg SO₄²⁻/L. Dentro de este grupo se encuentran aguas de 4 manantiales que son *Cocoyuco, Rincón del Cocoyuco, Palo Obispo Manantial y Xoquititla*; y aguas de 4 ríos (*Pilares, El Corral, Palo Obispo Río y Atzomaco*).

Cuadro 13. Caracterización del Grupo 1, *Aguas Forestales o Azules*, de acuerdo con los componentes principales obtenidos anteriormente.

| Parámetro | Promedio | Mínimo | Máximo |
|--|----------|--------|---------|
| TEMP (°C) | 9.107 | 6.8 | 10 |
| CE (µS) | 38 | 18 | 67 |
| O ₂ D (mg/L) | 7.467 | 5.910 | 9.090 |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 0.084 | ND | 0.304 |
| N-NH ₄ ⁺ (mg/L) | 0.085 | ND | 0.252 |
| P-PO ₄ ³⁻ (mg/L) | 0.063 | ND | 0.395 |
| STD (mg/L) | 20.200 | 9 | 36 |
| D-Ca (mg/L) | 61.940 | 4.204 | 242.722 |
| D-Tot (mg/L) | 77.050 | 12.613 | 256.592 |
| N-NO ₂ ⁻ (mg/L) | ND | ND | 0.002 |
| Alc-T (mg/L) | 37.777 | 11.124 | 58.504 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 0.623 | ND | 5.023 |

ND = No detectable con el método utilizado

El grupo azul presenta valores de DBO₅ promedio de 0.833 mg O₂/L y para DQO de 36.766 mg O₂/L.

- 2) ***Forestal-agrícola (verde)***. Sitios ubicados en altitudes que van de los 2300 a los 3100 m s.n.m., con usos de suelo: forestal, agrícola y urbano. En este grupo se ubican dos manantiales, uno dentro de una zona forestal y otro dentro de una zona de cultivo. El primero tiene un manejo para riego de cultivos de la zona; el segundo está justo entre los cultivos del sitio. Los sitios con usos de suelo forestales se ubicaron aquí debido a que hay presencia de actividades en zonas indirectas a ellos, pero que finalmente impactan en estos sitios visiblemente. Sólo hay un sitio con uso de suelo urbano en este grupo, sin embargo, el punto de muestreo se ubica después de un arroyo y un manantial, el cual debe de ayudar a la capacidad de autodepuración del agua y por ende el análisis de conglomerados ubicó a este sitio en el grupo 3. Se observa una transición en este grupo, de usos de suelo que van en función de la altitud de los sitios, lo que bosqueja un primer plano de uso intensivo de las tierras que se refleja en la calidad del agua.

Las aguas del *Grupo 2 o Aguas Forestal-agrícola* se caracterizan por una temperatura promedio de 13.3°C (cuadro 14), presenta valores promedio de DBO₅ = 1.358 mg O₂/L y de DQO = 47.526 mg O₂/L. Son aguas consideradas *duras* de acuerdo con la clasificación del cuadro 8. Sin embargo en cuanto a oxígeno disuelto presenta un rango de concentraciones parecidas al grupo 1. Las concentraciones de nitratos en las aguas verdes son mayores que en las aguas azules, sin embargo existe un comportamiento similar en amonio y nitritos con concentraciones máximas de nitritos para ambos grupos de 0.002 mg N-NO₂⁻/L y las concentraciones promedio de amonio para el grupo 1 =



0.085 mg N-NH₄⁺/Ly para el grupo 2 = 0.088 mg N-NH₄⁺/L La alcalinidad total, los STD y la conductividad eléctrica presentan valores mayores que en el grupo de aguas azules.

Cuadro 14. Caracterización del Grupo 2, *Aguas Forestal–agrícolas o Verdes*, de acuerdo con los componentes principales.

| Parámetro | Promedio | Mínimo | Máximo |
|--|----------|--------|---------|
| TEMP (°C) | 13.317 | 8.3 | 21 |
| CE (μS) | 156.417 | 109 | 248 |
| O ₂ D (mg/L) | 8.226 | 7.66 | 9.13 |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 0.547 | 0.002 | 2 |
| N-NH ₄ ⁺ (mg/L) | 0.088 | ND | 0.360 |
| P-PO ₄ ³⁻ (mg/L) | 0.103 | 0.032 | 0.227 |
| STD (mg/L) | 77.417 | 54 | 124 |
| D–Ca (mg/L) | 82.186 | 24.825 | 527.055 |
| D–Tot (mg/L) | 137.335 | 40.841 | 898.073 |
| N-NO ₂ ⁻ (mg/L) | 0.001 | ND | 0.002 |
| Alc-T (mg/L) | 54.205 | 16.48 | 97.232 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 12.728 | 1.533 | 36.932 |

ND = No detectable con el método utilizado

- 3) ***Agro–urbano (amarillo)***. En este grupo los usos de suelo son agrícola–urbano, donde se practica la agricultura de temporal, pero estos cultivos son adyacentes a las zonas urbanas o bien se encuentran inmersas en ella (1 sitio); y urbano, sitios de muestreo ubicados dentro de las zonas urbanas y presentan alto impacto por la presencia de desechos sólidos, olor desagradable, agua muy turbia (2 sitios), y la presencia de un manantial, el cual, por su ubicación dentro de un asentamiento urbano fue posicionado en este grupo. El agua de este grupo presenta valores promedio de DBO₅ = 4.878 mg O₂/L de y de DQO = 69.253 mg O₂/L.

Cuadro 15. Caracterización del Grupo 3, *Aguas Agro–urbanas o Amarillas*, de acuerdo con los componentes principales.

| Parámetro | Promedio | Mínimo | Máximo |
|--|----------|--------|---------|
| TEMP (°C) | 14.717 | 12 | 16.7 |
| CE (μS) | 315.833 | 152 | 707 |
| O ₂ D (mg/L) | 6.181 | 2.78 | 10.956 |
| N-NO ₃ ⁻ (mg/L) | 0.547 | 0.026 | 1.650 |
| N-NH ₄ ⁺ (mg/L) | 3.821 | ND | 13.525 |
| P-PO ₄ ³⁻ (mg/L) | 0.082 | 0.024 | 0.142 |
| STD (mg/L) | 170.167 | 66 | 353 |
| D–Ca (mg/L) | 225.322 | 53.654 | 613.741 |
| D–Tot (mg/L) | 339.144 | 62.462 | 825.256 |
| N-NO ₂ ⁻ (mg/L) | 0.042 | ND | 0.238 |
| Alc-T (mg/L) | 129.099 | 21.012 | 257.912 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 19.612 | 4.518 | 43.929 |

ND = No detectable con el método utilizado



En el grupo 3 o agrícola se nota un incremento de la temperatura con respecto a los dos grupos anteriores, presentando un intervalo de 12° a 16° C y el promedio de temperatura de este grupo está cinco grados por encima del promedio del grupo 1.

- 4) ***Urbano (rojo)***. En este grupo se encuentran sitios con usos de suelo agrícola – urbano (1 sitio) y urbano (2 sitios), los cuales representan los sitios de muestreo con altitudes más bajas (2200 – 2300 m s. n. m.), uno de ellos es *San Simón Atzitzintla* que representa la salida de la subcuenca de San Martín Texmelucan. Las condiciones de *San Simón Atzitzintla*, *San Rafael Tlanalapan 3* y *Distrito Atoyac–Zahuapan* son altamente perturbadas debido a la convergencia directa con las zonas urbanas, vías de transporte y desechos domésticos tanto sólidos como aguas residuales. Este grupo representa las aguas más contaminadas de todos los sitios de muestreo. Las aguas de este grupo presenta valores promedio de $DBO_5 = 1.467 \text{ mg O}_2/\text{L}$ y de $DQO = 127.993 \text{ mg O}_2/\text{L}$.

Cuadro 16. Caracterización del Grupo 4, *Aguas Urbanas o Rojas*, de acuerdo con los componentes principales.

| Parámetro | Promedio | Mínimo | Máximo |
|--|----------|--------|---------|
| TEMP (°C) | 16.95 | 14 | 20 |
| CE (µS) | 437.833 | 186 | 849 |
| O ₂ D (mg/L) | 3.594 | 0.15 | 7.48 |
| N-NO ₃ ⁻ (mg/L) | 6.534 | 0.393 | 24.2 |
| N-NH ₄ ⁺ (mg/L) | 9.855 | 0.090 | 20.460 |
| P-PO ₄ ³⁻ (mg/L) | 0.681 | 0.205 | 1.231 |
| STD (mg/L) | 186.200 | 93 | 424 |
| D-Ca (mg/L) | 68.602 | 46.046 | 92.893 |
| D-Tot (mg/L) | 101.368 | 72.873 | 140.540 |
| N-NO ₂ ⁻ (mg/L) | 0.011 | 0.001 | 0.032 |
| Alc-T (mg/L) | 108.493 | 32.96 | 186.224 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 15.577 | 4.812 | 26.629 |

La clasificación de los recursos establecida se aprecia en el cuadro 17, para la cual fue utilizado el análisis estadístico y las caracterizaciones ecológicas para establecer una ordenación de los recursos hídricos que reflejan las condiciones de los sitios de muestreo, tales como los usos de suelo y las características físicas y químicas del agua.

Para comprobar que las aguas de cada sitio de muestreo se hayan ubicado de manera correcta se realizó un análisis de discriminantes (AD) con los grupos del cuadro 12 resultantes del AC antes de modificarlos, para ello se seleccionaron las variables utilizadas en el AC, las cuales no presentaron altos coeficientes de correlación entre sí. Cabe recordar que las variables más representativas del sistema fueron previamente seleccionadas mediante ACP. Las variables utilizadas para el AD fueron:



temperatura del agua, oxígeno disuelto, alcalinidad, dureza total, nitritos, amonio, ortofosfatos y sulfatos.

Cuadro 17. Clasificación preliminar de los sitios de muestreo de acuerdo con el criterio del análisis de conglomerados y la caracterización ecológica en campo.

| Grupo | Sitio | Temporada | Altitud | Uso de suelo |
|--------------------------|------------------------------|-----------|----------|--|
| Forestal | Pilares | Lluvia | 4054 | Forestal |
| | Pilares | Lluvia | 4054 | Forestal |
| | Cocoyuco | Seca | 3745 | Forestal (manantial) |
| | Cocoyuco | Lluvia | 3745 | Forestal (manantial) |
| | Rincón del Cocoyuco | Seca | 3729 | Forestal Pecuario (manantial entubado) |
| | Rincón del Cocoyuco | Lluvia | 3729 | Forestal Pecuario (manantial entubado) |
| | El Corral | Seca | 3593 | Forestal Pecuario |
| | El Corral | Lluvia | 3593 | Forestal Pecuario |
| | Palo Obispo Manantial | Seca | 2917 | Forestal (manantial) |
| | Palo Obispo Manantial | Lluvia | 2917 | Forestal (manantial) |
| | Palo Obispo Río | Lluvia | 2897 | Forestal |
| | Xoquititla | Seca | 2821 | Forestal Ecoturístico (manantial) |
| | Xoquititla | Lluvia | 2821 | Forestal Ecoturístico (manantial) |
| | Atzomaco | Seca | 2744 | Forestal |
| Atzomaco | Lluvia | 2744 | Forestal | |
| Forestal – agrícola | Atzompa | Seca | 3144 | Forestal |
| | Atzompa | Lluvia | 3144 | Forestal |
| | Río Cotzalá (represa) | Seca | 2861 | Forestal |
| | Río Cotzala (represa) | Lluvia | 2861 | Forestal |
| | Pozo San Juan Tlale | Seca | 2746 | Forestal (manantial) |
| | Pozo San Juan Tlale | Lluvia | 2746 | Forestal (manantial) |
| | Río Cotzalá (hidroeléctrica) | Seca | 2713 | Agrícola |
| | Río Cotzalá (hidroeléctrica) | Lluvia | 2713 | Agrícola |
| | San Felipe Teotlalcingo 1 | Seca | 2386 | Agrícola (manantial) |
| | San Felipe Teotlalcingo 1 | Lluvia | 2386 | Agrícola (manantial) |
| Agro – urbano | San Felipe Teotlalcingo 3 | Seca | 2380 | Urbano |
| | San Felipe Teotlalcingo 3 | Lluvia | 2380 | Urbano |
| | San Felipe Teotlalcingo 2 | Seca | 2388 | Agrícola Urbano |
| | San Felipe Teotlalcingo 2 | Lluvia | 2388 | Agrícola Urbano |
| | San Rafael Tlanalapan 1 | Seca | 2272 | Urbano (manantial) |
| | San Rafael Tlanalapan 1 | Lluvia | 2272 | Urbano (manantial) |
| Urbano | San Rafael Tlanalapan 2 | Seca | 2272 | Urbano |
| | San Rafael Tlanalapan 2 | Lluvia | 2272 | Urbano |
| | San Simón Atzitzintla | Seca | 2314 | Agrícola Urbano |
| | San Simón Atzinzintla | Lluvia | 2314 | Agrícola Urbano |
| | San Rafael Tlanalapan 3 | Seca | 2279 | Urbano |
| | San Rafael Tlanalapan 3 | Lluvia | 2279 | Urbano |
| Distrito Atoyac-Zahuapan | Distrito Atoyac-Zahuapan | Seca | 2235 | Urbano |
| | Distrito Atoyac-Zahuapan | Lluvia | 2235 | Urbano |



Análisis de discriminantes.

Es una técnica de clasificación o asignación de un elemento a un grupo del cual se conocen sus atributos que busca identificar las diversas opciones o situaciones que se pueden dar en una variable, además explica las razones de esas diferencias; su objetivo principal es encontrar la combinación lineal de las variables independientes que permita diferenciar de la mejor manera a los grupos o niveles que la variable dependiente tiene. Una vez que se encuentra la función, ésta puede utilizarse para clasificar nuevos elementos, es decir, pronosticar (De la Garza *et al.*, 2013).

Lo anterior se realizó para comprobar si la clasificación que se hizo *a priori* mediante AC es correcta y entender qué variables están explicando dicha clasificación. Este análisis fue aplicado a un conjunto de funciones discriminantes que ayudan a predecir la clasificación basándose en valores de otras variables cuantitativas. Fueron utilizados 39 casos para desarrollar el modelo que discrimina entre los 4 niveles de clasificación, teniendo en cuenta que cuando dos variables están muy correlacionadas entre sí, son, en parte, redundantes y pueden sustituirse por una nueva variable sencilla (Margaleff, 2011) se utilizaron 8 variables como predictores. En la cuadro 18 se muestran las variables utilizadas y las tres funciones discriminantes calculadas.

Cuadro 18. Coeficientes estandarizados de funciones discriminantes para la clasificación.

| | 1 | 2 | 3 |
|--|------------------|-----------|-----------|
| Temperatura del Agua | -0.787758 | -1.22527 | -0.487184 |
| Oxígeno Disuelto mg/L | -0.535267 | -0.426452 | -0.539455 |
| Alcalinidad mg CaCO ₃ /L | 0.60595 | 0.792179 | 0.675539 |
| Dureza Total mg CaCO ₃ /L | -0.195139 | 0.0683757 | 0.265906 |
| Nitritos mg N-NO ₂ ⁻ /L | 0.98574 | -0.287238 | 0.403654 |
| Amonio mg N-NH ₄ ⁺ /L | -1.20293 | 0.617128 | 0.0504457 |
| Ortofosfatos mg P-PO ₄ ³⁻ /L | -0.899683 | 0.239481 | -0.175883 |
| Sulfatos mg SO ₄ ²⁻ /L | -0.284898 | -1.45444 | -0.132163 |

Las funciones obtenidas obedecen el siguiente modelo:

$$FD = -0.787758 * \text{Temperatura del Agua} - 0.535267 * \text{Oxígeno Disuelto} + 0.60595 * \text{Alcalinidad} - 0.195139 * \text{Dureza Total} + 0.98574 * \text{Nitritos} - 1.20293 * \text{Amonio} - 0.899683 * \text{Ortofosfatos} - 0.284898 * \text{Sulfatos}$$

En el cuadro de funciones discriminantes (cuadro 19) se indica la cantidad de varianza que explica cada función. La primera columna indica la función discriminante, la columna de *Valor Propio* indica la cantidad de variación que se explica por medio de la función calculada, en este caso la función 1 presenta un *Valor Propio* = 11.5613, lo que significa que explica la mayor parte de los datos incluidos en este análisis a diferencia de las funciones 2 y 3 que presentan valores de 2.77893 y 0.596539



respectivamente. Los valores del coeficiente de correlación canónica indican la relación entre cada grupo de clasificación y los valores de las variables usadas en cada función discriminante.

Cuadro 19. Funciones discriminantes.

| <i>Función Discriminante</i> | <i>Valor Propio</i> | <i>Porcentaje Relativo</i> | <i>Correlación Canónica</i> |
|------------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 11.5613 | 77.40% | 0.95937 |
| 2 | 2.77893 | 18.60% | 0.85754 |
| 3 | 0.596539 | 3.99% | 0.61127 |

Los valores de este coeficiente de correlación canónica van de cero a 1, por lo tanto en este análisis las funciones 1 = 0.959337 y 2 = 0.85754 tienen una fuerte relación con los grupos de clasificación, es decir, las variables usadas para calcular las funciones 1y 2 ayudan a describir y separar cada uno de los 4 grupos obtenidos en la clasificación *a priori* obtenida en el análisis de conglomerados; la función 3 no marca una separación tan representativa entre los cuatro grupos.

En el cuadro 20 están los valores de lambda de Wilks (Λ), los cuales indican el nivel de discriminación de cada función para los grupos, valores cercanos a cero indican mucha discriminación, es decir, para la función 1 = 0.0131952 los grupos están muy separados o bien existen muchas diferencias entre ellos, lo anterior también es igual para la función 2 = 0.165749; ambas funciones indican que existe una heterogeneidad entre los 4 grupos de la clasificación. Por otro lado, la función 3 tiene un valor de 0.626355, lo que significa que en esta función los grupos se presentan más homogéneos.

Cuadro 20. Grado de diferencias entre grupos.

| <i>Funciones derivadas</i> | Λ Wilks | X^2 | <i>gl</i> | <i>Valor de P</i> |
|----------------------------|------------------|-----------------|-----------|-------------------|
| 1 | 0.0131952 | 138.4928 | 24 | 0.0000 |
| 2 | 0.165749 | 57.5129 | 14 | 0.0000 |
| 3 | 0.626355 | 14.9708 | 6 | 0.0205 |

Los valores de P explican, con un nivel de confianza del 95%, que las tres funciones son buenas para discriminar entre los cuatro grupos resultantes del análisis de conglomerados, sin embargo, la función número 1 es la más eficiente para ello.

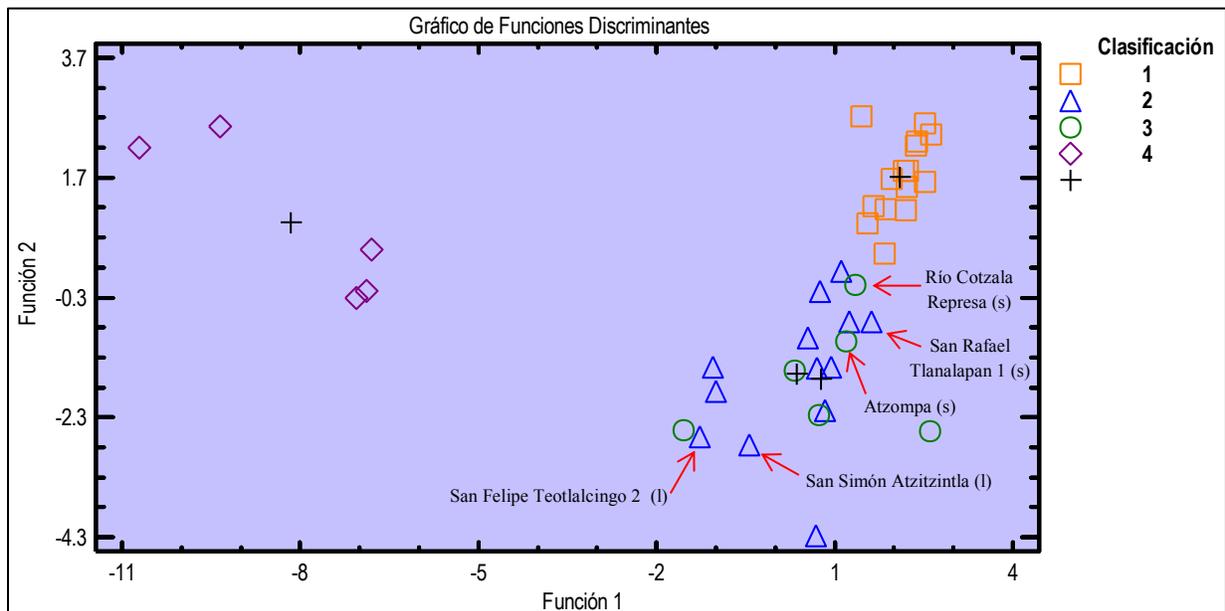


Figura 24. Gráfico de dispersión de los grupos 1 y 4.

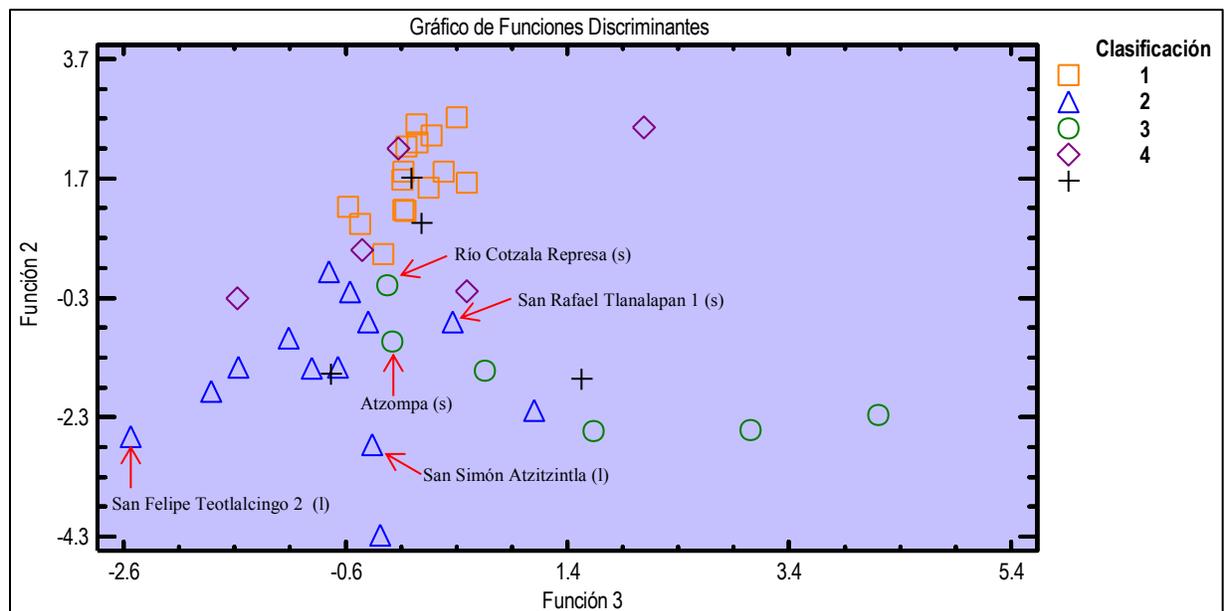


Figura 25. Gráfico de dispersión de los grupos 2 y 3.

Cada una de las funciones separa de manera distinta a los grupos, en la figura 25 se muestra que la función 1 separa a los grupos 1 y 4, pero los grupos 2 y 3 se muestran homogéneos; a diferencia de la figura 26 donde los grupos 2 y 3 están siendo separados, pero el 1 y el 4 se muestran homogéneos. Los casos atípicos se muestran señalados en ambas figuras (flechas rojas) son *San Felipe Teotlalcingo 2 (lluvia)*, *Atzompa (seca)*, *San Rafael Tlanalapan 1 (seca)*, *San Simón Atzitzintla (lluvia)* y *Río Cotzala Represa (seca)*, los cuales son difíciles de clasificar y están señalados en la tabla de clasificación con un asterisco en el anexo I.



El análisis indica que la función 1 es la que mejor discrimina entre grupos. El modelo permitirá predecir la clasificación de nuevos casos (nuevos sitios de muestreo y aguas de acuerdo con las 8 variables usadas). Los coeficientes para ubicar cada sitio y aguas dentro de uno de los 4 grupos se encuentran en el cuadro 21 en el cual se observa que las variables que mayor peso tuvieron al asociar los sitios de muestreo a cada uno de los cuatro grupos (en orden de importancia) los ortofosfatos y el oxígeno disuelto; las variables cuyos valores son negativos fueron usadas para identificar cuáles sitios **no** pertenecen, al menos, a tres de los cuatro grupos fueron los nitritos y la alcalinidad.

Cuadro 21. Coeficientes de la función de clasificación para cada grupo.

| | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> |
|----------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Temperatura del Agua | 5.35648 | 7.93842 | 7.34736 | 9.38595 |
| Oxígeno Disuelto | 10.9923 | 12.7854 | 11.8634 | 14.7901 |
| Alcalinidad | <u>-0.0330236</u> | <u>-0.129794</u> | <u>-0.090037</u> | <u>-0.190781</u> |
| Dureza Total | 0.00840595 | 0.00800186 | 0.0106635 | 0.0186873 |
| Nitritos | <u>-198.121</u> | <u>-227.288</u> | <u>-190.377</u> | <u>-468.3</u> |
| Amonio | 2.66409 | 2.67429 | 2.52233 | 6.72327 |
| Ortofosfatos | 51.044 | 58.0686 | 51.9182 | 121.048 |
| Sulfatos | 0.658418 | 1.29751 | 1.26353 | 1.13671 |
| Constante | -68.3967 | -109.613 | -99.2141 | -186.176 |

Una vez obtenido el modelo de clasificación, se aplica para cada uno de los sitios de muestreo (en cada temporada), cada grupo obedece a su propia función (obtenida a partir del modelo de clasificación general), con los coeficientes propios del grupo:

$$FD_{\text{Grupo 1}} = -68.3967 + 5.35648 * \text{Temperatura del Agua} + 10.9923 * \text{Oxígeno Disuelto} - 0.0330236 * \text{Alcalinidad} + 0.00840595 * \text{Dureza Total} - 198.121 * \text{Nitritos} + 2.66409 * \text{Amonio} + 51.044 * \text{Ortofosfatos} + 0.658418 * \text{Sulfatos}$$

$$FD_{\text{Grupo 2}} = -109.613 + 7.93842 * \text{Temperatura del Agua} + 12.7854 * \text{Oxígeno Disuelto} - 0.129794 * \text{Alcalinidad} + 0.00800186 * \text{Dureza Total} - 227.228 * \text{Nitritos} + 2.67429 * \text{Amonio} + 58.0686 * \text{Ortofosfatos} + 1.2975 * \text{Sulfatos}$$

$$FD_{\text{Grupo 3}} = -99.2141 + 7.34736 * \text{Temperatura del Agua} + 11.8634 * \text{Oxígeno Disuelto} - 0.090037 * \text{Alcalinidad} + 0.0106635 * \text{Dureza Total} - 190.377 * \text{Nitritos} + 2.52233 * \text{Amonio} + 51.9182 * \text{Ortofosfatos} + 1.26353 * \text{Sulfatos}$$

$$FD_{\text{Grupo 4}} = -186.176 + 9.38595 * \text{Temperatura del Agua} + 14.7901 * \text{Oxígeno Disuelto} - 0.190781 * \text{Alcalinidad} + 0.0186873 * \text{Dureza Total} - 468.3 * \text{Nitritos} + 2.66409 * \text{Amonio} + 121.048 * \text{Ortofosfatos} + 1.13671 * \text{Sulfatos}$$



Una vez obtenido el modelo discriminante se obtuvieron los porcentajes de clasificación (cuadro 22), la cual indica el porcentaje de casos correctamente clasificados por grupo y en total. Estos porcentajes de clasificación permiten verificar si el cuadro 17 de clasificación preliminar tiene la información correcta de los grupos, la cual se obtuvo a partir del AC con ayuda de las caracterizaciones ecológicas de cada sitio, como usos de suelo y grado de perturbación. Con ello se organizaron los grupos que presentaban características semejantes en función del estado de los ambientes ribereños.

Cuadro 22. Porcentajes de clasificación.

| Clasificación actual | Tamaño del grupo | Predicción Clasificación | | | |
|----------------------|------------------|--------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------|
| | | 1 Forestal (Azul) | 2 Forestal – Agrícola (Verde) | 3 Agro – Urbano (Amarillo) | 4 Urbano (Rojo) |
| 1 | 15 | 15 (100.00%) | 0 (0.00%) | 0 (0.00%) | 0 (0.00%) |
| 2 | 13 | 0 (0.00%) | 11 (84.62%) | 2 (15.38%) | 0 (0.00%) |
| 3 | 6 | 0 (0.00%) | 2 (33.33%) | 4 (66.67%) | 0 (0.00%) |
| 4 | 5 | 0 (0.00%) | 0 (0.00%) | 0 (0.00%) | 5 (100.00%) |

Porcentaje de casos clasificados correctamente: **89.74%**

Según el AD, de los 13 casos que pertenecen al grupo dos, el 84.62%, es decir, 11 observaciones están correctamente clasificadas en el grupo dos, el 33.33% restante debería de estar en el grupo tres (anexo II). Estos sitios son *Atzompa (lluvia)* y *San Rafael Tlanalapan (seca)*.

En el grupo tres hay un 66.67% de casos correctamente clasificados, el 15.38% restante debería de pertenecer al grupo dos, es decir, de los seis sitios que conforman al grupo tres, dos de ellos pertenecen al grupo dos (anexo II). Estos sitios son *Atzompa (seca)* y *Río Cotzala represa (seca)*.

Para los grupos uno y cuatro en análisis indica 100% de casos correctamente clasificados, es importante aclarar que el grupo uno es principalmente forestal y el grupo cuatro corresponde a casos urbanos. Esto implica que las características químicas y físicas evaluadas difieren tanto entre estos dos grupos que el análisis indica valores altos discriminatorios entre estos dos grupos.

El porcentaje de casos clasificados correctamente es el indicador de la eficacia del modelo obtenido, en este caso fue de 89.74%, este valor indica que es eficiente para predecir a qué grupo pertenecen las nuevas observaciones que se deseen realizar.



Mapa de clasificación.

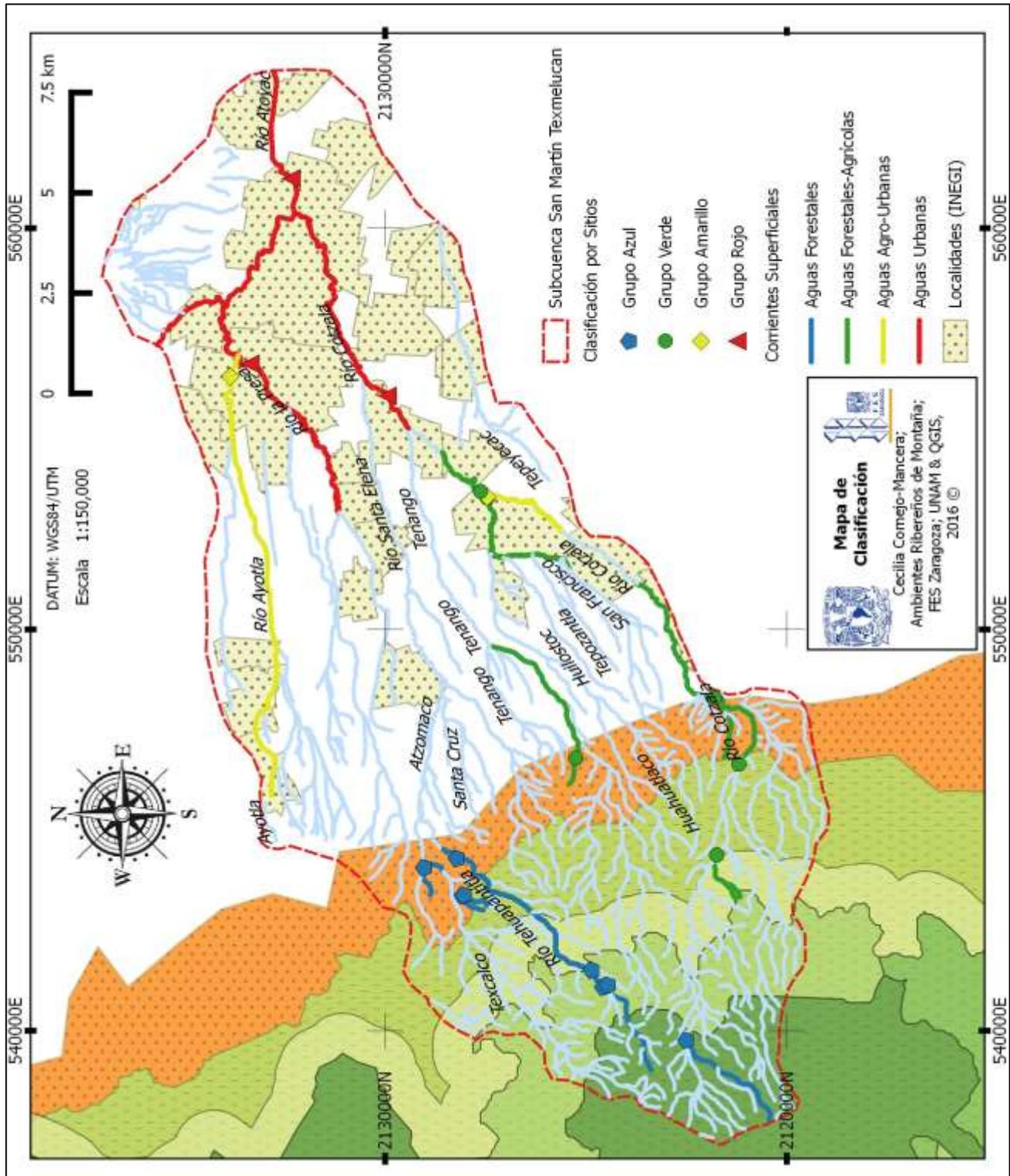


Figura 26. Mapa de clasificación.



En la figura 26 se pueden observar las aguas clasificadas, el Río Cotzala presenta los cuatro tipos de aguas a lo largo de su corriente. Los ríos Atzomaco, Tehuapantitla presentan aguas verdes; el río Ayotla presenta aguas amarillas al igual que un tramo del río Cotzala. Finalmente los ríos La Presa, la parte más baja del río Cotzala y el río Atoyac presentan aguas rojas, las cuales son las más contaminadas.

Las aguas *Forestales* o *Azules* se encuentran dentro de las zonas de Preservación, Uso Público y de Influencia del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PNIP) y en la Zona Exterior de la Reserva de la Biósfera de Los Volcanes (RBLV) en un rango altitudinal que va desde los 2744 a los 4050 m s. n. m. Los sitios *Palo Obispo Manantial* y *Palo Obispo Río* corresponden al municipio de Santa Rita Tlahuapan, mientras que *Pilares*, *Atzomaco*, *Xoquititla Rincón del Cocoyuco*, *Cocoyuco* y *El Corral* pertenecen a San Salvador el Verde, municipio en el que se ubica el sitio con menor elevación (*Atzomaco* 2744 m s. n. m.) del grupo Forestal o Verde.

Las aguas *Forestal-agrícola* o *Verdes* se ubicaron dentro de las zonas de Amortiguamiento y Exterior de la RBLV y en la Zona de Cultivo o Agrícola según la caracterización para esta zona de INEGI (2012) los sitios van desde los 2380 a los 3144 m s. n. m., los sitios *Atzompa*, *Río Cotzala Represa*, *Río Cotzala Hidroeléctrica* pertenecen al municipio de Chiautzingo y corresponden al río Cotzala; *Pozo San Juan Tlale*, *San Felipe Teotlalcingo 1* y *San Felipe Teotlalcingo 3* corresponden al municipio de San Felipe Teotlalcingo y son parte del río Cotzala, principalmente son zonas con uso de suelo agrícola excepto *Pozo San Juan Tlale* que está alejado de la zona agrícola pero tiene un manejo por parte de los pobladores y es parte de los tributarios del río Tenango; la mayor presión se encuentra en el municipio de San Felipe Teotlalcingo ya que en la zona se practica mayormente la agricultura.

El grupo de aguas *Agro – urbanas* o *Amarillas* son sitios con una elevación entre los 2272 y 2388 m s. n. m., este grupo fue el más difícil de categorizar porque refleja características de cambios entre la zona agrícola y urbana, los sitios de este grupo son *San Felipe Teotlalcingo 2* (río Cotzala) en el municipio San Felipe Teotlalcingo, y *San Rafael Tlanalapan 1* y *2* en el municipio de San Martín Texmelucan correspondientes al río Ayotla.

Finalmente las aguas del grupo *Rojo* o *Urbano* son las que se ubican a una menor elevación (2235 – 2314 m s. n. m.) son sitios que interactúan directamente con los asentamientos humanos. *San Simón Atzitzintla* ubicado en San Salvador el Verde justo en la unión de los ríos Tenango y Cotzala. *San Rafael Tlanalapan 3*, en el municipio de San Martín Texmelucan, correspondiente al río La Presa antes de que éste se una con las aguas del río Ayotla. Distrito *Atoyac-Zahuapan* es el sitio que representa la salida de la cuenca en el municipio de San Martín Texmelucan, ubicado después de la unión del río Cotzala con el Atoyac. Estos sitios son los más perturbados, las corrientes intersectan con vías de transporte terrestre y comunidades que vierten numerosos desechos al agua.

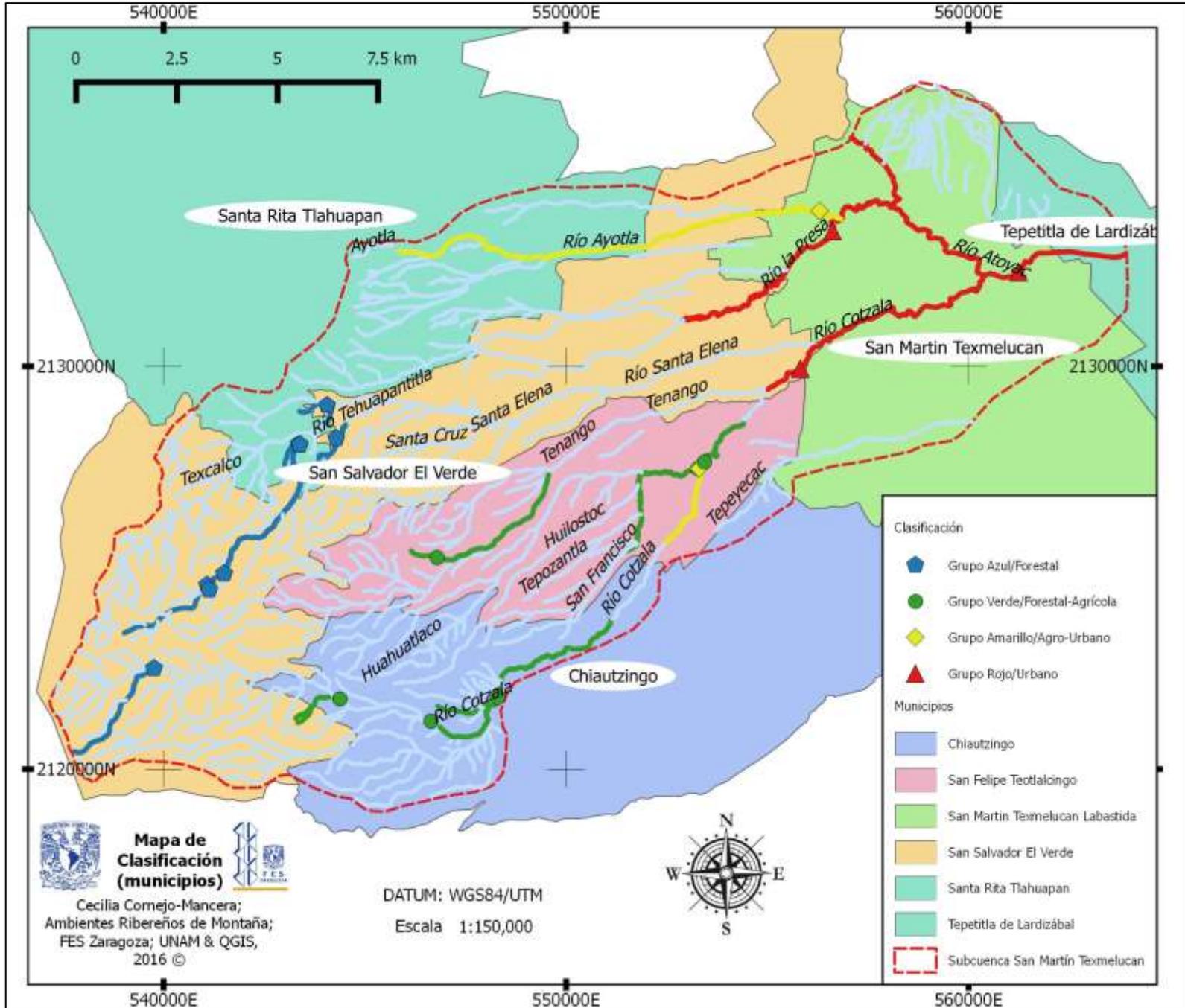


En la figura 27 se aprecia claramente una diferencia en la calidad de las aguas Noroeste–Sureste en la subcuenca, esto puede deberse a la forma de administración de los ejidos; se observó que en la parte Noroeste, el municipio San Salvador el Verde goza de aguas azules o forestales en su mayoría, este municipio tiene la ventaja de extenderse desde la parte alta del Iztaccíhuatl hasta colindar con San Martín Texmelucan, su régimen es ejidal y al establecer contacto con ellos es claro que resguardan sus recursos naturales, a la zona no se podía acceder sin su consentimiento y vigilancia. Por otra parte en la zona Sureste de la subcuenca, el río Cotzala presentó aguas verdes a altitudes similares a las de la parte Suroeste, en el río Cotzala no existe una vigilancia permanente en la zona y algunas áreas son usadas como recreativas abiertas al público. Lo anterior refleja el problema de la administración de los recursos vía división política y no como unidad hidrográfica.

A pesar de que los sitios forestales no presentan un grado alto de perturbación debido a que se encuentran en zonas que pertenecen al Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y a la Reserva de la Biósfera Los Volcanes, las zonas agrícolas y urbanas tienen condiciones afectadas por las actividades en el uso del suelo agrícola y urbano (anexo II), por lo que el agua que sale de la cuenca llega contaminada al río Atoyac. Rodríguez & Morales (2014) señalan que las corrientes superficiales que llegan de San Martín Texmelucan a Tepetitla de Lardizábal están muy contaminadas, pero no establecen una razón en específico, esto se debe principalmente por las descargas en las zonas urbanas y agrícolas ya que en las zonas protegidas las condiciones de la zona ribereña no presenta perturbaciones que afecten de manera drástica los ríos.



Figura 28. Tipos de aguas por municipios.





CONCLUSIONES.

Los cuatro grupos de clasificación obtenidos reflejan el estado de las corrientes superficiales de la subcuenca y la importancia de las áreas naturales protegidas como instrumento de conservación en la zona de estudio.

El grupo Forestal o Azul corresponde a las aguas asociadas a riberas ubicadas donde se llevan a cabo actividades de manejo y conservación por parte del PNIP, este grupo representa a las aguas con menor grado de contaminación por nutrientes, iones y con temperaturas menores.

El grupo Forestal – Agrícola o Verde corresponde a ríos y manantiales que son usados en actividades agrícolas pero llevadas a cabo en zonas forestales fuera del PNIP.

El grupo Agro – Urbano o Amarillo representa las corrientes y manantiales inmersos en zonas con asentamientos humanos, donde las actividades agrícolas dominan el uso de suelo. Ambos grupos (verde y amarillo) representan las áreas medias de la subcuenca y reflejan la transición entre actividades de conservación y agropecuarias.

El grupo Urbano o Rojo son ríos y manantiales ubicados en zonas completamente urbanas pero en la zona más baja de la subcuenca, donde desembocan todas las descargas de la misma.

La zona más baja de la subcuenca representa las aguas más contaminadas que reciben tanto descargas agrícolas como urbanas, a pesar de estar en zonas urbanas estos ambientes ribereños son explotados a su máxima capacidad siendo usadas también para actividades agropecuarias en pequeña escala hasta donde la propia franja ribereña lo permite.

Las formas de manejo establecidas en el plan de manejo del PNIP pueden ser la razón de las diferencias entre los grupos obtenidos, pero la gestión por parte de los ejidatarios también es muy importante ya que esto se refleja en las condiciones de la franja ribereña y en el agua, como es el caso de San Salvador el Verde cuyos ríos y manantiales están en su mayoría clasificados como azules a diferencia de Chiautzingo y San Felipe Teotlalcingo que comparten elevaciones similares pero los sitios ubicados en estos dos municipios pertenecen al grupo Forestal – Agrícola y Agro – Urbano.

El Río Cotzala presenta los cuatro tipos de aguas a lo largo de su corriente. Los ríos Atzomaco y Tehuapantitla presentan aguas verdes; el río Ayotla presenta aguas amarillas al igual que un tramo del río Cotzala. Finalmente los ríos La Presa, el río Cotzala (la parte más baja) y el río Atoyac presentan aguas rojas, las cuales son las más contaminadas, los principales parámetros que influyen en la categorización de las corrientes son oxígeno disuelto, ortofosfatos, alcalinidad y nitritos.

Mediante estadística multivariada se pudo reducir la dimensionalidad de los datos colectados y aplicar un modelo para la clasificación de corrientes superficiales, el cual es 89.74% confiable para clasificar nuevas observaciones.



A partir del análisis multivariado se identificaron cuatro variables (O_2 , $P-PO_4^{3-}$, alcalinidad y $N-NO_2^-$) que intervienen prioritariamente en la formación de los grupos obtenidos, mismos que coinciden con los diferentes usos de suelo de la subcuenca San Martín Texmelucan. La representación geográfica permitió apreciar que las cuatro categorías obtenidas también dependen de la gestión de los recursos de cada municipio.

La declaratoria de clasificación de CONAGUA (2011) para el río Atoyac y Xochiac o Hueyapan no considera las condiciones de la franja ribereña ni el uso de suelo adyacente a la misma para categorizar las corrientes superficiales, sin embargo deja establecido en el artículo 9 que *los usuarios podrán asociarse libremente en cualquier forma y bajo cualquier instrumento jurídico para alcanzar de manera más eficiente los límites establecidos en la declaratoria de clasificación*, lo cual deja abierto el panorama para propuestas alternas como este trabajo en donde se incluyó el estado actual del ecosistema, dinámica química del agua y herramientas estadísticas aplicadas que la legislación no establece como criterios de clasificación en la Ley de Aguas Nacionales, ni en la Ley Federal de Derechos, además de que es un análisis a corto plazo y con bajo costo que permite la caracterización de las corrientes superficiales después de un periodo corto posterior a las evaluaciones en campo.



REFERENCIAS

- Alarcón Herrera, María Teresa & Angélicaume–Descamps, Alexandra. 2014. Agua potable en México: situación y factores asociados a las vulnerabilidades. *Ciencia y Desarrollo*. Vol. 39 (266): pp. 40 – 44.
- Allan, David J. & Castillo, María M. 2007. *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Segunda edición. Springer. Netherlands. 436 pp.
- Amoros, C. & Bornette, G. 2002. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology*. (47) pp: 761 – 776.
Consultado en junio de 2016:
http://www.unemat.br/prppg/ppgca/docs2013/Connectivity_and_biocomplexity_in_waterbodies_of_reverine_floodplains.pdf
- APHA, AWWA and WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17° edición. Editorial Díaz Santos. Washington. 1995 pp.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. 22nd Ed. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. USA.
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.
Consultado en junio de 2016:
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rtp_107.pdf
- Barnes, R. S. K. & Mann, K. H. (publishers). 1991. *Fundamentals of aquatic ecology*. Second edition. Blackwell scientific publications. Great Britain. 270 pp.
- Bautista Zúñiga, Francisco; Palacio Prieto, José Luis y Delfin González, Hugo (editores). 2011. *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. [Versión electrónica]. 2da Edición. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Instituto de Geografía, UNAM. México 770 pp.
- Bernal, Eleonora; García, Duberney; Novoa, Miguel A. & Pinzón, Atticus. 2006. Caracterización de la comunidad de macroinvertebrados de la quebrada de Paloblanco de la cuenca del río Otún (Risaralda, Colombia).
Consultado en junio de 2016: <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v11n2/v11n2a04.pdf>
- Blancas, G.; Constanzo E.; Cervantes, A. & Gómez, J. 2011. *Manual de análisis de aguas naturales y su aplicación a la microescala*. UNAM. FES Zaragoza. 76 pp.
- Bocco, Gerardo. 2004. Cartografía y sistemas de información geográfica en el manejo integrado de cuencas; En: Cotler, Helena (compiladora). 2004. *El Manejo Integral de Cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Primera Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Instituto Nacional de Ecología. México. 264 pp.
- Brenes, Ruby; Cadena, Arturo & Ruiz-Guerrero. 2011. Monitoreo de la concentración de nitrato en el acuífero del valle de Puebla. *Revista de investigación y Contaminación Ambiental*. 27 (4): pp 313 – 321.



- ♪ Breña Puyol, Agustín & Jaboco Villa, Marco Antonio. 2013. Principios y fundamentos de hidrología superficial. Primera Edición. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. México, D.F. 254 pp.
- ♪ Burgos, Ana L. & Gerardo Bocco. 2015. La cuenca hidrográfica como espacio geográfico. En: Burgos, Ana L.; Bocco, Gerardo y Sosa Ramírez, Joaquín (coordinadores). 2015. Dimensiones sociales en el manejo de cuencas. Primera Edición. Universidad Nacional Autónoma de México – Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental – Fundación Río Arronte. México. 308 pp.
- ♪ Carabias, J.; Rosalva, L.; Collado, J. & Martínez, P. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad hacia la gestión integral de recursos hídricos en México. Fundación Gonzalo Río Arronte. 221 pp.
- ♪ Chandra Panda, Unmesh; Kumar Sundaray, Sanjay; Rath, Prasant; Bihari Nayak, Binod & Bhatta, Dinabandhu. 2006. Application on factor analysis for characterization of river and estuarine water systems – a case study: Mahanadi river (India). [Versión electrónica]. Journal of Hydrology. Vol. 331: pp. 343 – 445.
- ♪ Church, Michael. 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. Blackwell Science Ltd. Freshwater Biology. 47. Pp: 541 – 557. Consultado en junio de 2016: https://www.wou.edu/las/physci/taylor/g407/restoration/Church_2002_geomorphic_thresholds_rivers.pdf
- ♪ Cole, Thomas M. & Hannan, Herbert H. 1990. Dissolved oxygen dynamics. Chapter 4. Pp: 71 – 107. En: Thornton, Kent W.; Kimmel, Bruce L. & Payne, Forrest E (editors). 1990. Reservoir limnology: ecological perspectives. Wiley – Interscience Publication. United States of America. 246 pp.
- ♪ CONABIO. 1998 (a). Subcuencas hidrológicas [layout], escala 1:1,000,000. En: Boletín hidrológico (1970). Subcuencas hidrológicas de regiones hidrológicas. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Jefatura de Irrigación y control de Ríos, Dirección de Hidrología. Comisión Nacional para el Uso de la Biodiversidad. México. Consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/subcu1mgw.png>
- ♪ CONABIO. 1998 (b). Subcuencas Hidrológicas. [Shapefile. Formato vectorial]. Subcuencas Hidrológicas en Mapas de Regiones Hidrológicas. Escala 1:1,000,000. Publicación del metadato: 2008. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- ♪ CONAGUA. 2008. Clasificación de cuerpos de aguas nacionales: ríos Atoyac y Zahuapan (Puebla Tlaxcala). SEMARNAT – CONAGUA. Disponible en: www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/pres_proname_ago2008_e_gutierrez.pdf
- ♪ CONAGUA. 2011. Declaratoria de clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes. Diario Oficial de la Federación. 6 de julio de 2011. México. Consultado en julio 2016: www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/contenido/documentos/DRio_Atoyacy_Xochiac_o_Hueyapan.pdf
- ♪ CONAGUA. 2014. Ley Federal de Derechos: disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2014. SEMARNAT-CONAGUA. 94 pp. Consultado en octubre de 2014: www.conagua.gob.mx/conagua07/Declaragua/LeyFD2014.pdf



- ♪ CONAGUA. 2015. Monitoreo de Calidad del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Calidad del Agua. México. 22 pp. Consultado en julio 2016: www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/TF_CalidadAgua/CalidaddelAgua.pdf
- ♪ CONANP. 2013. Programa de manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. SEGOB-SEMARNAT-CONANP-PNIPZ. 185 pp.
- ♪ Dallas, E, Johnson. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. Primera edición. Thomson Editores. México, D.F. 561 pp.
- ♪ Davidson G., Mazabel. 2007. Las disputas por el agua en el valle de Texmelucan, Puebla, México a fines del siglo XVII. Agricultura, sociedad y desarrollo. Pp: 165 – 191.
- ♪ Davis, J. A. & Barmuta L. A. 1989. An ecological useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers. Freshwater Biology. (21) pp: 271 – 282. Consultado en junio 2016: <http://eds.a.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=3e2a58ba-e8fe-45e5-979c-4a5b2d9285fc%40sessionmgr4003&hid=4103>
- ♪ Davis, Mackenzie L. & Masten, Susan J. 2005. Ingeniería y ciencias ambientales. Primera Edición. McGraw-Hill Interamericana. México. 750 pp.
- ♪ De la Garza García, Jorge; Morales Serrano, Blanca Nieves & González Cavazos, Beatriz Adriana. 2013. Análisis Estadístico Multivariante: un enfoque teórico y práctico. Primera Edición. McGraw-Hill Interamericana. México, D.F. 712 pp.
- ♪ De la Lanza Espino, Guadalupe (compiladora); Hernández Pulido, Salvador (colaborador). 2007. Las aguas interiores de México: conceptos y casos. Primera Edición. AGT Editor. México. 695 pp.
- ♪ De Villiers, Marq. 2000. Water: the fate of our most precious resource. Houghton Mifflin. Nueva York. p. 17.
- ♪ Decker, Drew. 2001. eBook. GIS Data Sources. John Wiley & Sons, Inc. New York. 193 pp. Consultado en mayo de 2016: http://www.biz-gis.com/?module=file&act=procFileDownload&file_srl=119627&sid=f9e0efb4a03aacbfcba8f15ace09405
- ♪ Diario Oficial de la Federación. Ley de Aguas Nacionales. 4 de abril de 2004. México.
- ♪ Díaz Pineda, Francisco; Fe Schmitz, María; Aranzabal, Itziar de; Hernández, Santiago; Bautista Carmen & Aguilera, Pedro. 2009. Conectividad ecológica horizontal y vertical. [Versión electrónica]. Proyectos de Investigación en Parques Nacionales. Pp: 73 – 91.
- ♪ Dodds, Walter K. 2002. Fresh water ecology: concepts and environmental applications. Academic Press. San Diego California, USA. 569 pp.
- ♪ Dodds, Walter & Whiles, Matt. 2010. Fresh Water Ecology: concepts and environmental applications of limnology. Elsevier. USA. 811 pp.
- ♪ Everitt, Brian & Horton, Torsten. 2011. An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R. Springer Science+Business Media. USA. 273 pp.
- ♪ Fernández Chrislieb, Federico. 2011. Paradero 2010: La geografía Universitaria en México Setenta Años Después. Pp: 87 – 126; En: Bocco, Gerardo; Urquijo, Pedro S. & Vierya, Antonio



- (coordinadores). 2011. Geografía y Ambiente en América Latina. CIGA-UNAM-INE-SEMARNAT. 335 pp.
- Freeman, Scott. 2009. Biología. Tercera Edición. Pearson Education. Madrid. 1392 pp.
- Frissell, Christopher A.; Liss, William J.; Warren, Charles E. & Hurley, Michael D. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. Springer – Verlag. New York. Environmental management. Vol. 10, No. 2, pp: 199–214. Consultado en junio de 2016: <http://ocw.um.es/ciencias/avances-ecologicos-para-la-sostenibilidad-de-los/lectura-obligatoria-1/leccion1/frissell-et-al-1986.pdf>
- Galicia, E. 2013. Cambios en los procesos de irrigación en las zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Subcuenca San Martín Texmelucan, Puebla, siglo XX. Coloquio Agua Subterránea en México. Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades “Alfonso Vález Pliego”. Noviembre, 2013. Consultado en 17/09/14
http://coloquios.paot.mx/archivos/presentaciones/25_Esther_Galicia_Hernandez.pdf
- Geissler, Gunther & Arroyo, Maribel. 2011. El agua: como un recurso natural renovable. Primera Edición. Trillas. México, D.F. 216 pp.
- Geological Journal. 1978. Reviews. Consultado en junio de 2016:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/gj.3350130112/epdf>
- Giller, Paul S. & Malmqvist, Björn. 1998. The Biology of Streams and Rivers. Oxford University Press. Great Britain. 295 pp.
- González Pérez, Enrique. 2006. Calidad iónica del agua en relación a la nutrición del gladiolo y patógenos del cormo. Colegio de posgraduados. México. Consultado el 7/09/14
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=COLPOS.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=038811t>
- Granados Sánchez, D.; Hernández García, M.Á. & López Ríos, G.F. 2006. Ecología de zonas ribereñas. Revista Chapingo. Serie de ciencias forestales y del ambiente. Vol. 12 (001): pp. 55 – 69.
- Guerra Hernández. Eloisa Adriana & Cruz Flores, Gerardo. (editores). 2014. Métodos de evaluación y diagnóstico para agua y suelo. PAPIME PE 205510.DGAPA-UNAM. 155 pp.
- Guerrero Legarreta, Manuel. 2006. El agua. Quinta edición. México. Fondo de Cultura Económica, SEP, CONACYT. 178 pp.
- Guevara, Giovany; Reinoso, Gladys; García, J. E.; Franco, L. M.; García, L. J.; Yara, D. C.; Briñez, N.; Ocampo, M. L.; Quintana, M. I.; Pava, D. Y.; Flórez, N. Y.; Ávila, M. F.; Hernández, E. E.; Lozano, L. A.; Guapucal, M.; Borrero, D. A. & Olaya, E. J. 2008. Aportes para el análisis de ecosistemas fluviales: una visión desde ambientes ribereños. Revista Tumbaga, 3, 109 – 127.
- Holmes, Kathryn L. & Goebel, P. Charles. 2011. A functional approach to riparian area delineation using geospatial methods. Journal Forestry. Pp: 233 – 241.
- Horton, Robert E. 1945. Erosional development of streams and their drain-age basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of



- America. (56) pp: 275–370. Consultado en junio de 2016:
<http://gsabulletin.gsapubs.org/content/56/3/275.full.pdf+html>
- ♪ Hunt, Charles B. 1969. Geologic history of the Colorado River. En: U. S. Geological Survey. 1969. The Colorado River Region and John Wesley Powell. Geological Survey Professional Paper 669. United States Government Printing Office, Washington. 145 pp. Consultado en junio de 2016: <http://pubs.usgs.gov/pp/0669/report.pdf>
- ♪ INAFED. 2010. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Estado de Puebla. Consultado en septiembre de 2014:
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/index.html>
- ♪ INEGI. 1984. Carta de Uso de Suelo y Vegetación, México, Ciudad de México. Escala 1:250,000. México.
- ♪ INEGI. 2007. Diccionario de datos de localidades urbanas. Consultado el 09/05/2016:
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/urbana/doc/diccionario_datos_localidades_urbanas_ver_definitiva_septiembre07.pdf
- ♪ INEGI. 2012. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie IV. Consultado en 9/05/2016:
http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/sueloyveg/1_250_IV/1_250_IV.pdf
- ♪ INEGI. 2014. Geología: rocas. Mapa digital de México. Consultado en 18/09/14:
<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- ♪ Kennedy, Robert H. & Walker, William W. 1990. Reservoir nutrient dynamics. Pp: 109 – 131. En: Thornton, Kent W.; Kimmel, Bruce L. & Payne, Forrest E (editors). 1990. Reservoir limnology: ecological perspectives. Wiley – Interscience Publication. United States of America. 246 pp.
- ♪ Kevern, R., Darrell, L., King, L. & Ring, R. 1996. Kevern. The Michigan Riparian February. Citado en: Cortés Guerrero, Ana Laura & Vega Martínez Karen Lisset. 2013. Variaciones de carbono, nitrógeno y fósforo en sitios con distinto uso de suelo en dos sistemas ribereños del río Ameca. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México.
- ♪ Ledesma Mateos, Ismael. 2000. Historia de la biología. Primera edición. A.G.T. Editor. México, D.F. 659 pp.
- ♪ Leopold, Luna B. & Wolman, M. Gordon. 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. Physiographic and hydraulic studies of rivers. Geological survey professional paper 282–B. United States Government Printing Office, Washington. 85 pp.
Consultado en junio de 2016:
https://www.uvm.edu/~wbowden/Teaching/Stream_Geomorph_Assess/Resources/Private/Documents/1957_leopold_wolman_channel_patterns.pdf
- ♪ Levin, John. 2001. Alluvial Systematics. Pp: 19 – 41. En: Woodward, Jamie C.; Maddy, Darrel & Macklin, Mark G. 2001. River Basin Sediment Systems – Achieves of Environmental Change. Taylor & Francis Group. 3rd Biennial Conference of the Fluvial-Achieves-Group (FLAG). Cheltenham, Cheltenham, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. 1 – 1 September, conference. Versión electrónica (2016):
<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781439824672.ch2>
- ♪ Magner, Lois N. 2002. A history of life science. Third edition. CRC Press. United States of America. 502 pp.



- Magyar, Norbert; Gábor Hatvani, Itsván; Kovácsné Székely; Herzig, Alois; Dinka & Kovács, József. 2013. Application of multivariate statistical methods in determining spatial changes in water quality in the Austrian part of Neusiedler See. *Ecological Engineering*. (55): pp. 82 – 92.
- Maldonado, Juan Mayr. 2009. Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería*, Número 30. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Pp. 66 – 71.
- Mardia, K. V.; Kent, J. T. & Bibby, J. M. 1995. *Multivariate Analysis*. Tenth printing. Academic Press. USA.
- Margaleff, Ramón. 2011. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona. 1010 pp.
- Mendizábal Bermudez, Gabriela & Sedano Padilla, Marina Guadalupe. 2014. Agua potable en México: un derecho humano. *Ciencia y Desarrollo*. Vol. 39 (266): pp. 46 – 51.
- Montgomery, David R. 1999. Process domains and the river continuum. *Journal of American Water Resources Association*. Vol. 35 No. 2. Pp: 397 – 410. Consultado en junio de 2016: <http://rocky2.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Montgomery.article.pdf>
- Montes, Carlos. 2003. Criterios ecológicos para el deslinde de humedales ribereños. [Versión electrónica]. *Gestión de humedales ribereños*. Pp: 61 – 76. En: Paracuellos, Mariano. 2003. *Ecología, manejo y conservación de humedales*. Instituto de estudios Almerienses. 257 pp. Consultado en 18/09/14: <http://marianoparacuellos.files.wordpress.com/2012/01/ecologia-manejo-y-conservacion-de-los-humedales.pdf>
- Naiman, Robert J; Décamps, Henri & McClain, Michael E. 2005. *Riparia: ecology, conservation, and management of streamside communities*. Elsevier Academic Press. China. 430 pp.
- Neteler, Markus & Mitasova, Helena. 2004. *Open Source GIS: A Grass GIS Approach*. Second Edition. In *The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science* Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Nilsson, C.; Grelsson, G.; Johansson, M; Sperens, U. 1988. Can Rarity and diversity be predicted in vegetation along river Banks? *Biol. Conserv.* Pp. 201 – 212. Citado en: Granados Sánchez, D.; Hernández García, M.Á. & López Ríos, G.F. 2006. *Ecología de las zonas ribereñas*. *Revista Chapingo. Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 12 (001): pp. 55 – 69.
- NMX-AA-007-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación del pH.
- NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de aguas. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba Parte 2.
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua, Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua. Que establece el método de análisis para la determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de agua. Medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NMX-AA-084-SCFI-1982. Análisis de agua. Determinación de sulfuros. Medición del sulfuro para aguas residuales y aguas que oxidan parcialmente el azufre.



- ♪ NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua. Determinación de la conductividad electrolítica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- ♪ NMX-AA-154-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas.
- ♪ Morrison, Donald F. 2005. *Multivariate Statistical Methods*. Fourth edition. Thomson Brooks/Cole. USA. 469 pp.
- ♪ Olaya, Víctor. 2011. *Sistemas de Información Geográfica*. Consultado en: <http://volaya.es/cursosig.htm>
- ♪ OSGeo. 2014. <http://www.osgeo.org/>
- ♪ Oswald Spring, Úrsula. 2014. Seguridad del agua: conflictos e hidrodiplomacia. *Ciencia y Desarrollo*. Vol. 39 (266): pp: 34 – 39.
- ♪ Ouyang, Y.; Nkedi-Kizza, P.; Wu, Q. T.; Shinde, D. & Huang, C. H. 2006. Assessment of seasonal variations in Surface water quality. [Versión Electrónica]. *Water Research*. (40): pp. 3800 – 3810.
- ♪ Pert, P.L.; Butler, J.R.A.; Brodie, J.E.; Bruce, C.; Honzák, M.; Kroon, F.J.; Metcalfe, D.; Mitchell, D. & Wong, G. 2010. A catchmen-based approach to mapping hydrological ecosystem services using riparian habitat: A case study from the Wet Tropics, Australia. *Ecological Complexity*. 7 pp: 378 – 388. Consultado en junio 2016: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1476945X10000371>
- ♪ QGIS – Quantum Geographic Information System. 2013. Development Team. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponible en: <http://qgis.osgeo.org>
- ♪ Rodríguez Elizarrarás, Sergio R. & Morales Barrera, Wendy V. 2010. *Geología*. México. Consultado (marzo 2016) en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/9648/1/02GEOLOGIA.pdf>
- ♪ Rodríguez Tapia, Lilia & Morales Novelo Jorge A. (coordinadores). 2014. *Contaminación del Atoyac: daños ambientales y tecnologías de mitigación*. Primera Edición. Universidad Autónoma de México. México D.F. 251 pp.
- ♪ Rodríguez Tapia Lilia, Jorge A. Morales Novelo & Ma. Patricia Zavala Vargas. 2014. Impacto de la contaminación de los cuerpos de agua en el medio ambiente, en la población y en las actividades económicas en el escurrimiento de la presa Valsequillo. En Rodríguez Tapia, Lilia & Morales Novelo Jorge A. (coordinadores). 2014. *Contaminación del Atoyac: daños ambientales y tecnologías de mitigación*. Primera Edición. Universidad Autónoma de México. México D.F. Pp: 19 – 64.
- ♪ Romo de Vivar, Alfonso & Delgado, Guillermo. 2011. *Química, universo, Tierra y vida*. Cuarta Edición. México. FCE, Instituto de Química – UNAM, SEP, CONACYT. 175 pp.
- ♪ Rosgen, David. 1994. A classification of natural rivers. *CATENA*. Volume 22. Issue 3. Pp: 169 – 199. Consultado en junio de 2016: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0341816294900019>
- ♪ Schuenemeyer, Joh H. & Drew, Lawrence J. 2010. *Statistics for earth and environmental scientists*. John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey. 407 pp.
- ♪ SEMARNAT – CONAGUA. 2014. *Programa Nacional Hídrico*. SEMARNAT – CONAGUA. México, D.F. 48 pp.
- ♪ Shiva, Vandana. 2003. *Las guerras del agua: privatización, contaminación y lucro*. Siglo XX Editores. México. 161 pp.



- ♪ Soria. *Sin publicar*. Cambio en la cobertura del suelo y calidad del agua en la subcuenca de San Martín Texmelucan. Tesis de Licenciatura 2016. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza – UNAM. México.
- ♪ Statzner, Bernhard & Higler, Bert. 1986. Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns. *Freshwater Biology*. (16) pp: 127–139. Consultado en junio de 2016: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2427.1986.tb00954.x/epdf>
- ♪ Toledo, Alejandro. 2006. Agua, hombre y paisaje. Primera Edición. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales – Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México. 259 pp.
- ♪ UNESCO. 2003. Agua para todos, agua para la vida: Resumen. UNESCO-Mundi-Prensa Libros. España. Consultado en: <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>
- ♪ UNESCO. 2004. Programa el hombre y la biósfera (MAB) – Formulario de propuesta de reserva de la Biósfera. 2004. Consultado el 9/05/2016: http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/MaB/RB_LOSVOLCANES.pdf
- ♪ UNESCO. 2009. The United Nations World Water Development Report 3: water a chinging world. [Versión electrónica]. World Water Assessment Programme. Earthscan – The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 318 pp.
- ♪ UNESCO. 2010. Red mundial de Reservas de la Biósfera: lugares de Desarrollo Sostenible 2010. [Versión electrónica]. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Man and the Biosphere Programme – Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino – Gobierno de España. 597 pp. Consultado en 17/09/14: <http://unesdoc.unesco.org/images/0020/002070/207051s.pdf>
- ♪ Vannote, Robin L.; Minshall, G, Wayne; Cummins, Kenneth W.; Sedell, James R. & Cushing, Colbert E. 1980. The River Continuum Concept. *Can. J. Fish, Aquat. Sci.* (37) pp: 130 – 137. Consultado en junio de 2016: http://www.colorado.edu/geography/geomorph/envs_5810/vannote_1980.pdf
- ♪ Vázquez, D. 2012. Estudio hidrogeológico de la subcuenca hidrográfica Atoyac – San Martín Texmelucan, Puebla. *Geos. Geohidrología*. Vol. 32, No. 1. Octubre 2012. Consultado en 17/09/14: http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos121/sesiones_regulares/GEOH.pdf
- ♪ Vega, Marisol; Pardo, Rafael; Barrado, Enrique & Debán, Luis. 1998. Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water bay exploratory data analysis. [Versión electrónica]. *Water Research*. Vol. 32 (12): pp. 3581 – 3592.
- ♪ Wetzel, Robert G. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona. 679 pp.
- ♪ Wetzel, Robert G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. Third edition. Elsevier – Academic Press. San Diego California, USA. 1006 pp.
- ♪ Wilkins, John S. & Ebach, Malte C. 2013. The nature of classification: relationships and kinds in the natural sciences. Retrieved from: <http://www.palgravconnect.com/pc/doi/10.1057/9781137318121.0001>
- ♪ World Bank. 2008. Watershed Management Approaches, Policies, and Operations: Lessons for Scaling Up. Water sector board discussion paper series, Paper No. 11. Consultado el 24 de septiembre en:



<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/17240/442220NWP0dp111Box0327398B01PUBLIC1.pdf?sequence=1>

- WRI. 2000. Pilot analysis of global ecosystems: freshwater system. [Versión electrónica]. World Resources Institute. USA. 65 pp. Consultado en: http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/page_freshwater.pdf
- Xu, H.S.; Xu, Z.X.; Wu, W. & Tang, F.F. 2012. Assessment and spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan River Basin, China. [Versión electrónica]. Procedia Environmental Sciences (13): pp. 1641 – 1652. Consultado en junio 2015: http://ac.els-cdn.com/S1878029612001582/1-s2.0-S1878029612001582-main.pdf?_tid=3a6a8374-6318-11e6-96c0-0000aacb361&acdnat=1471286819_b385e1fc8b321794704f296875ff9b21
- Zhao, Y.; Xia, X.H.; Yang, Z.F. & Wang, F. 2012. Assessment of water quality in Baiyangdian Lake using multivariate statistical techniques. [Versión electrónica]. Procedia Environmental Sciences. (13): pp. 1213 – 1226. Consultado en junio 2015: http://ac.els-cdn.com/S1878029612001168/1-s2.0-S1878029612001168-main.pdf?_tid=612cb824-6318-11e6-a29d-0000aacb361&acdnat=1471286884_35ba594e148e707e0dc94b5c2b0da410
- Zhou, Ting; Wu, Jianguo & Peng, Shaolin. 2012. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: a case study of the Dongjian River watershed, China. [Versión Electrónica] Ecological Indicators. (23): pp. 166 – 175. Consultado en julio 2015: http://ac.els-cdn.com/S1470160X12001215/1-s2.0-S1470160X12001215-main.pdf?_tid=a468fc56-6318-11e6-a8e1-00000aab0f6b&acdnat=1471286997_c4c1f623584689afbc4009def8d300c7



ANEXO I. Tabla de clasificación del análisis de discriminantes.

| <i>Sitio</i> | <i>Grupo actual</i> | <i>Grupo</i> | <i>Valor más alto</i> | <i>Distancia cuadrada</i> | <i>Prob.</i> | <i>2nd Grupo Más alto</i> | <i>2nd Highest Value</i> | <i>Distancia Cuadrada</i> | <i>Prob.</i> |
|--------------|---------------------|--------------|-----------------------|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|
| 1 | 1 | 1 | 64.3382 | 1.75007 | 0.8888 | 2 | 61.9796 | 6.4673 | 0.0840 |
| 2 | 3 | 3 | 103.916 | 0.984734 | 0.6136 | 2 | 103.451 | 1.91417 | 0.3855 |
| 3 | 3 | 3 | 102.421 | 7.52536 | 0.9998 | 2 | 93.7242 | 24.9187 | 0.0002 |
| 4 | 1 | 1 | 83.1371 | 0.350022 | 0.9897 | 2 | 78.1967 | 10.231 | 0.0071 |
| 5 | 1 | 1 | 62.9843 | 0.428842 | 0.9989 | 3 | 55.759 | 14.8794 | 0.0007 |
| 6 | 1 | 1 | 75.1789 | 0.0679311 | 0.9982 | 2 | 68.2669 | 13.892 | 0.0010 |
| 7 | 1 | 1 | 68.8378 | 0.316642 | 0.9935 | 2 | 63.3632 | 11.2658 | 0.0042 |
| 8 | 2 | *3 | 98.6762 | 0.452497 | 0.8523 | 2 | 96.9228 | 3.95923 | 0.1476 |
| 9 | 2 | *3 | 85.0998 | 2.99226 | 0.5104 | 2 | 84.8157 | 3.56042 | 0.3842 |
| 10 | 3 | 3 | 120.153 | 8.44431 | 0.9944 | 2 | 114.981 | 18.7875 | 0.0056 |
| 11 | 2 | 2 | 104.609 | 0.156653 | 0.9457 | 3 | 101.722 | 5.93069 | 0.0527 |
| 12 | 3 | 3 | 78.6344 | 4.0984 | 0.9764 | 2 | 74.9044 | 11.5583 | 0.0234 |
| 13 | 2 | 2 | 92.5754 | 1.65874 | 0.7789 | 3 | 90.9796 | 4.85031 | 0.1579 |
| 14 | 1 | 1 | 60.8747 | 0.0188965 | 0.9992 | 2 | 53.3171 | 15.134 | 0.0005 |
| 15 | 1 | 1 | 58.2099 | 0.442519 | 0.9999 | 2 | 48.5335 | 19.7953 | 0.0001 |
| 16 | 1 | 1 | 59.8713 | 1.60701 | 0.9999 | 2 | 50.2473 | 20.8551 | 0.0001 |
| 17 | 1 | 1 | 73.842 | 0.0267859 | 0.9983 | 2 | 67.0736 | 13.5636 | 0.0011 |
| 18 | 1 | 1 | 64.0733 | 0.106589 | 0.9992 | 3 | 56.2775 | 15.6981 | 0.0004 |
| 19 | 1 | 1 | 83.2537 | 0.765118 | 0.9861 | 2 | 78.8625 | 9.54755 | 0.0122 |
| 20 | 2 | 2 | 99.0721 | 2.06766 | 0.7908 | 1 | 97.2091 | 5.79368 | 0.1227 |
| 21 | 2 | 2 | 123.689 | 7.54935 | 0.7767 | 3 | 122.442 | 10.0426 | 0.2233 |
| 22 | 1 | 1 | 54.115 | 0.800191 | 0.9999 | 2 | 43.5899 | 21.8504 | 0.0000 |
| 23 | 2 | 2 | 129.357 | 2.16916 | 0.8830 | 3 | 127.336 | 6.21226 | 0.1170 |
| 24 | 2 | 2 | 95.4244 | 0.358122 | 0.9033 | 3 | 93.1589 | 4.88922 | 0.0937 |
| 25 | 4 | 4 | 170.94 | 3.0921 | 1.0000 | 2 | 144.514 | 55.9451 | 0.0000 |
| 26 | 2 | 2 | 117.959 | 3.07551 | 0.9963 | 3 | 112.362 | 14.2678 | 0.0037 |
| 27 | 2 | 2 | 146.305 | 7.01178 | 0.9993 | 3 | 139.016 | 21.5908 | 0.0007 |
| 28 | 2 | 2 | 116.264 | 2.70813 | 0.9939 | 3 | 111.157 | 12.9238 | 0.0060 |
| 29 | 4 | 4 | 166.01 | 2.33663 | 1.0000 | 2 | 139.33 | 55.6955 | 0.0000 |
| 30 | 1 | 1 | 55.7743 | 0.348328 | 0.9999 | 2 | 46.451 | 18.9949 | 0.0001 |
| 31 | 1 | 1 | 55.9679 | 0.972023 | 1.0000 | 2 | 45.106 | 22.6958 | 0.0000 |
| 32 | 1 | 1 | 63.9037 | 1.13355 | 0.9589 | 2 | 60.5977 | 7.74549 | 0.0352 |
| 33 | 3 | *2 | 90.7849 | 1.29313 | 0.7307 | 3 | 89.7059 | 3.45115 | 0.2484 |
| 34 | 3 | *2 | 85.029 | 3.42501 | 0.4769 | 1 | 84.8042 | 3.87457 | 0.3809 |
| 35 | 2 | 2 | 86.7938 | 3.54895 | 0.5272 | 1 | 86.5905 | 3.95568 | 0.4301 |
| 36 | 2 | 2 | 95.1366 | 0.553964 | 0.9645 | 3 | 91.6592 | 7.50862 | 0.0298 |
| 37 | 4 | 4 | 189.729 | 5.59441 | 1.0000 | 2 | 163.874 | 57.3042 | 0.0000 |
| 38 | 4 | 4 | 208.642 | 8.11773 | 1.0000 | 2 | 144.067 | 137.267 | 0.0000 |
| 39 | 4 | 4 | 181.697 | 7.99756 | 1.0000 | 2 | 126.048 | 119.296 | 0.0000 |



ANEXO II. Zonificación de las subcuena (CONANP, 2011; UNESCO, 2004; INEGI, 2009)

En la *Zona de preservación* (CONANP, 2013): sitios en donde los recursos naturales han sido aprovechados de manera tradicional y continua por la población vecina, sin ocasionar alteraciones significativas en los ecosistemas. La principal actividad de esta zona es el deporte de montaña, como el ascenso de alta montaña y el campismo. Dentro de esta zona están prohibidas las actividades de aprovechamiento forestal, descarga de desechos líquidos o sólidos de cualquier tipo de contaminante al suelo o al agua, ganadería incluyendo el pastoreo, desviar cursos de agua, cualquier actividad de dragado y cualquier remoción o extracción de minerales. Dentro de esta zona se encuentra el sitio *Pilares* representando al grupo de las aguas *Azules*.

En la *Zona Uso Público* (CONANP, 2013): abarca generalmente la falda del volcán Iztaccíhuatl, en esta zona se empieza a realizar actividades turísticas de bajo impacto y venta de artesanías y alimentos, se permite el aprovechamiento de los recursos naturales con fines de autoconsumo, sin embargo no se permiten las actividades ganaderas ni de pastoreo ni desviar flujos hidráulicos o cuerpos de agua. Ubicados en esta zona se encuentran los sitios *Cocoyuco* y *Rincón del Cocoyuco* los cuales pertenecen al grupo de las aguas *Azules*.

En la *Zona de Influencia* (CONANP, 2013) se consideran las superficies boscosas en buen estado de conservación o susceptibles de restauración que van siguiendo un anillo de un kilómetro de separación con respecto a los linderos del parque, estas zonas por su grado de conservación requieren algún tipo de protección, estas tierras pertenecen a ejidos o comunidades por lo que se requiere de la participación social para la conservación a largo plazo del área natural protegida; ya que las actividades que se desarrollan en ellas tiene una estrecha relación con los ecosistemas de la zona y se ven reflejados los efectos positivos o negativos hacia la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Dentro de esta zona se encuentra el sitio de muestreo *El Corral* perteneciente al grupo de las aguas *Azules*.

La zona de *Amortiguamiento* (UNESCO, 2004) es el área circundante de la zona núcleo del volcán donde sólo puedan tener lugar actividades compatibles con los objetivos de conservación, tales como los programas de Empleo Temporal y de Conservación para el Desarrollo Sustentable, los cuales tienen como objetivo disminuir la presión sobre los recursos naturales y proporcionar alternativas de desarrollo sostenible. Dentro de esta zona se encuentran los sitios *Atzompa* y *Río Cotzala Represa*, los cuales corresponden al grupo de las aguas *Verdes*.

En la zona *Exterior* (UNESCO, 2004) o de transición se fomentan y practican formas de explotación sostenible de recursos. Es la zona donde se asientan las comunidades, la estrategia será hacer la reconversión de las actividades productivas conforma lo determina el ordenamiento ecológico. El régimen es variado, existe pequeña propiedad, ejidos y comunidades agrarias. Dentro de esta zona se encuentran aguas de dos grupos, *Palo Obispo Manantial*, *Palo Obispo Río*, *Atzomaco* y *Xoquititla* que corresponden a las aguas *Azules*; y *Pozo San Juan Tlale* que corresponde al grupo de aguas *Verdes*.



Como zona de Cultivo o Agrícola (INEGI, 2012) son áreas de producción de cultivos que son obtenidos para su utilización por el ser humano ya sea como alimentos, forrajes, ornamental o industrial. Dentro de estas áreas de cultivos se encuentran aguas *Verdes* representadas por *Río Cotzala Hidroeléctrica*, *San Felipe Teotlalcingo 1* y *San Felipe Teotlalcingo 3*; *San Felipe Teotlalcingo* por parte de las aguas *Amarillas* y *San Simón Atzitzintla* del grupo de las aguas *Rojas*.

Dentro de la zona *Urbana* (INEGI, 2007) que son áreas delimitada por vialidades y/o rasgos naturales o culturales, cuyo perímetro puede recorrerse en su totalidad, en estas zonas se encuentran los sitios *San Rafael Tlanalapan 1*, *San Rafael Tlanalapan 2* del grupo de aguas *Amarillas*; *San Rafael Tlanalapan 3* y *Distrito Atoyac-Zahuapan* del grupo de aguas rojas.



ANEXO III. Tabla de correlaciones múltiples.

| C. Cor. | Temp. H ₂ O | CE | pH | O ₂ D | Alc. | D-Ca | D-Total | NO ₂ | NO ₃ | NH ₄ | P-Total | Orto-PO ₄ | SO ₄ | DBO ₅ | DQO | S ²⁻ | STD |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-----|
| Temp. H ₂ O | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CE | <u>0.6959</u> 0.0000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | 0.2590 0.0003 | 0.3501 0.0000 | | | | | | | | | | | | | | | |
| O ₂ D | <u>-0.6267</u> 0.0000 | <u>-0.7819</u> 0.0000 | -0.2084 0.0035 | | | | | | | | | | | | | | |
| Alc. | <u>0.6501</u> 0.0000 | <u>0.7332</u> 0.0000 | 0.2270 0.0014 | <u>-0.6091</u> 0.0000 | | | | | | | | | | | | | |
| D-Ca | 0.1659 0.0205 | 0.1241 0.0838 | 0.3103 0.0000 | -0.1024 0.1544 | 0.2852 0.0001 | | | | | | | | | | | | |
| D-Total | 0.1610 0.0246 | 0.1384 0.0537 | 0.3433 0.0000 | -0.0917 0.2022 | 0.2664 0.0002 | <u>0.9686</u> 0.0000 | | | | | | | | | | | |
| NO ₂ | 0.2052 0.0040 | 0.0950 0.1863 | 0.1579 0.0275 | -0.1712 0.0167 | 0.2192 0.0021 | <u>0.6204</u> 0.0000 | 0.5325 0.0000 | | | | | | | | | | |
| NO ₃ | 0.3221 0.0000 | <u>0.6924</u> 0.0000 | 0.1917 0.0073 | <u>-0.6363</u> 0.0000 | 0.2430 0.0006 | -0.0377 0.6006 | -0.0285 0.6925 | 0.0992 0.1676 | | | | | | | | | |
| NH ₄ | <u>0.6019</u> 0.0000 | <u>0.7530</u> 0.0000 | 0.3030 0.0000 | <u>-0.7534</u> 0.0000 | 0.4427 0.0000 | 0.2445 0.0006 | 0.2039 0.0042 | 0.4889 0.0000 | <u>0.7381</u> 0.0000 | | | | | | | | |
| P-Total | <u>0.6086</u> 0.0000 | <u>0.6225</u> 0.0000 | 0.2284 0.0013 | <u>-0.7084</u> 0.0000 | 0.2613 0.0002 | -0.1144 0.1114 | -0.0964 0.1800 | 0.0301 0.6766 | <u>0.5975</u> 0.0000 | <u>0.6671</u> 0.0000 | | | | | | | |
| Orto-PO ₄ | <u>0.5926</u> 0.0000 | <u>0.6138</u> 0.0000 | 0.2804 0.0001 | <u>-0.7236</u> 0.0000 | 0.3220 0.0000 | -0.0996 0.1658 | -0.0847 0.2393 | 0.0512 0.4773 | <u>0.5951</u> 0.0000 | <u>0.6492</u> 0.0000 | <u>0.9627</u> 0.0000 | | | | | | |
| SO ₄ | 0.3709 0.0000 | <u>0.7275</u> 0.0000 | 0.4502 0.0000 | -0.4017 0.0000 | <u>0.7053</u> 0.0000 | 0.3632 0.0000 | 0.3694 0.0000 | 0.2746 0.0001 | 0.3135 0.0000 | 0.4453 0.0000 | 0.2239 0.0017 | 0.2485 0.0005 | | | | | |
| DBO ₅ | 0.4851 0.0000 | 0.1087 0.1303 | 0.1121 0.1189 | -0.1588 0.0266 | 0.2440 0.0006 | 0.4052 0.0000 | 0.3631 0.0000 | <u>0.5132</u> 0.0000 | -0.1260 0.0793 | 0.2691 0.0001 | -0.0251 0.7280 | -0.0270 0.7078 | 0.0855 0.2349 | | | | |
| DQO | 0.3693 0.0000 | <u>0.7095</u> 0.0000 | 0.1120 0.1189 | <u>-0.6129</u> 0.0000 | 0.4547 0.0000 | -0.0520 0.4706 | -0.0631 0.3812 | 0.0617 0.3918 | <u>0.6543</u> 0.0000 | <u>0.6275</u> 0.0000 | 0.4230 0.0000 | 0.4131 0.0000 | 0.4282 0.0000 | 0.0159 0.8257 | | | |
| S ²⁻ | -0.1561 0.0293 | -0.2764 0.0001 | 0.1542 0.0314 | 0.0450 0.5321 | -0.0484 0.5015 | 0.1183 0.0995 | 0.1085 0.1312 | 0.1090 0.1292 | -0.1832 0.0104 | -0.1764 0.0136 | -0.2701 0.0001 | -0.2227 0.0018 | -0.1013 0.1587 | 0.0647 0.3687 | -0.2581 0.0003 | | |
| STD | <u>0.6408</u> 0.0000 | <u>0.9565</u> 0.0000 | 0.3314 0.0000 | <u>-0.6891</u> 0.0000 | <u>0.7526</u> 0.0000 | 0.2585 0.0003 | 0.2546 0.0004 | 0.2662 0.0002 | <u>0.6533</u> 0.0000 | <u>0.7647</u> 0.0000 | 0.4000 0.0000 | 0.4013 0.0000 | <u>0.7664</u> 0.0000 | 0.2085 0.0039 | <u>0.6949</u> 0.0000 | -0.2307 0.0014 | |