



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DE LOS ENSAMBLAJES DE
MACROINVERTEBRADOS DEL RÍO TULA**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
ARACELI MONDRAGON FELIX**

**TUTOR PRINCIPAL:
DR. MARTÍN LÓPEZ HERNÁNDEZ
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM**

**COMITÉ TUTOR:
DR. FERNANDO GONZÁLEZ FARÍAS
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
DR. ENRIQUE ARTURO CANTORAL URIZA
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada UNAM
DR. FERNANDO CÓRDOVA TAPIA
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
DRA. MARÍA GUADALUPE PONCE VÉLEZ
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM**

MÉXICO, CD. MX., OCTUBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DE LOS ENSAMBLAJES DE
MACROINVERTEBRADOS DEL RÍO TULA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
ARACELI MONDRAGON FELIX**

TUTOR PRINCIPAL:
DR. MARTÍN LÓPEZ HERNÁNDEZ
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

COMITÉ TUTOR:
DR. FERNANDO GONZÁLEZ FARÍAS
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
DR. ENRIQUE ARTURO CANTORAL URIZA
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada UNAM
DR. FERNANDO CÓRDOVA TAPIA
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
DRA. MARÍA GUADALUPE PONCE VÉLEZ
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

MÉXICO, CD. MX., OCTUBRE, 2023

Agradecimientos

Al posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, por haberme aceptado en el programa de maestría y haberme brindado la oportunidad de enriquecer mi conocimiento profesional, por su paciencia, guía y apoyo durante todo este tiempo.

A CONACYT por el apoyo recibido mediante la beca otorgada con número de CVU 830139

Al apoyo recibido por parte del proyecto de investigación “Limnología, contaminación y pesca en la cuenca del río Tula y Presa Zimapán” a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de México en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco.

A mi tutor principal el Dr. Martín López Hernández y a la maestra María Guadalupe Ramos Espinosa, por su apoyo, orientación, paciencia y consejos durante todo el proceso de elaboración de la tesis, por alentarme a la conclusión de este proyecto.

A los miembros de mi jurado: Dr. Fernando González Farías, Dr. Enrique Cantoral Uriza, Dra. María Guadalupe Ponce Vélez y Dr. Fernando Córdova Tapia, por su tiempo para la revisión de esta tesis, por su experiencia y profesionalismo para guiarme académicamente.

A mis padres Gloria Félix Pablo y Maximino Mondragón Mondragón, por darme la vida, por brindarme su tiempo, apoyo y consejos, por estar siempre conmigo.

A mis hermanas Adriana y Cristina, mis sobrinas Adybeth y Ahandry. Asimismo, a mis amigos cercanos (Saúl, Ana Luisa, Jazmín, Nayeli y Karina), por formar parte de mi vida y por su apoyo moral durante todo este tiempo.

A quienes ya no están conmigo, mis abuelos del alma, Pablo y Dionicio. A mis sobrinos Audrey y Mateo por mostrarme durante su corta estancia en este mundo, que hay que esforzarse cada minuto.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1.	Contaminación acuática	7
1.2.	Generalidades de los macroinvertebrados acuáticos	8
1.3.	Atributos de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos.....	9
1.4.	Uso de macroinvertebrados en la evaluación de calidad de cuerpos de agua.....	13
1.5.	Problemática de la zona de estudio.....	14
2.	JUSTIFICACIÓN	16
3.	ANTECEDENTES	17
3.1.	Estudios de macroinvertebrados en México.....	17
3.2.	Estudios realizados en la zona de estudio	19
4.	HIPÓTESIS	21
5.	OBJETIVOS.....	21
5.1.	General.....	21
5.2.	Particulares.....	21
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	22
6.1.	Área de estudio	22
6.1.1.	Localidades de estudio.....	24
6.2.	Toma de muestras	26
6.3.	Colecta de macroinvertebrados	27
6.4.	Laboratorio.....	28
6.4.1.	Pruebas químicas.....	28
6.4.2.	Revisión de muestras de macroinvertebrados.....	28
6.5.	Análisis estadístico.....	29
7.	RESULTADOS.....	31
7.1.	Estructura del ensamblaje de macroinvertebrados, septiembre 2016	31
7.2.	Estructura del ensamblaje de macroinvertebrados, noviembre 2016	33
7.3.	Estructura del ensamblaje de macroinvertebrados, abril 2017	35
7.4.	Estructura funcional de los ensamblajes de macroinvertebrados.....	36
7.5.	Abundancia por grupo funcional.....	39
7.6.	Características físicas y químicas de los hábitats, septiembre 2016.....	40
7.7.	Características físicas y químicas de los hábitats, noviembre 2016.....	42
7.8.	Características físicas y químicas de los hábitats, abril 2017	44
7.9.	Caracterización de los sitios de muestreo.....	46
7.10.	Relación de los ensamblajes de macroinvertebrados y los parámetros ambientales.....	48
8.	DISCUSIÓN	56
9.	CONCLUSIONES	64
10.	LITERATURA CITADA.....	66
11.	ANEXOS.....	72

RESUMEN

En México el Río Tula, localizado mayormente en el estado de Hidalgo, se ve influenciado en su hidrología por la construcción de presas y canales para riego a lo largo de su cauce; se alimenta con diferentes tributarios contaminados y manantiales aparentemente con buena calidad de agua. La mayor carga de contaminantes proviene de los aportes de aguas negras del área Metropolitana del Valle de México y por aguas residuales del corredor industrial Tula-Tepeji del Río. En la zona, la mayoría de los estudios están enfocados en contaminación del agua superficial y subterránea, así como sus efectos en los cultivos y en la salud humana, con poca información del daño en las comunidades acuáticas. El objetivo de este trabajo fue conocer las características estructurales y funcionales de los ensamblajes de macroinvertebrados del Río Tula y su relación con las variables fisicoquímicas ambientales. En la cuenca del río, se realizaron muestreos en el cauce principal, abarcando la parte alta, media y baja, en tres temporadas climáticas (lluvias, sequía cálida y sequía fría). Los macroinvertebrados se colectaron mediante un muestreo multihábitat semicuantitativo y se identificaron a nivel de familia, para obtener la diversidad, riqueza taxonómica, abundancia relativa, y grupos funcionales; lo cual se correlacionó con las variables ambientales y parámetros fisicoquímicos, mediante un análisis de componentes principales (ACP) y un análisis de correlación de Pearson. Se encontraron un total de 55 familias pertenecientes a 23 órdenes, de los cuáles Diptera y Trichoptera tuvieron la mayor cantidad de familias, con 9 cada uno. Los dípteros de la familia Chironomidae, fueron los organismos con mayor frecuencia en espacio y tiempo. En las tres temporadas los sitios 1 (Río Taxhimay) y 5 (Salida de Requena) presentaron mayor estabilidad en composición estructural y funcional, con presencia de organismos raspadores, fragmentadores, filtradores, depredadores y recolectores. Esto se asoció a las mayores cantidades de oxígeno y a la disponibilidad de microhábitats y fuentes de alimento. La cuenca media fue la más afectada debido a la entrada de aguas contaminadas, presentando una calidad de hábitat pobre, con elevadas concentraciones de nitrógeno total, fósforo total y carbono orgánico total, con poca o nula presencia de organismos. En la cuenca baja se encontró baja diversidad de organismos, principalmente recolectores, lo que se asocia a las altas cantidades de materia orgánica. Estos resultados muestran que en el Río Tula, el establecimiento de los macroinvertebrados se ve influenciado por cambios ambientales, espaciotemporales y asociados principalmente a perturbaciones antrópicas.

ABSTRACT

In Mexico, the Tula River, located mostly in the state of Hidalgo, is influenced in its hydrology by the construction of dams and irrigation canals along its course; it is fed by different polluted tributaries and springs with apparently good water quality. The greatest load of pollutants comes from sewage from the Metropolitan Area of the Valley of Mexico and wastewater from the Tula-Tepeji del Río industrial corridor. In the area, most studies are focused on surface and groundwater contamination, as well as its effects on crops and human health, with little information on the damage to aquatic communities. The objective of this work was to know the structural and functional characteristics of the macroinvertebrate assemblages of the Tula River and their relationship with environmental physicochemical variables. In the river basin, sampling was carried out in the main channel, covering the upper, middle and lower reaches, in three climatic seasons (rainy, warm drought and cold drought). Macroinvertebrates were collected through a semi-quantitative multihabitat sampling and identified at the family level, to obtain diversity, taxonomic richness, relative abundance, and functional groups; which were correlated with environmental variables and physicochemical parameters, through a principal component analysis (PCA) and a Pearson correlation analysis. A total of 55 families belonging to 23 orders were found, of which Diptera and Trichoptera had the highest number of families, with 9 each. Diptera of the family Chironomidae were the organisms with the highest frequency in space and time. In the three seasons, sites 1 (Taxhimay River) and 5 (Requena Exit) showed greater stability in structural and functional composition, with the presence of scrapers, fragmenters, filter feeders, predators and collectors. This was associated with higher amounts of oxygen and the availability of microhabitats and food sources. The middle basin was the most affected due to the entry of polluted waters, presenting poor habitat quality, with high concentrations of total nitrogen, total phosphorus and total organic carbon, with few or no presence of organisms. In the lower basin, a low diversity of organisms was found, mainly foragers, which is associated with high amounts of organic matter. These results show that in the Tula River, the establishment of macroinvertebrates is influenced by environmental and spatiotemporal changes, mainly associated with anthropogenic disturbances.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contaminación acuática

La contaminación hídrica es un problema a nivel mundial, ocupa uno de los primeros lugares de atención pública, debido al continuo deterioro del entorno y el acelerado agotamiento de los bienes naturales. La mayoría de los cuerpos receptores de agua epicontinentales; así como, de los mantos freáticos, presentan distintos niveles y tipos de perturbación, provocando riesgos a los ecosistemas y a la salud humana. Esto surge como consecuencia del vertido indiscriminado de efluentes industriales, urbanos, de origen agrícola o pecuario (Sánchez, 2002), drenajes de minas y lixiviados de rellenos sanitarios, los cuales son liberados hacia cauces naturales sin ningún control (Bohórquez y Campo, 2007). Además, de actividades aledañas como la agricultura, deforestación, fragmentación del hábitat, cambios del sustrato por la remoción y extracción de materiales, actividad petrolera, entre otras (Domínguez y Fernández, 2009; CONAGUA-SEMARNAT, 2019).

En las últimas décadas, el daño de los ecosistemas acuáticos ha ido en aumento por el incremento de las actividades humanas (Domínguez y Fernández, 2009). En México, la mayoría de los cuerpos de agua superficiales del país reciben descargas de aguas residuales sin tratamiento, lo que ha ocasionado que presenten un creciente deterioro en su calidad, llevando a diferentes grados de contaminación. Se considera que del 24 al 49% de los cuerpos de agua superficiales se encuentran en un rango de poco a muy contaminados, mientras que sólo el 5% presenta una calidad excelente. Esta problemática se extiende diariamente hacia nuevos sistemas hídricos (CONAGUA, 2013; CONAGUA-SEMARNAT, 2018).

La realización de estudios en ecosistemas acuáticos, debe contemplar no solo las características físicas y químicas, sino también las actividades que impactan de manera directa e indirecta en estos. Comprende todo el panorama de lo que ocurre en la cuenca y no solo en el sitio. En el caso de los ríos es de vital importancia conocer la dinámica río arriba, ya que la contaminación que se genere ahí, repercutirá río abajo; asimismo, hay que considerar las modificaciones que se desarrollan en torno al uso del agua, como la construcción de presas y desviación de canales para riego, las cuales crearán modificaciones en la morfología de los cauces (Hernández y Nelida, 2018).

La evaluación de la calidad de los cuerpos de agua se ha realizado mayoritariamente basada en análisis fisicoquímicos y microbiológicos; sin embargo, estos únicamente dan una idea sobre la calidad del ambiente en un cierto momento y no ofrecen información sobre las variaciones en el tiempo. Actualmente muchos países han aceptado incluir a las comunidades de organismos en la evaluación de los ecosistemas, principalmente a los macroinvertebrados acuáticos (Roldán, 1988; Pino y Bernal, 2009). En México la red de monitoreo de la calidad del agua, además de los parámetros habituales, a partir del 2017 ha empezado a considerar en algunas regiones el uso del índice de diversidad de organismos bentónicos (CONAGUA-SEMARNAT, 2018).

1.2. Generalidades de los macroinvertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados acuáticos son organismos que se pueden observar a simple vista, alcanzan tamaños superiores a los 2 mm, al menos durante algún estadio de su ciclo de vida viven exclusivamente en cuerpos de agua como: ríos, lagos, lagunas, aguas estancadas, pozas, humedales y charcos (Carrera y Fierro, 2001). Incluyen diferentes taxas: moluscos (caracoles y almejas), crustáceos (camarones y cangrejos), algunas especies de gusanos (nematodos, planarias, anélidos), ácaros y un gran número de especies de insectos (larvas y adultos). Entre los que destacan por su abundancia y distribución los órdenes: Ephemeroptera, Plecoptera, Odonata, Hemiptera, Coleoptera, Trichoptera y Diptera (Alba *et al.*, 2005; González *et al.*, 2013).

El tiempo de la duración del ciclo de vida de estos organismos depende de la especie y factores ambientales, como la temperatura del agua y la disponibilidad de alimento y puede ser desde pocas semanas hasta varios años. En los ambientes tropicales, los ciclos de vida por lo general son multivoltinos (varias generaciones al año que se traslapan), usualmente no presentan una estacionalidad muy marcada en la emergencia de los adultos, como se da en zonas templadas, donde prevalecen los ciclos univoltinos o semivoltinos, con una o dos generaciones al año (Vásquez *et al.*, 2009 en Hanson *et al.*, 2010).

La mayoría de los macroinvertebrados viven sobre algún tipo de sustrato, los que habitan el fondo se les denomina bentónicos, estos poseen adaptaciones que les permiten excavar, construir túneles o enterrarse en los sedimentos blandos, suelen tener numerosas setas en la

parte dorsal del cuerpo, la cabeza aplanada y patas anteriores adaptadas para cavar. Existen especies no excavadoras que se entierran en etapas jóvenes o como respuesta a condiciones de sequía (Alba *et al.*, 2005; Hanson *et al.*, 2010).

Otros macroinvertebrados habitan en los tallos de plantas acuáticas, madera, rocas y diversos materiales del fondo, que les sirven como sustrato; aquí se incluyen varios grupos, uno de ellos son los agarradores, que muestran adaptaciones para sujetarse al sustrato en áreas de corriente fuerte, como son: garras largas y fuertes, ganchos en la punta del abdomen o una combinación de ganchos y setas; algunos tienen un cuerpo que funciona como una gran ventosa, el cuerpo aplanado y patas proyectadas lateralmente, lo que ayuda a minimizar la resistencia a la corriente del agua. Otro grupo son los reptadores, que viven en hábitats o microhábitats con poca corriente, desplazándose en la superficie del sustrato (rocas, sedimentos, hojarasca o madera). Asimismo, están los organismos trepadores, que viven en las partes sumergidas de las plantas acuáticas, aunque no necesariamente se alimenten de estas (Alba *et al.*, 2005; Merritt *et al.*, 2008; Hanson *et al.*, 2010).

En cuanto a su alimentación, los macroinvertebrados pueden ingerir plantas acuáticas, restos de otras plantas y algas, otros invertebrados, peces pequeños, restos de materia orgánica en descomposición, elementos nutritivos del suelo, nutrientes presentes en el agua y sangre de otros animales (Pennak, 1978; Alba *et al.*, 2005). Los herbívoros y carnívoros se alimentan de organismos vivos, mientras que los detritívoros se alimentan de materia orgánica en descomposición (detritus). Dentro de cada una de estas categorías se puede distinguir varios grupos funcionales, que se definen con base en su comportamiento alimenticio (Hanson *et al.*, 2010). De tal manera que los organismos que cumplen con la misma función en la regulación de los procesos ecosistémicos, forman parte de un mismo gremio o grupo funcional (Wallace y Webster, 1996).

1.3. Atributos de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos

En el estudio de las comunidades acuáticas se pueden utilizar diferentes enfoques, que nos permitan conocer características que cambien de forma predecible ante un incremento en las alteraciones antropogénicas; para un mejor análisis es conveniente utilizar parámetros relacionados con la estructura, como la riqueza, abundancia, diversidad, dominancia y

equitatividad. Asimismo, los relacionados con la función de la comunidad, como son los grupos funcionales presentes en el ecosistema (Alonso y Camargo, 2006; Merritt *et al.*, 2008).

La riqueza de especies constituye un reflejo de la salud de la comunidad, por su relación con la variedad de microhábitats y con la productividad primaria o cantidad de materia orgánica disponible. En conjunto, la riqueza y la abundancia reflejan la diversidad, una comunidad con alta diversidad es aquella que tiene una alta riqueza y una abundancia de individuos distribuidos equitativamente, bajo el supuesto de que los recursos son aprovechados en proporciones similares por todas las poblaciones (Giller y Malmqvist, 2002; Alonso y Camargo, 2006).

Los cuerpos de agua oligotróficos, tienden a tener una baja riqueza y abundancia de macroinvertebrados; la poca concentración de nutrientes afecta la biomasa de macrófitas y con esto disminuye la disponibilidad de refugios y alimento para estos organismos, generando que no existan las condiciones necesarias para sostener varias poblaciones (Merritt y Cummins, 1998; Giller y Malmqvist, 2002).

En ecosistemas eutróficos, aunque la abundancia sea alta, la riqueza es baja y existen solo una o dos especies dominantes; lo que indica disturbios por el aumento de la contaminación orgánica, provocando que la densidad de especies tolerantes incremente, volviéndose dominantes. Por esta razón, la especie o familia dominante y su nivel de tolerancia indican el grado de perturbación de un cuerpo de agua y el deterioro en la estructura de la comunidad (Alonso y Camargo, 2006).

Para el caso de los macroinvertebrados, conforme incrementan los nutrientes aumentan las fuentes de alimento e indirectamente también la cantidad de refugios, por tanto, se espera un incremento en la riqueza de macroinvertebrados; sin embargo, ante procesos de eutrofización antropogénica la materia orgánica se vuelve más abundante, haciendo que solamente las especies detritívoras y con amplias tolerancias como los quironómidos, oligoquetos, hirudineos y algunas familias de dípteros y coleópteros puedan sobrevivir; mientras que la abundancia de grupos como Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera se reduce significativamente y pueden llegar a desaparecer; debido a esto, se espera que los ecosistemas

con una productividad intermedia sean los que presenten una mayor riqueza (Giller y Malmqvist, 2002; Alonso y Camargo, 2006).

Para entender el funcionamiento de un ecosistema acuático, no es indispensable conocer la función de cada especie en particular, sino únicamente el papel que cada grupo tiene en el sistema; de esta forma los macroinvertebrados pueden clasificarse en diferentes grupos funcionales: raspadores, fragmentadores, recolectores, filtradores y carnívoros. Los raspadores son aquellos organismos que raspan el perifiton y las algas adheridas a las superficies orgánicas y minerales. Los fragmentadores se alimentan de tejido vegetal vivo o materia orgánica particulada gruesa, como restos de hojas, madera en descomposición o raíces enterradas en los sedimentos (Wallace y Webster, 1996; Grimaldo, 2004), generalmente toman fragmentos mayores a un 1 mm y los convierten en partículas más finas (Merritt *et al.*, 2008; Hanson *et al.*, 2010). Los recolectores, se alimentan de materia orgánica particulada fina, constituida por partículas de detritus y materia en descomposición menor a 1 mm de diámetro. Los filtradores, incluyen a los organismos que utilizan estructuras anatómicas especializadas, como pelos, abanicos bucales, redes de seda, patas con brochas de setas y branquias ciliadas, todo esto para recolectar las partículas finas suspendidas en el agua (Rosenberg y Resh, 1993; Wallace y Webster, 1996; Merritt y Cummins, 1996).

Otro grupo lo constituyen los carnívoros, los cuales se alimentan de otros animales e incluyen tres categorías: los depredadores, los parasitoides y los parásitos. En lo referente a los depredadores, la mayoría mastican a la presa, pueden inyectar enzimas y succionar su contenido; a menudo poseen adaptaciones morfológicas para capturar su presa, algunos filtradores son depredadores cuando se alimentan de zooplancton. Los parasitoides y parásitos viven en asociación íntima con su hospedero; sin embargo, los primeros siempre lo matan, mientras que los parásitos, generalmente no lo hacen, aunque pueden provocarle la muerte si la población es muy alta (Hanson *et al.*, 2010).

Ecológicamente, los macroinvertebrados realizan funciones esenciales en la mayoría de los procesos de los ecosistemas acuáticos, como la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de nutrientes (Wallace y Webster, 1996). Las cadenas alimentarias acuáticas se basan en material producido dentro del sistema o el que ingresa desde afuera. Estos organismos son importantes para mover esta energía a diferentes niveles tróficos; asimismo,

puede influir en las tasas de productividad primaria, al consumir gran cantidad de algas y otros microorganismos asociados con el perifiton en ríos o con el plancton en lagos; además, este consumo puede incrementar la producción primaria, debido a que eliminan el tejido poco productivo y se mineralizan los nutrientes (Wallace y Webster, 1996; Grimaldo, 2004).

En sistemas basados en material alóctono, los macroinvertebrados fragmentadores son vitales para mover esta energía a diferentes niveles tróficos, generando fragmentos pequeños de materia orgánica que sean accesibles para otros organismos, como los recolectores y filtradores; al mismo tiempo, los filtradores, remueven partículas finas de seston del agua y las convierten en materiales fecales más densos que se hunden y proveen alimento para otros organismos, garantizando que los nutrientes permanezcan dentro del ecosistema (Hanson *et al.*, 2010). Asimismo, son consumidores en niveles tróficos intermedios y ejercen efectos regulatorios, descendentes sobre el fitoplancton y ascendentes sobre las poblaciones de peces insectívoros (Pennak, 1978; Wallace y Webster, 1996). Muchos macroinvertebrados acuáticos son componentes importantes de la dieta de animales terrestres como aves, murciélagos y arañas e incluso pueden afectar su distribución (Hanson *et al.*, 2010).

La degradación de los ecosistemas acuáticos, representa una amenaza para los macroinvertebrados, debido principalmente a la contaminación, la pérdida y alteración del hábitat y la introducción de especies exóticas. Una de las principales consecuencias de los impactos antropogénicos, es la disminución de la diversidad; esto puede resultar en alteraciones de los procesos ecológicos en los que estos organismos participan, generando cambios en la dinámica trófica y la estructura de la comunidad, alterando la abundancia y la presencia de ciertos grupos funcionales (Pino y Bernal, 2009).

La distribución de las poblaciones de macroinvertebrados, obedece a su capacidad de locomoción y adherencia; otro factor que los afecta, es la presencia de competidores y/o depredadores, lo cual tiene implicaciones importantes, ya que puede modificar el hábitat en el que viven y alterar o disminuir la eficiencia con la que los organismos obtienen los recursos (Toman y Steinman, 1995; Merritt y Cummins, 1996; Wallace y Webster, 1996; Merritt *et al.*, 2008).

1.4. Uso de macroinvertebrados en la evaluación de calidad de cuerpos de agua

Los macroinvertebrados poseen características que los hacen idóneos para realizar estudios sobre el estado ambiental de los ecosistemas, debido a la alta diversidad taxonómica y los diferentes tipos de requerimientos ecológicos, que hacen que dentro de la comunidad exista una amplia variedad de respuestas ante las distintas perturbaciones y cambios del ambiente (Merritt *et al.*, 2008). Además, su relativamente escasa capacidad de desplazamiento y los largos ciclos de vida de varios grupos, permiten la realización de análisis espaciales y temporales de la contaminación. Por ejemplo, algunas especies de plecópteros que llegan a permanecer hasta dos años en fase larvaria, pueden ser utilizadas para entender la dinámica temporal de las perturbaciones (Rosenberg y Resh, 1993). Por el contrario, las especies que tienen ciclos de vida cortos y baja movilidad, permiten conocer efectos de disturbios ambientales a corto plazo y de forma localizada (Barbour *et al.*, 1999; Alonso y Camargo, 2006).

Entre los grupos más sensibles a las alteraciones ambientales, se encuentran las larvas de los insectos pertenecientes a los órdenes Tricotera, Ephemeroptera, Plecoptera, y las larvas y adultos de Coleóptera, estos tienen una alta sensibilidad a la contaminación y a la degradación de los ecosistemas (Merritt y Cummins, 1996; Merritt *et al.*, 2008). No obstante, otros grupos muestran una alta resistencia, como son algunas especies de oligoquetos, dípteros y moluscos; debido a que cuentan con estrategias para soportar condiciones de anoxia, poseen alta tolerancia a compuestos tóxicos o por la corta duración de sus ciclos de vida, lo cual les permite prosperar en ambientes adversos. Esta variedad de rangos de respuesta ante las perturbaciones, propicia que frente a una alteración haya especies muy sensibles que pueden desaparecer o reducir su abundancia considerablemente, mientras que las más tolerantes incrementan sus densidades. Gracias a esta propiedad se ha permitido el desarrollo de índices bióticos, basados en la tolerancia de los distintos taxa de macroinvertebrados a diferentes perturbaciones humanas (Rosenberg y Resh, 1993; Alonso y Camargo, 2006; Mafla, 2005; De la Lanza *et al.*, 2011).

Estos índices bióticos se basan en el concepto de organismo indicador, un sistema sencillo es la clasificación que agrupa a los organismos como intolerantes, facultativos y tolerantes. Para esto, a los grupos de macroinvertebrados se les asigna un valor numérico en función de su

tolerancia a un tipo de contaminación, los más tolerantes reciben un valor menor y los más sensibles un valor mayor, la suma de todos estos valores nos indica la calidad del ecosistema (Carrera y Fierro, 2001; Alonso y Camargo, 2006; Mafla, 2005; Oscoz, 2009).

En diferentes estudios se han relacionado los macroinvertebrados con variables fisicoquímicas específicas como la salinidad, el pH, concentración de metales pesados y el oxígeno disuelto. Por lo anterior, estos organismos han sido objeto de diversas investigaciones dirigidas a impacto ambiental de corrientes; además, el muestreo consta de un procedimiento sencillo y no requiere equipo costoso (Dall, 1995; Merritt y Cummins, 1996). La identificación a nivel de taxa como clases o familias, es relativamente sencilla y puede ser suficiente para realizar varios de estos estudios (Alonso y Camargo, 2006). Asimismo, los macroinvertebrados están presentes en casi todos los ecosistemas acuáticos continentales, haciendo que los monitoreos sean fácilmente comparables y repetibles (De la Lanza *et al.*, 2011).

1.5. Problemática de la zona de estudio

En México, uno de los cauces con alta contaminación es el Río Tula, localizado mayormente en el Estado de Hidalgo, el cual recibe descargas de aguas negras provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México desde los años veinte. Estos vertimientos se componen por una mezcla de agua de desecho doméstico, municipal e industrial, así como de agua pluvial; además, en su recorrido recibe escorrentías de campos y aguas residuales de las poblaciones aledañas (CONAGUA, 2010). Las aguas de este cauce han sido empleadas aproximadamente un 75% sin tratamiento formal, para irrigar 90,000 ha de producción agrícola del Valle del Mezquital, donde viven 700 mil habitantes, de estos aproximadamente 300 mil se encuentran expuestos a las amenazas sanitarias que representa el contacto directo con el agua (Soto, 2003; Badillo, 2008).

El Río Tula es un sistema dinámico, que además de recibir aguas de residuo, cuenta con varios aportes de agua provenientes de manantiales en distintos sitios. A lo largo de su cauce se construyeron presas para riego, control de avenidas y generación hidroeléctrica; así como, canales para desviación de agua destinada al riego, lo cual tiene un efecto en el ecosistema al controlar el cauce y promover la variabilidad del flujo en tiempo y espacio.

En el año 2017 en el municipio de Atotonilco de Tula, se concluyó la construcción de la planta tratadora de aguas residuales (PTAR) Atotonilco, clasificada como la cuarta más grande del mundo, la cual tiene el objetivo tratar con procesos químicos y bacteriológicos el 60 % de las aguas de residuo que se generan en la Zona Metropolitana del Valle de México y son vertidas en el Río Tula, con una eficiencia de tratamiento de 35 m²/s; con esto se espera que gradualmente se produzca una mejora en la calidad del agua de este efluente y por tanto, de la calidad del ambiente (SEMARNAT, 2011).

2. JUSTIFICACIÓN

En la cuenca del Río Tula, la mayoría de los estudios se enfocan en la fisicoquímica del agua, debido a la alta contaminación que presenta la cuenca media y a los problemas que esto ocasiona a las poblaciones aledañas; sin embargo, respecto a la calidad ambiental y en términos ecológicos no se han realizado suficientes investigaciones.

En lo referente a macroinvertebrados, únicamente se han hecho trabajos en el cauce del Río Moctezuma, ubicado a la salida de la presa hidroeléctrica Zimapán, reservorio receptor del Río Tula; abarcando la cuenca alta, media y baja de este río únicamente hay una tesis de licenciatura enfocada en insectos acuáticos (Eustaquio, 2018); sin embargo, no hay publicaciones que incluyan a los diferentes órdenes que conforman al grupo de los macroinvertebrados. Con este trabajo se pretende conocer cómo están estructurados los ensamblajes de macroinvertebrados y de esta forma contribuir al conocimiento sobre estos organismos y comenzar a entender el funcionamiento del ecosistema del Río Tula, en términos ecológicos. Asimismo, con el establecimiento de la PTAR Atotonilco, este estudio permitirá evaluar las condiciones de calidad ambiental y las características de los ensamblajes de estos organismos, antes de la operación de esta planta, sirviendo como antecedente para futuras investigaciones.

3. ANTECEDENTES

3.1. Estudios de macroinvertebrados en México

En México las investigaciones en los ecosistemas acuáticos en materia de calidad de agua y ambiental, se han realizado principalmente mediante análisis de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos. Dentro de los estudios enfocados a macroinvertebrados acuáticos se encuentra el trabajo realizado por Hurtado y colaboradores (2005), sobre la importancia ecológica de los macroinvertebrados bentónicos de la subcuenca del Río San Juan, Querétaro; en el cual realizaron muestreos mensuales a lo largo de un ciclo anual en tres localidades. Encontrando antes de la presa Zimapán 6,092 individuos y 19 órdenes, después de la presa 9,773 individuos pertenecientes a 16 órdenes y en el manantial 8,020 individuos distribuidos en 19 órdenes; concluyendo que el sitio menos perturbado es el manantial y las otras dos zonas se encuentran afectadas por las fluctuaciones debidas a la represa del cauce.

Otro estudio es el de López y colaboradores (2007), titulado “Biomonitoreo rápido para evaluar contaminación orgánica en el Río Lerma”, para el cual emplearon un Índice Biótico Extendido (IBE) basado en las comunidades de macrobentos y considerando distintos parámetros ambientales físicos y químicos: profundidad, velocidad de corriente, color, olor, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, nitrógeno total y fósforo total; esto durante los meses de junio, septiembre y noviembre del 2005. Como resultados obtuvieron que en septiembre, la cuenca media presentó un rango de ligera a severa contaminación, las cuencas media y baja se encontraron altamente contaminadas. Durante julio y noviembre todo el río quedó clasificado con severa contaminación, en cuanto a la comunidad de macrobentos encontraron cuatro phyla, seis clases, 14 órdenes y 30 familias.

Barba-Álvarez y colaboradores (2013), determinaron la calidad de agua mediante la sensibilidad y tolerancia de insectos acuáticos, empleando el índice biótico de Hilsenhoff (IBH) en tres ríos de Oaxaca: Copalita, Zimatlán y Coyula; como resultados obtuvieron una calidad de agua de buena a muy buena. Capps, y colaboradores (2014), realizaron una caracterización de los hábitats acuático y ribereño dentro y cerca del Parque Nacional de Palenque, Chiapas, mediante el uso de macroinvertebrados y las concentraciones de nitrógeno y fósforo; encontraron 15 órdenes, 40 familias y 78 géneros, concluyendo que el sistema se encuentra influenciado por las aguas residuales y la escorrentía agrícola.

Otra investigación es la llevada a cabo por Astudillo y colaboradores (2014), titulada “Descomposición de hojarasca en seis arroyos de Bosque Mesófilo de Montaña en la cuenca alta del Río La Antigua, Veracruz”, para lo cual midieron la tasa de descomposición en paquetes de hojarasca colonizados por insectos. Como resultados encontraron 4,017 individuos pertenecientes a 42 géneros, 35 en época seca y 28 para la lluviosa. Concluyendo que la descomposición de hojarasca en el sitio de estudio es un proceso estable a lo largo del año.

Piñón y colaboradores (2014), determinaron la integridad biótica de la microcuenca del Río Chiquito en Morelia, Michoacán; basándose en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, además de una valoración de la calidad ambiental visual. Como resultados obtuvieron 51,474 organismos pertenecientes a 69 familias, distribuidas en cuatro Phyla, ocho clases, ocho subclases y 18 órdenes. Encontrando que los sitios mejor conservados son los de la cabecera, la zona intermedia es la más afectada y en la parte baja se observó la capacidad resiliente del río.

En lo referente a la Cuenca de México, Caro y colaboradores (2015), evaluaron la calidad ecológica de los ríos periurbanos de la Ciudad de México, mediante los parámetros fisicoquímicos, hidromorfológicos, bacteriológicos y la riqueza en macroinvertebrados. Encontrando un total de 5 órdenes, 3 clases, 12 familias y 3 subfamilias, dentro de las cuales destacan los grupos Chironomidae, Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera. De acuerdo con las características hidromorfológicas, encontraron sitios con buena calidad relacionados con los taxones de macroinvertebrados: Nemouridae, Podonominae, Tanypodinae, Acarina, Baetis, Tipula, Antocha, Atopsyche, Glossosoma, Polycentropus, Hesperophylax y Limnephilus y sitios modificados antropicamente con flujos de descarga más bajos y con organismos de la clase Oligochaeta y el género *Simulium*. Concluyeron que un cambio en la estructura de la comunidad taxonómica y funcional de macroinvertebrados y la aparición de taxones identificados como tolerantes a la contaminación podrían estar relacionados con los cambios en el uso de la tierra y con las propiedades fisicoquímicas del agua; por lo cual, estos taxones podrían ser buenos indicadores de posibles sitios de referencia en otros ríos en la Cuenca de México.

En la Cuenca de México, Carmona y Caro (2017), realizaron un estudio para establecer las posibles condiciones de referencia y evaluar la calidad ecológica regional en ríos de montaña de esta cuenca, mediante la determinación de los parámetros hidromorfológicos, fisicoquímicos y biológicos, dentro de estos últimos incluyeron a los macroinvertebrados. Encontraron cuatro subcuencas con condiciones hidromorfológicas de alta calidad, las cuales tenían sitios oligotróficos, bien oxigenados y en lo referente a macroinvertebrados, la comunidad se componía por las familias de: Baetide, Chrironomidae, Dugesiidae, Heptageniidae, Limnephilidae, Tipulidae y la clase Arachnida (Acarina). En total encontraron 37 familias diferentes; asimismo, muestrearon la comunidad de algas y en conjunto del análisis de todos los parámetros; concluyeron que la estructura y función de los ríos se vio afectada principalmente por los cambios estructurales en el lecho del río.

3.2. Estudios realizados en la zona de estudio

La mayoría de los estudios en el Río Tula, se enfocan en la fisicoquímica y la contaminación tanto en agua superficial como subterránea, principalmente en la cuenca media, donde las aguas negras promueven la alta productividad agrícola del Valle del Mezquital, particularmente de la zona Tepeji del Río-Tula de Allende. Entre estas investigaciones se encuentra la de Herrera (2006), quien llevó a cabo una evaluación de la calidad fisicoquímica, abarcando diversos sitios a lo largo del río Tula. Montelongo y colaboradores (2008), hicieron una modelación de la calidad del agua de este río, con el objetivo de determinar la capacidad de asimilación y dilución del Río Tula, en el tramo que comprende desde el Emisor Central hasta su confluencia con la presa Endhó y las cargas de contaminantes que pueden recibir.

Ontiveros y colaboradores (2013), evaluaron las aguas residuales para riego en el Valle del Mezquital. López y colaboradores (2015), elaboraron un trabajo para conocer la variación de carbono orgánico disuelto en la cuenca del Río Tula. Asimismo, Rubio y colaboradores (2016), realizaron un estudio de bioacumulación de los metales pesados: arsénico, cadmio y plomo en zooplancton y peces de esta cuenca.

Como antecedente del estudio de macroinvertebrados en la zona, únicamente se ha realizado un trabajo de tesis de licenciatura, por Eustaquio (2018); el cual se enfocó en los insectos

acuáticos del Río Tula y su composición, abundancia y distribución. Este se llevó a cabo en tres periodos estacionales, secas cálidas, postlluvias y secas frías, en ocho sitios, abarcando la zona alta, media y baja. Encontrando 7 órdenes de insectos distribuidas en 32 familias; Coleoptera (Dryopidae, Dytiscidae, Elmidae, Hydrophilidae y Staphylinidae), Diptera (Ceratopogonidae, Chironomidae, Empididae, Psychodidae, Simuliidae y Tipulidae), Ephemeroptera (Baetidae, Caenidae, Hetageniidae, Leptohephidae y Leptophlebiidae), Hemiptera (Belostomatidae, Corixidae, Naucoridae y Veliidae), Megaloptera (Corydalidae), Odonata (Aeshnidae y Calopterygidae) y Trichoptera (Calamoceratidae, Glossosomatidae, Helicopsychidae, Hydrobiosidae, Hydropsychidae, Hydroptilidae, Philopotamidae y Polycentropodidae). Además, encontró en mayor abundancia el orden Diptera y en mayor abundancia y distribución la familia Chironomidae. La zona alta fue la que presentó mayor abundancia, composición y mejor calidad ambiental, en la parte media encontró una calidad de ambiente muy mala y una disminución en la composición y la zona baja mostró recuperación en órdenes y familias, pero inferior a la zona alta.

4. HIPÓTESIS

Se espera que haya una variación en la calidad ambiental a lo largo del cauce, generando diferencias en la disponibilidad de hábitats y condiciones físicas y químicas, lo cual se verá reflejado en los componentes estructurales y funcionales de los ensamblajes de macroinvertebrados, por tanto, los sitios con menor perturbación antrópica presentarán ensamblajes más complejos y con una mayor cantidad de grupos funcionales, en comparación con los de mayor impacto antrópico, donde sucederá lo contrario. Asimismo, se espera encontrar variaciones asociadas a las diferentes temporadas estacionales.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Caracterizar los ensamblajes de macroinvertebrados del Río Tula y conocer su relación con las variables ambientales de las diferentes localidades a lo largo de este río.

5.2. Particulares

- Conocer la composición y distribución de los macroinvertebrados del Río Tula en tres periodos estacionales (lluvias, secas frías y secas cálidas).
- Determinar espacio-temporalmente los grupos funcionales presentes en los ensamblajes de macroinvertebrados.
- Caracterizar los hábitats mediante el uso de variables físicas y químicas.
- Determinar la asociación del marco ambiental con las características de los ensamblajes de macroinvertebrados.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio

La cuenca del Río Tula se encuentra localizada en la región hidrológica No. 26, obtiene su nombre del Río Tula, que es su principal colector y abastecedor de agua para uso agrícola. Este afluente constituye el colector general del Río Pánuco en sus orígenes, tiene su nacimiento en el cerro de La Bufa, el cual establece el parteaguas entre las cuencas del Pánuco y el Lerma en el Estado de México. Este río inicia su recorrido con dirección norte hasta la población de Ixmiquilpan, posteriormente cambia su curso hacia el noroeste, desembocando en la presa hidroeléctrica Zimapán, en el límite entre Querétaro e Hidalgo; a partir de este punto y después de recibir las aportaciones del río San Juan, cambia su nombre a Río Moctezuma (Badillo, 2008) y en la llanura costera es conocido como Río Pánuco. Descarga en el golfo de México, ligeramente aguas abajo de la Ciudad de Tampico, Tamaulipas (Montelongo *et al.*, 2008).

La cuenca drenada por el Río Tula, abarca un área de 6,551 Km². Queda comprendida entre los meridianos 98°41' y 99°41' LO y entre los paralelos 19° 36' y 20° 41' LN (Downs *et al.*, 1999) a una altitud promedio de 1,900 msnm. Dentro de la cuenca se ubican 11 municipios pertenecientes al Estado de México y 22 correspondientes al Estado de Hidalgo. El flujo de este río es incrementado por el aporte de distintos tributarios y controlado por la construcción de varias presas y canales de riego a lo largo de su cauce. En su origen tiene un curso nor-noroeste y drena la falda norte de la sierra de la Catedral, hasta ser controlado en la presa Taxhimay, aguas abajo de esta presa recibe aportes por parte del río de los Sabios, el arroyo Barranca de Pilares y el río del Oro (CNA, 2003).

Los escurrimientos del río por la presa Taxhimay, son derivados 3 km aguas abajo hacia la margen izquierda mediante la presa Golondrinas, para su uso en riego hasta la zona de Tepeji del Río. Aguas arriba de esta población, en la presa Romera, se derivan los escurrimientos del río, utilizados para riego de una pequeña zona comprendida en la margen derecha y hasta la presa Requena (Montelongo, *et al.*, 2008).

La presa Requena recibe por la parte sur las aguas del Río Tepeji, que capta los escurrimientos de la presa Taxhimay y las descargas de las aguas residuales del municipio

de Tepeji del Río y de la actividad industrial de la zona; por el sureste recibe los escurrimientos de pequeños manantiales (Chong, 1989). Esta presa alimenta directamente al canal principal que domina gran parte del Distrito de Riego 03, comprendido entre los ríos Tula y Salado, el cual distribuye aguas con altos contenidos de materia orgánica, nutrientes y contaminantes al Valle del Mezquital. Asimismo, por la margen izquierda, la presa alimenta al canal Schmelz, cuyas aguas se utilizan para riego de una pequeña zona y para generar energía hidroeléctrica (Soto, 2003).

Después de la presa Requena, el Río Tula cambia su curso al norte, pasando por las inmediaciones de los poblados de Jasso y Tula. Aguas abajo de Jasso recibe los aportes del Río Tlautla; posterior al poblado de Tula, recibe aguas por parte del Río Rosas. En el extremo norte de este tramo los escurrimientos son controlados por la presa Endho, la cual constituye la obra de almacenamiento más importante dentro de esta cuenca, cuenta con una capacidad total de 182 millones de m³ y sus aguas son utilizadas para riego. Otro de los aportes importantes al Río Tula es por parte del Río Salado, el cual incrementa su cauce artificialmente transportando las aguas de residuo del Valle de México, por medio del gran canal y los túneles de Tequisquiác. Este río también es receptor de los vertimientos residuales e industrias de la zona, principalmente en el tramo comprendido entre Tepeji del Río y Tula de Allende, generando desechos que representan peligros a la salud humana y ambiental. Las mayores descargas industriales se generan por parte de la refinería Miguel Hidalgo de PEMEX (Montelongo, *et al.*, 2008).

En el tramo del Río Tepeji se generan descargas por parte de diversas empresas como Pilgrim's, dedicada a la elaboración de alimentos; distintas empresas manufactureras y de teñido de textiles, existiendo tres sucursales de Kaltex, dos industrias de Textiles Tepeji, Tejidos Flanel, Zatex Tepeji, Confecciones Tepeji y Cintas y Elásticos Marel. Otros aportes en este tramo se generan por el balneario Vicente Narváez Arcos y las descargas por parte la Comisión de Agua y Alcantarillado del municipio de Tepeji del Río de Ocampo. En la parte del poblado de Tula, el río recibe descargas de la cementera Cruz Azul, la CFE sucursal Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, la empresa Sigma Alimentos y residuos de la población en distintos puntos del río, regulados por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Tula (Montelongo, *et al.*, 2008).

El clima de la zona es templado subárido, con temperatura media anual de 17 °C, una precipitación promedio de 584 mm y evapotranspiración de 1,750 mm; el mes más seco es febrero, con precipitación promedio de 5 mm; los meses de lluvias van de junio a septiembre, con las mayores precipitaciones en el mes de julio, con 114 mm (Fig. 1). Los principales tipos de suelos que se encuentran son leptosoles, feozems y vertisoles. La vegetación natural se limita a las partes montañosas y se compone de matorrales xerófilos, principalmente mezquites (*Prosopis juliflora*), huizaches (*Acacia farnesiana*), yucas (*Yucca sp.*), así como una gran diversidad de cactáceas. Los valles están dedicados a la agricultura, donde el maíz y la alfalfa representan entre el 60 y el 80% de la producción, dependiendo del ciclo agrícola. En segundo término, se cultiva avena, cebada, frijol y en menor proporción trigo y hortalizas (chile, calabacita y betabel, entre otros). Además, en algunos sitios el agua se utiliza para la producción pesquera de especies como la tilapia y carpa barrigona (Jiménez *et al.*, 2005).

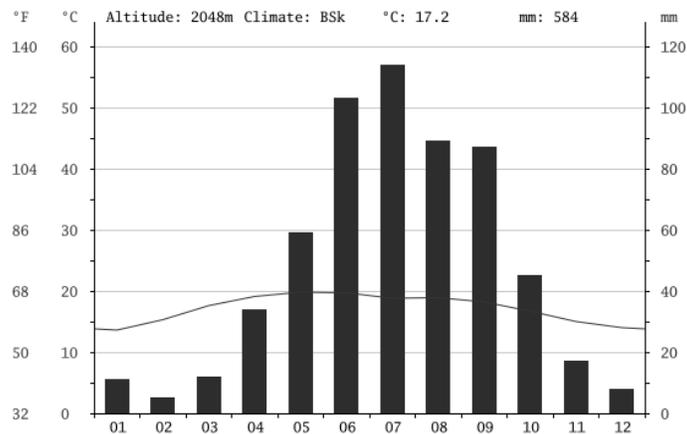


Figura 1: Climograma de Tula de Allende, Hidalgo. Tomado de <http://es.climate-data.org/location/45563/>

6.1.1. Localidades de estudio

Las estaciones de muestreo, se ubicaron en el tramo que comprende entre la entrada de la presa Taxhimay y la localidad de Tasquillo, antes de la descarga del río en la presa Zimapán; comprendiendo un trayecto de río de aproximadamente 160 km. De acuerdo con su posición geográfica, los sitios Río Taxhimay, Tepeji del Río, Tianguistengo, Emisor Central, Salida de Requena y el Salto, se encuentran dentro de la cuenca alta del Río Tula, donde el clima

predominante es templado subhúmedo, el uso de suelo es principalmente para agricultura de temporal, pastizales inducidos y urbanos (Anexos-Tabla 1).

En la cuenca media, quedan comprendidos los sitios: San Marcos, Tula, Tepetitlán, Binola, Río Salado y Mixquiahuala. En la cuenca baja, se ubican las estaciones: Chilcuahutla, Ixmiquilpan y Tasquillo. En esta zona el clima es principalmente semiseco templado, aunque a altitudes más bajas el clima es seco-semicálido y semiseco-semicálido, el uso de suelo es principalmente de agricultura de riego anual, semipermanente y de temporal; una proporción la ocupan los pastizales inducidos y en la parte de San Marcos y Tula el uso urbano e industrial es mayor que en el resto de la cuenca (Anexos-Tabla 1, figura 2).

SITIOS DE MUESTREO

1. Río Taxhimay
2. Tepeji del Río
3. Tianguistengo
4. Emisor Central
5. Salida de Requena
6. El Salto
7. San Marcos
8. Tula
9. Tepetitlán
10. Binola
11. Río Salado
12. Mixquiahuala
13. Chilcuahutla
14. Ixmiquilpan
15. Tasquillo
- Ⓢ Planta de tratamiento

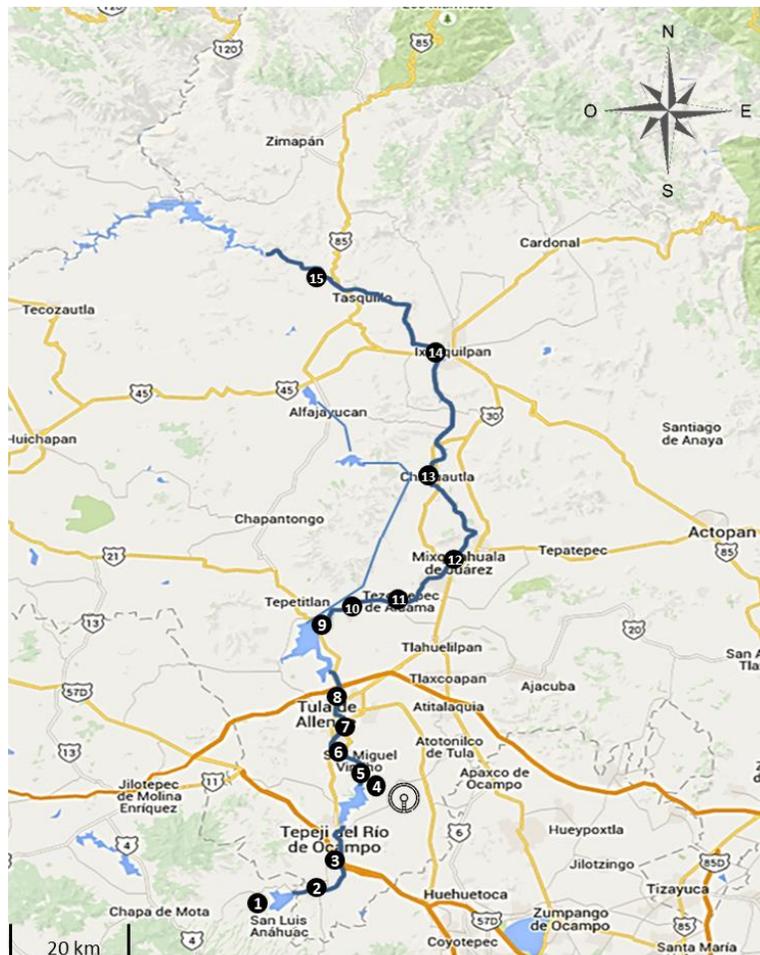


Figura 2: Mapa de la zona de estudio, ubicación y distribución de los sitios de muestreo en el cauce del Río Tula. Elaborado a partir de imágenes modificadas de Google Maps, 2022. Los sitios 4 y 6, representan las principales entradas de agua residual proveniente del Valle de México.

6.2. Toma de muestras

Se realizaron tres muestreos en el Río Tula, ubicado en el estado de Hidalgo, en los meses de septiembre y noviembre del 2016 y abril del 2017, comprendiendo las diferentes temporadas climáticas: lluvias, sequía fría y sequía cálida, respectivamente. Con el fin de conocer la composición de los ensamblajes de macroinvertebrados de acuerdo con las variaciones que se presentan con los cambios en las diferentes temporadas.

Para realizar el muestreo, se eligieron 15 sitios a lo largo del río, abarcando la parte alta, media y baja, los cuales son representativos de la dinámica del cauce e impactos antrópicos (Fig. 2). El sitio uno (Río Taxhimay), se utilizó como blanco para referencia; debido a su mejor apreciación visual y organoléptica de calidad del ambiente y del agua, así como su ubicación antes del deterioro ambiental provocado por de la entrada de aguas negras y residuales.

En cada uno de los sitios se evaluaron *in situ* los siguientes parámetros: transparencia (disco de Secchi), profundidad promedio (Wetzel y Likens, 1991), oxígeno disuelto, temperatura, conductividad, turbidez, sólidos totales disueltos (STD) y pH, empleando una sonda multisensor YSI 520 MPS; además, se realizó una evaluación de la calidad del hábitat, basada en el Protocolo de Bioevaluación Rápida de la Agencia United States Environmental Protection Agency (USEPA), para la cual se evalúan cualitativamente 10 variables ambientales externas e internas del río (cobertura del sustrato, caracterización del sustrato, variabilidad del río, deposición de sedimentos, estado del flujo, alteración del canal, frecuencia de curvas, estabilidad de la zona ribereña, protección vegetal y ancho de la vegetación de la zona ribereña); así como, las actividades humanas en la zona próxima al sistema; esta clasificación considera los rangos de calificación: óptimos (20 a 16), subóptimos (15 a 11), marginales (10 a 6) y pobres (5 a 0) (Barbour *et al.* 1999). Estos parámetros son importantes, debido a que permiten conocer la dinámica hidrológica y fisicoquímica del cauce; además constituyen rasgos ecológicos que influyen en la composición de los grupos de macroinvertebrados, al relacionarse con la presencia y distribución de estos organismos, por asociarse a la disponibilidad de alimento y hábitats (URA, 2014).

Para la determinación de nutrientes, de cada sitio se tomó una muestra superficial simple de 500 ml, la cual se prefiltró, mediante el uso de filtros de fibra de vidrio Whatman. Se tomó una segunda muestra de 500 ml que se conservó sin prefiltrar, para su posterior uso en la determinación de alcalinidad, carbono orgánico total disuelto (COT) y turbidez. Todas las muestras se etiquetaron debidamente y se congelaron hasta su análisis en el laboratorio (Wetzel y Likens, 1991; APHA, 1999). Las estaciones fueron georreferenciadas con un geoposicionador satelital (GPS) para facilitar su posterior localización (Tabla 2).

Tabla 2. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo.

No.	Localidad	Coordenadas	msnm
1	Río Taxhimay	19°50'10.70" N, 99°22'56.65" O	2,192
2	Tepeji del Río	19°53'42.16" N, 99°20'34.80" O	2,122
3	Tianguistengo	19°54'34.85" N, 99°19'53.78" O	2,115
4	Emisor Central	19°58'3.84" N, 99°18'28.75" O	2,095
5	Salida de Requena	19°57'59.54" N, 99°18'35.54" O	2,102
6	El Salto	19°56'21.08" N, 99°17'30.21" O	2,175
7	San Marcos	20°1'34.62" N, 99°20'17.82" O	2,047
8	Tula	20°3'41.41" N, 99°20'49.17" O	2,040
9	Tepetitlán	20°9'57.72" N, 99°21'29.89" O	1,994
10	Binola	20°10'50.20" N, 99°20'28.30" O	1,990
11	Río Salado	20°7'40.66" N, 99°14'31.49" O	2,055
12	Mixquiahuala	20°14'25.84" N, 99°13'49.27" O	1,926
13	Chilcuautila	20°19'33.67" N, 99°13'23.43" O	1,823
14	Ixmiquilpan	20°28'59.23" N, 99°13'14.43" O	1,700
15	Tasquillo	20°34'33.46" N, 99°20'45.99" O	1,598

6.3. Colecta de macroinvertebrados

En cada sitio, en un tramo de aproximadamente 10 m, se identificaron los posibles hábitats (parches) donde se observó la presencia de los organismos; en los cuales se realizó la colecta mediante un muestreo multihábitat y semicuantitativo. Cada sitio se muestreó durante 30 minutos, utilizando una red de mano tipo kick (de patada) de 25 x 45 cm y red de nylon de 500 µm de abertura de poro; la red se colocó a contracorriente durante aproximadamente cinco minutos en cada uno de los diferentes hábitats previamente identificados, llevando a cabo la remoción del sustrato delante de la boca de la red, examinando y desprendiendo los ejemplares que se encontraban adheridos a rocas tallos o troncos. Debido a que las

condiciones no fueron iguales en todos los sitios, aun en los que no se observó la presencia de organismos, se revisaron todos los posibles microhábitats, realizando el muestreo por el mismo periodo de tiempo. El material obtenido se homogenizó y se colocó en frascos con alcohol al 70%, los cuales se etiquetaron debidamente para su posterior separación e identificación en el laboratorio (Usinger, 1956; Hauer y Lamberti, 1996; Roldán, 1988; Alba *et al.*, 2005).

6.4. Laboratorio

6.4.1. Pruebas químicas

Las muestras de agua previamente prefiltradas, se filtraron mediante membranas Millipore, poro de 45 μm y 45 mm de diámetro y se les determinó fósforo y nitrógeno totales. De las muestras sin filtrar, se midió la alcalinidad, carbono orgánico total disuelto (COT) y sólidos totales disueltos (STD). Todo esto utilizando un espectrofotómetro HACH DR/2010 y de acuerdo con las técnicas propuestas por APHA (1999).

6.4.2. Revisión de muestras de macroinvertebrados

Cada muestra se separó y revisó utilizando un microscopio estereoscópico, en algunos casos se realizaron disecciones y se revisaron a microscopio óptico; se identificaron los organismos hasta el nivel taxonómico posible, dependiendo de la complejidad del orden. Para los propósitos de esta investigación no fue necesario llegar a especie, ya que con la identificación a nivel de familia e inclusive de órdenes, es posible conocer el grupo funcional al que pertenecen (Merritt y Cummins, 1996; Alonso y Camargo, 2006; Mafla, 2005). Además, a la hora de procesar los datos para conocer el panorama de la estructura de la agrupación de macroinvertebrados, las diferencias son mínimas si se trabaja con familias, con géneros o especies, siendo de mayor aporte realizar un trabajo cuantitativo que la inversión en tiempo en identificaciones más específicas.

La identificación se realizó con la ayuda de las claves taxonómicas incluidas en: Merritt y Cummins (1996); Molineri (2002); Molineri y Zúñiga (2006); Merritt y colaboradores (2008); Domínguez y Fernández (2009); Flowers y De la Rosa (2010); Ramírez (2010); Springer (2010); Oscoz (2009) y Prat y colaboradores (2012). A pesar de que en algunos

organismos fue posible realizar identificaciones a niveles más específicos, los análisis estadísticos se elaboraron con la identificación a nivel de familia, de esta forma se estandarizó la utilización del mismo nivel taxonómico en todos los casos.

Se realizó el conteo de la totalidad de individuos para obtener las abundancias relativas. Los conteos de las muestras con alta abundancia y poca diversidad, se realizaron mediante submuestras, de las cuales se realizó la extrapolación para conocer el número total de organismos en la muestra. Una vez identificados los organismos y de acuerdo con la clasificación por Merritt y Cummins (1996), se catalogaron sus hábitos alimenticios y se clasificaron en los grupos funcionales: raspadores, fragmentadores, recolectores, filtradores y depredadores, con la finalidad de conocer las funciones que realizan dentro del ecosistema. Los organismos raros de los cuales no se conoce bien al grupo funcional al que pertenecen, fueron excluidos de esta agrupación.

6.5. Análisis estadístico

A partir de la abundancia total y los conteos por familia, se obtuvieron los parámetros de riqueza taxonómica, abundancia relativa y el índice de Diversidad de Shannon (Margalef, 1998), esto por cada localidad y en las tres temporadas muestreadas.

Se utilizaron las abundancias por familia para conocer la distribución de los ensamblajes de macroinvertebrados, mediante análisis de agrupamiento o “clusters”, empleando el índice de similitud Bray-Curtis; para lo cual los datos fueron transformados previamente a raíz cuadrada, con la finalidad de disminuir el peso de las familias con elevadas abundancias. Para establecer una zonación del río y tener idea de los diferentes hábitats posibles, se realizó un análisis de similitud mediante clusters, con el uso de las variables físicas y químicas; utilizando el índice de similitud de distancias euclidianas con previa normalización de los datos. A todos los clusters se les aplicó el test SIMPROF para validar los grupos con un intervalo de confianza del 95%.

Análogo a los clusters de las abundancias de macroinvertebrados, para cada temporada se realizó un test SIMPER, con la finalidad de conocer las familias que están aportando la mayor similitud entre las diferentes agrupaciones de localidades.

Para conocer si existe una asociación entre los atributos de los ensambles de macroinvertebrados y las variables ambientales; asimismo, formar una agrupación de las localidades, considerando las características bióticas y abióticas e identificar qué variables influyen en mayor proporción a la ordenación de sitios; se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para cada temporada. Para conseguir una mejor ordenación se eliminaron las variables que median atributos iguales, por lo que tenían un alto valor de correlación entre ellas. Reduciendo al uso de 13 variables: riqueza taxonómica, abundancia relativa, diversidad de Shannon, cantidad de grupos funcionales, temperatura, oxígeno disuelto, pH, nitrógeno total, fósforo total, alcalinidad, turbidez, carbono orgánico total (COT) y el valor de la evaluación de calidad del hábitat de acuerdo con lo propuesto por Barbour y colaboradores (1999). Todos los análisis mencionados anteriormente fueron realizados mediante el programa estadístico PRIMER 7 versión 7.0.13.

Para conocer el grado de asociación entre las distintas variables, se realizó una prueba de correlaciones múltiples de Pearson, entre los parámetros ecológicos de riqueza taxonómica, abundancia y el índice de diversidad de Shannon, contra las variables físicas, químicas y cada uno de los rubros de caracterización de calidad del hábitat (utilizando el programa Statistica versión 10).

7. RESULTADOS

En el Río Tula, la comunidad de macroinvertebrados estuvo compuesta por 23 órdenes y 55 familias; se encontraron principalmente insectos, pertenecientes a nueve órdenes, distribuidos en 41 familias (Anexos-Tabla 18): Ephemeroptera (Baetidae, Caenidae, Leptophlebiidae, Leptohyphidae, Heptageniidae); Trichoptera (Hidropsychidae, Glossosomatidae, Polycentropodidae, Hydroptilidae, Hydrobiosidae, Helicopsychidae, Anomalopsychidae, Calamoceratidae, Leptoceridae); Diptera (Ephydriidae, Simuliidae, Chironomidae, Syrphidae, Empididae, Culicidae, Ceratopogonidae, Stratiomyidae, Psychodidae); Hemiptera (Veliidae, Hebridae, Corixidae, Naucoridae, Aphididae, Belostomateidae, Cicadellidae); Coleoptera (Elmidae, Dysticidae, Hydrophilidae, Staphylinidae, Dryopidae, Curculionidae); Odonata (Aeshnidae, Calopterygidae, Libellulidae, Coenagrionidae); Hymenoptera y Lepidoptera (Cambridae) (Anexos-Láminas 1 a 6).

Además, se identificaron 14 órdenes y 14 familias de otros grupos de macroinvertebrados, pertenecientes a: Collembola (Poduridae); Trombidiformes (Hydrachnidae); Aracnida; Lumbriculida (Lumbricidae, Lumbriculidae); Rhynchobdellida (Glossiphoniidae); Arhynchobdellida (Erpobdellidae); Seriata (Planariidae); Haplotaxida (Tubificidae); Nematoda; Mollusca (Planorbidae, Physidae, Bivalvia); Amphipoda (Hyalellidae); Isopoda (Asellidae); Decapoda (Palaemonidae) y Pseudoscorpion (Anexos-Láminas 7 a 9).

7.1. Estructura del ensamblaje de macroinvertebrados, septiembre 2016

En la temporada de lluvias, se encontraron 43 familias pertenecientes a 18 órdenes (Anexos-Tabla 15), los órdenes Ephemeroptera, Trichoptera, Diptera y Hemiptera presentaron seis familias cada uno. En el orden Ephemeroptera las familias Baetidae y Caenidae fueron las más frecuentes, encontrándose en cuatro sitios cada una; por otra parte, en el orden Trichoptera la familia Leptoceridae se encontró en tres localidades; en el orden Diptera destacaron por la frecuencia la familia Chironomidae (con presencia en 10 sitios) seguida de Simuliidae y Culicidae, ambas presentes en cuatro sitios. En lo referente a Hemiptera, la familia Corixidae fue la más frecuente encontrándose en dos sitios.

De acuerdo con el índice de similitud (Fig. 3), se forman tres grupos principales y cuatro localidades que no se agrupan; sin embargo, Binola mostró similitud con el grupo tres. En el caso de las localidades de Tula, San Marcos y Emisor Central, al ser sitios con alta perturbación no presentaron condiciones que permitieran el desarrollo de macroinvertebrados, por lo cual no formaron agrupaciones.

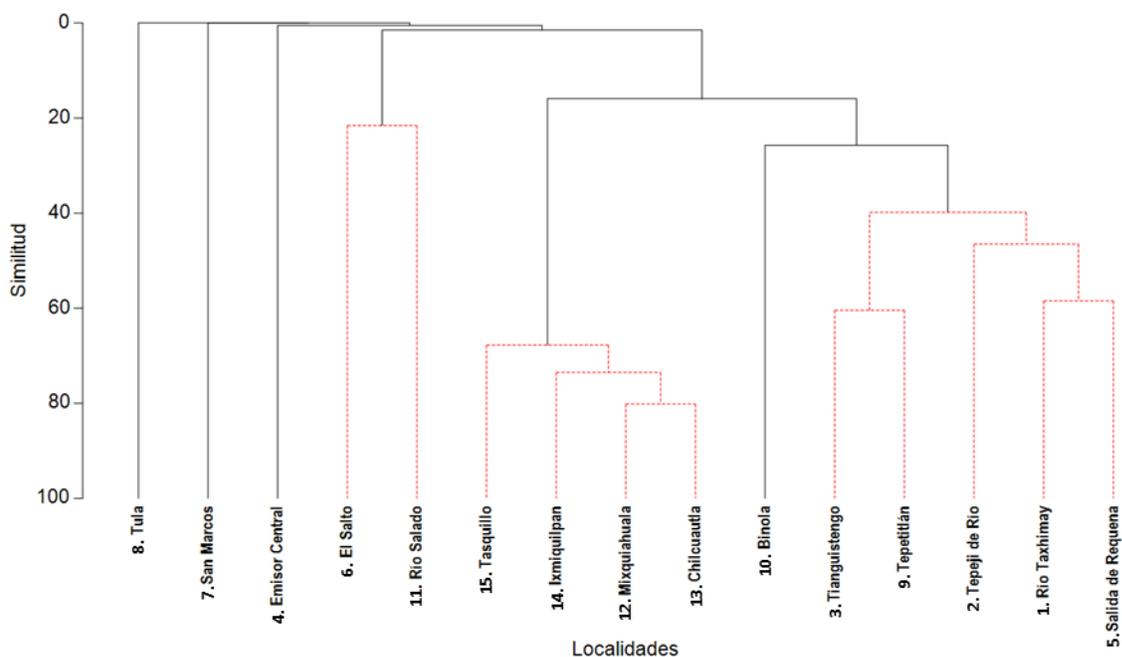


Figura 3. Similitud de la composición de ensamblajes de macroinvertebrados, septiembre 2016.

El primer grupo se formó por las localidades El Salto y Río Salado, sitios donde entran las aguas provenientes del Valle de México, de acuerdo con el test SIMPER, estos sitios se caracterizaron por presentar organismos únicamente de la familia Tubificidae, constituyendo el 100 % de la abundancia.

Un segundo grupo se conformó por las localidades Tasquillo, Ixmiquilpan, Mixquiahuala y Chilcuautla, que de acuerdo con el test SIMPER, se caracterizaron por presentar organismos de la familia Hyalellidae, los cuales constituyen la familia dominante. La riqueza taxonómica no superó las siete familias y las abundancias estuvieron entre 6,120 y 23,244 organismos, con un índice de diversidad Shannon-Weaver (H') de 0.07 a 1.04 bits/ind. (Tabla 3).

El tercer grupo se integró por las localidades Tlanguistengo, Tepetitlán, Tepeji del Río, Río Taxhimay y Salida de Requena, de acuerdo con el test SIMPER, la similitud en estos sitios

se debe a la presencia de las familias Chironomidae, Lumbriculidae y Betidae. Los parámetros ecológicos fueron los siguientes: riqueza específica de 3 a 27 familias, abundancia de 786 a 2,721 organismos, y el índice de Shannon-Weaver (H') con valores entre 1 y 2 (Tabla 3).

Tabla 3. Atributos de los ensamblajes de macroinvertebrados en las diferentes temporadas de muestreo (septiembre y noviembre 2016 y abril 2017).

	Riqueza (S)			Abundancia (N)			Índice de Shannon-W ($H'(\log 2)$)			Número de grupos funcionales		
	sep	nov	abr	sep	nov	abr	sep	nov	abr	sep	nov	abr
Río Taxhimay	12	21	32	786	2173	2338	1.853	1.898	2.828	5	5	5
Tepeji de Río	27	16	1	2721	1876	533	1.968	0.6206	0	5	5	1
Tiangustengo	17	10	0	822	187	0	2.014	1.645	0	5	5	0
Emisor Central	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Salida de Requena	15	17	15	1812	1620	818	2.051	2.112	2.611	5	5	4
El Salto	1	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0
San Marcos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tepetitlán	3	2	20	943	352	764	1.018	0.2006	2.621	1	1	5
Binola	6	4	12	4559	437	2547	0.09784	0.792	2.399	3	2	5
Río Salado	1	0	0	3288	0	0	0	0	0	1	0	0
Mixquiahuala	7	3	6	9163	410	5505	0.7171	1.584	0.3754	2	1	2
Chilcuautla	5	4	5	11176	332	2788	0.1194	1.072	0.3896	2	3	3
Ixmiquilpan	3	8	9	23244	7862	1112	0.07936	0.248	0.9608	1	3	4
Tasquillo	7	4	16	6130	9131	4615	1.042	0.1668	1.09	3	3	5

7.2. Estructura del ensamblaje de macroinvertebrados, noviembre 2016

En la temporada de sequía fría, se encontraron 38 familias pertenecientes a 18 órdenes. Diptera fue el orden con mayor número de familias (ocho); siendo Chironomidae la más frecuente, encontrándose en diez sitios; seguida de Simuliidae, con frecuencia en seis sitios. El orden Ephemeroptera fue el segundo con mayor número de familias (seis), las más representativas fueron Baetidae, Siphonuridae y Leptohephidae, encontrándose en tres sitios cada una. Las familias Tubificidae y los anfípodos de Hyalellidae se encontraron en cinco sitios cada una (Anexos-Tabla 16).

De acuerdo con el análisis de similitud, se formaron dos grupos principales y las localidades de Río Salado, Tula, San Marcos y Emisor Central no se agruparon, debido a la carencia de organismos, como resultado de una calidad de hábitat pobre (Fig. 4).

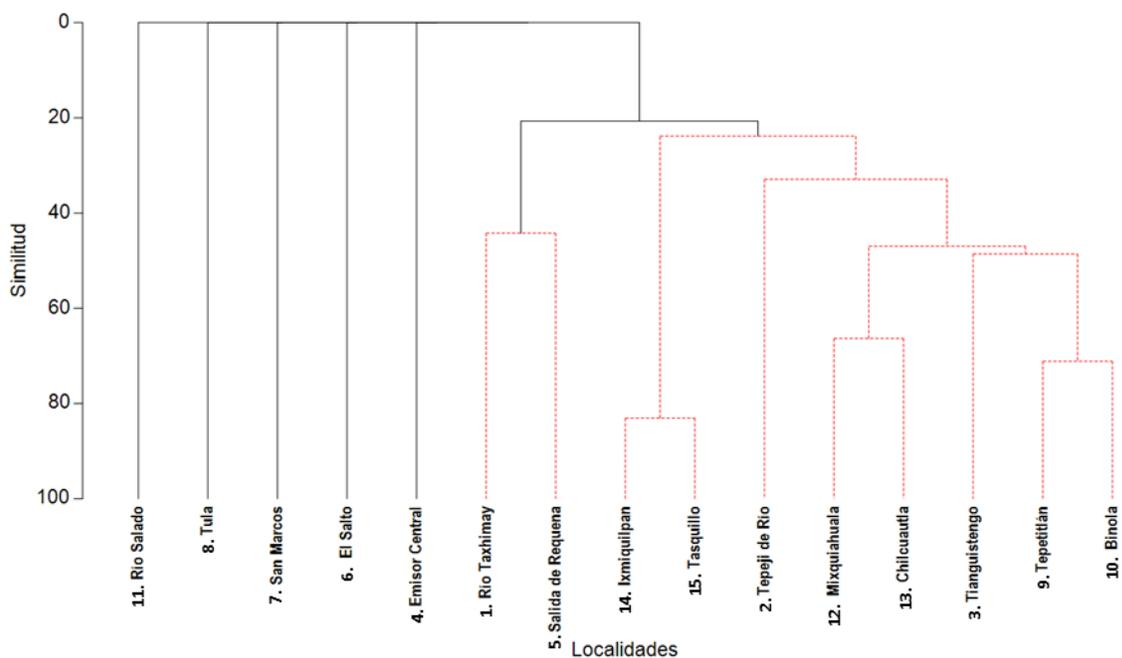


Figura 4. Similitud de la composición de ensamblajes de macroinvertebrados, noviembre 2016.

Los sitios Río Taxhimay y Salida de Requena se agruparon, de acuerdo con el test SIMPER, se caracterizaron por presentar organismos de las familias Chironomidae, Baetidae y Lumbriculidae. Presentaron una riqueza taxonómica de 17 familias en Salida de Requena y 21 en Río Taxhimay, una abundancia de 1,620 y 2,173 y un valor del índice de Shannon-Weaver de 2.1 y 1.9 bits/ind respectivamente (Tabla 3).

El segundo grupo estuvo conformado por las localidades Ixmiquilpan, Tasquillo, Tepeji del Río, Mixquiahuala, Chilcuaudia, Tianguistengo, Tepetitlán y Binola (Fig. 4). De acuerdo con el test SIMPER, estas localidades son similares por presentar organismos de la familia Chironomidae y Tubificidae. Dentro de este grupo, las localidades de Ixmiquilpan y Tasquillo tienen mayor similitud, en los cuales la familia Hyalellidae constituye el 96.8% y 97.6 % respectivamente de la abundancia total de organismos (Anexos-Tabla 16). En cuanto a los atributos del ensamblaje dentro de este grupo, la riqueza varió de 2 a 16 familias, la abundancia estuvo entre 187 a 9,131 organismos y el índice de Shannon-Weaver fue de 0.2 a 1.6 bits/ind (Tabla 3).

7.3. Estructura del ensamblaje de macroinvertebrados, abril 2017

En la temporada de sequía cálida se encontraron un total de 50 familias, pertenecientes a 19 órdenes (Anexos-Tabla 17). El orden Diptera presentó el mayor número de familias, con nueve, destacando por frecuencia Chironomidae y Simuliidae, en seis y cinco sitios respectivamente. El segundo orden con mayor cantidad de familias fue Trichoptera, con ocho, siendo Hydroptilidae la más frecuente, encontrándose en cuatro sitios. El orden Hephemeroptera presentó seis familias, con Baetidae y Leptohyphidae como las más frecuentes, presentándose en cuatro sitios cada una. El orden Hemiptera presentó cinco familias, de las cuales Corixidae fue la más frecuente, encontrándose en cuatro localidades. Por otra parte, la familia Physidae también mostró una alta frecuencia, hallándose en seis sitios; asimismo, las familias Planariidae y Lumbriculidae se encontraron en cinco localidades cada una.

De acuerdo con el análisis de similitud, se formaron dos grupos principales y las localidades de Río Salado, Tula, San Marcos y Emisor Central no se agruparon (Fig.5), debido a la carencia de organismos, como resultado de una calidad de hábitat pobre.

Los sitios Tepetitlán, Binola, Río Taxhimay y Salida de Requena formaron un grupo (Fig. 5); de acuerdo con el test SIMPER, se caracterizó por presentar dípteros de la familia Chironomidae, efemerópteros de la familia Baetidae y Leptohyphidae y gastrópodos de la familia Physidae. Presentaron una riqueza taxonómica de 12 a 32 familias, una abundancia de 764 a 2,547 organismos y valores del índice de Shannon-Weaver (H') de 2.4 a 2.8 bits/ind (Tabla 3).

El segundo grupo estuvo conformado por Tepeji del Río, Tasquillo, Ixmiquilpan, Mixquiahuala y Chilcuautla (Fig. 5); de acuerdo con el test SIMPER, estas localidades son similares por presentar anfípodos de la familia Haylellidae y organismos de Tubificidae. En estos sitios (Tabla 3), la riqueza varió de 1 a 16 familias, la abundancia estuvo entre 533 a 5,505 organismos y la diversidad de Shannon-Weaver (H') entre 0 y 1.09 bits/ind.

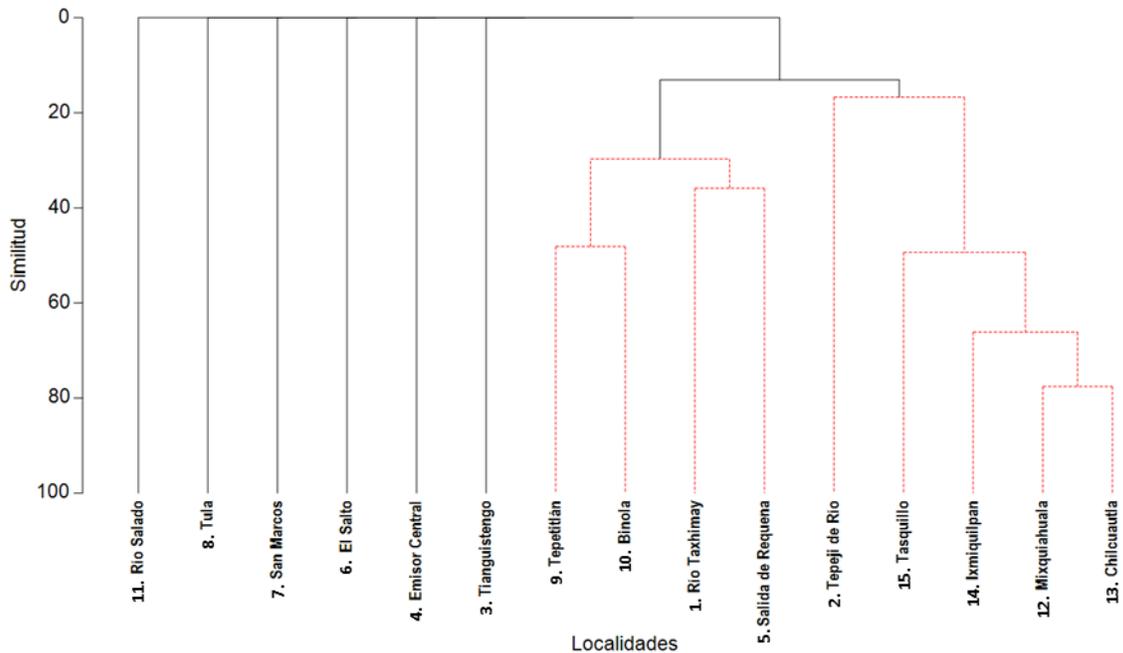


Figura 5. Similitud de la composición de ensamblajes de macroinvertebrados, abril 2017.

De manera general, en las tres temporadas las localidades de Río Taxhimay y Salida de Requena estuvieron entre las más diversas. A pesar de que Tianguistengo y Tepeji del Río presentaron los mayores valores de diversidad en la temporada de lluvias (septiembre, 2016), esto no se mantuvo en las dos siguientes temporadas. En el periodo de sequía cálida (abril, 2017) presentó organismos de una sola familia en el caso de Tepeji y sin presencia de organismos en Tianguistengo. Por el contrario, Tepetitlán, Binola y Tasquillo incrementaron su diversidad para el mes de abril. Mixquiahuala, Chilcuautla e Ixmiquilpan se mantuvieron con diversidades y composición de ensamblajes similares en las tres temporadas. Mientras que los sitios de Emisor Central, El salto, San Marcos, Tula y Río Salado, no presentaron organismos o solamente tubífidos.

7.4. Estructura funcional de los ensamblajes de macroinvertebrados

En la temporada de lluvias (septiembre, 2016), los sitios Río Taxhimay, Tepeji del Río, Tianguistengo y Salida de Requena, presentaron taxones de organismos pertenecientes a los cinco grupos funcionales (Fig. 6), el grupo que tuvo menos representantes fue el de los filtradores, por el contrario, el que tuvo mayor número de taxones, fueron los recolectores, caracterizados por el orden de los efemerópteros (Anexos-Tabla 18).

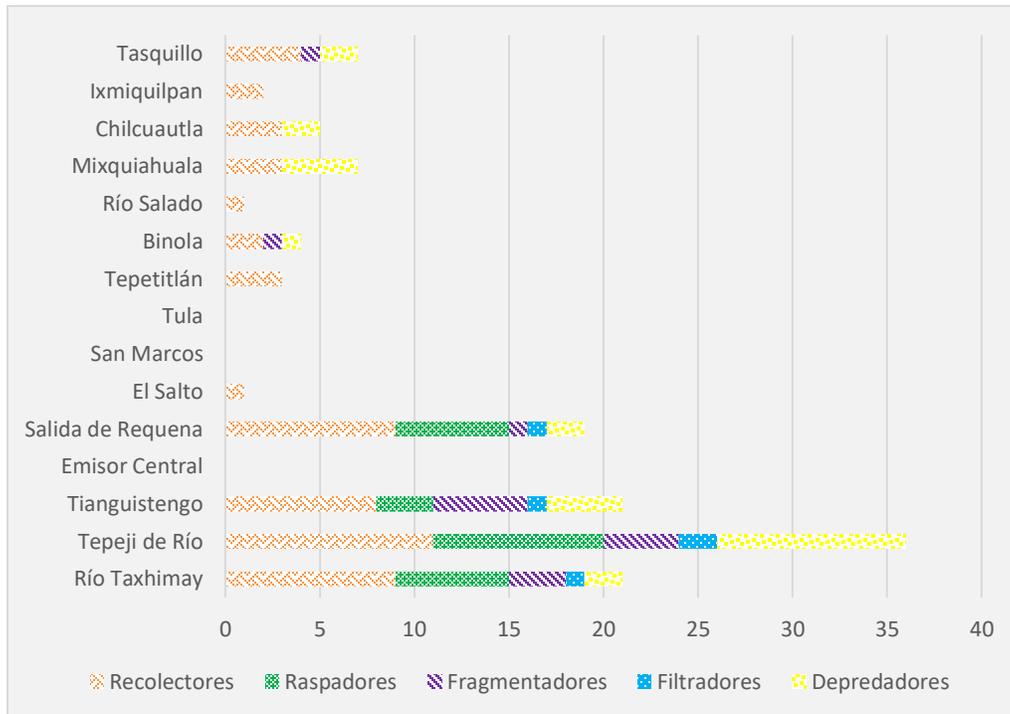


Figura 6. Grupos funcionales, septiembre 2016.

En los sitios Emisor Central, San Marcos y Tula no se encontraron organismos, el Salto y Río Salado únicamente presentaron organismos recolectores, tratándose de recolectores detritívoros del taxón de los tubificidos, Ixmiquilpan solamente presentó recolectores, representados por las familias Chironomidae y Hyalellidae, en las estaciones Mixquiahuala, Chilcuautla, Binola y Tasquillo, la mayoría de los organismos pertenecen a los grupos recolectores y depredadores, aunque Tasquillo y Binola presentan una pequeña fracción de fragmentadores coleópteros (Fig. 6).

En la temporada de sequía fría (noviembre, 2016), nuevamente los sitios Río Taxhimay, Tepeji del Río, Tianguistengo y la Salida de Requena, presentaron la mayor cantidad de grupos funcionales, con una elevada proporción de taxones pertenecientes a los recolectores; en el Salto, San Marcos, Tula, Río Salado y Emisor Central, no hubo organismos; en Tepetitlán y Mixquiahuala, solo se encontraron recolectores; en Binola, recolectores y raspadores. Las estaciones Tasquillo, Ixmiquilpan y Chilcuautla, presentaron organismos pertenecientes a tres grupos funcionales; en Tasquillo y Chilcuautla hubo presencia de recolectores, fragmentadores y filtradores; por último, en Ixmiquilpan se encontraron recolectores, fragmentadores y depredadores (Fig. 7).

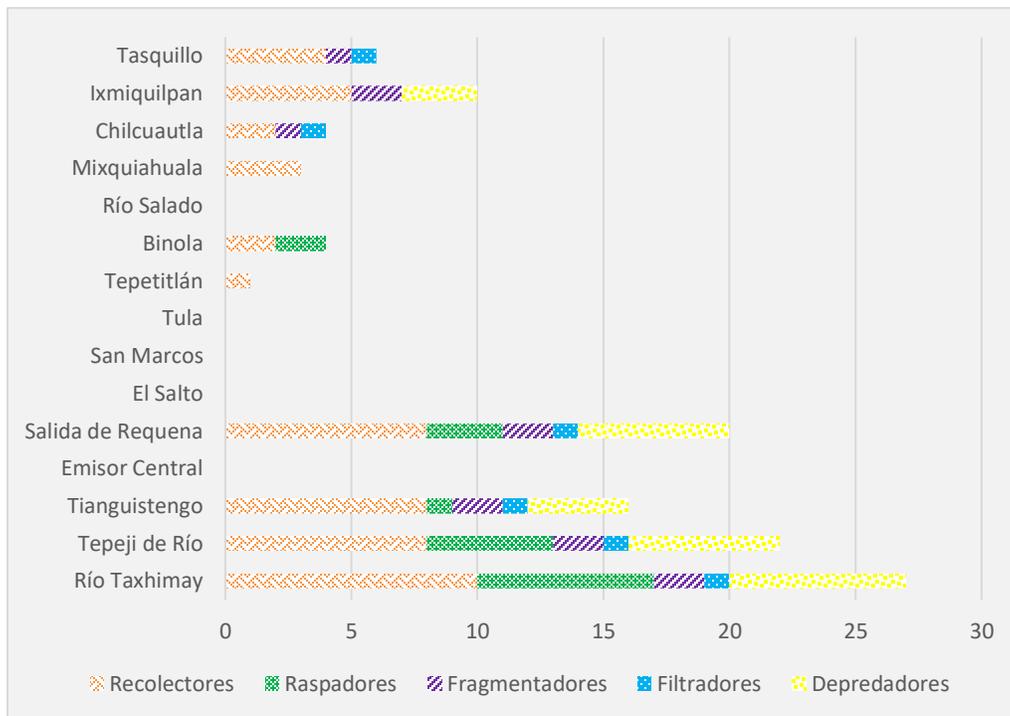


Figura 7. Grupos funcionales, noviembre 2016.

En la temporada de sequía cálida (abril 2017), Río Taxhimay presentó la más elevada cantidad de taxas, correspondientes a los cinco grupos funcionales, con mayor cantidad de raspadores, seguida de recolectores y depredadores; asimismo, los sitios Tepetitlán, Binola y Tasquillo, presentaron organismos de los cinco grupos funcionales; mientras que en Ixmiquilpan, se encontraron cuatro grupos (recolectores, depredadores, filtradores y raspadores); en cuanto a Chilcuautla, presentó tres grupos (recolectores, raspadores y depredadores); Mixquiahuala únicamente recolectores y depredadores; en Tepeji del Río solo hubo recolectores, tratándose de recolectores detritívoros, representados por los tubificidos. El resto de los sitios no presentaron organismos (Fig. 8).

Comparando las tres temporadas de muestreo, solamente en Río Taxhimay hubo taxones de los cinco grupos funcionales en las diferentes temporadas; en Tepeji del Río y Tianguistengo, durante lluvias (septiembre) y sequía fría (noviembre), presentaron taxones de los cinco grupos; sin embargo, en sequía cálida (abril), en Tepeji del Río solamente se halló un grupo y en Tianguistengo, debido a un dragado en la zona no hubo organismos. Por el contrario, las estaciones de Tepetitlán, Binola, Ixmiquilpan y Tasquillo, incrementaron la cantidad de grupos funcionales a lo largo de los muestreos.

Por otra parte, en los meses de septiembre y abril, Mixquiahuala tuvo dos grupos funcionales y en noviembre solamente uno; mientras que Chilcuautla en septiembre presentó dos grupos y en el mes de noviembre y abril se mantuvo con tres (Tabla 3). Finalmente, las estaciones Emisor Central, El Salto, San Marcos, Tula y Río Salado carecen de organismos y, por tanto, de grupos funcionales la mayor parte del tiempo.

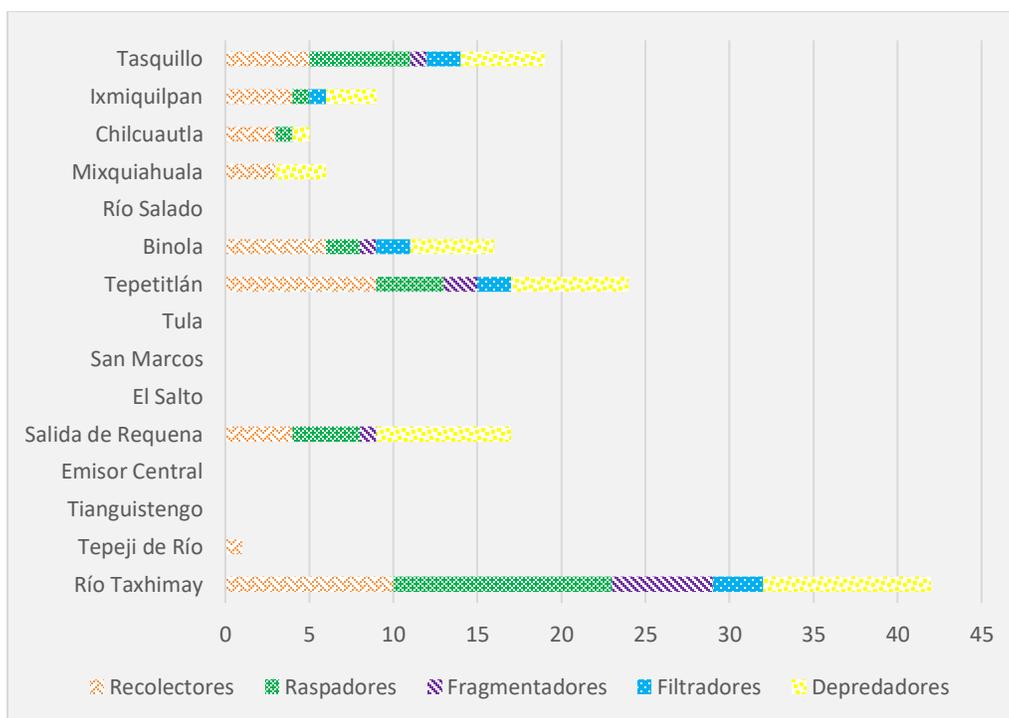


Figura 8. Grupos funcionales, abril 2017.

7.5. Abundancia por grupo funcional

En todo el tramo muestreado y en las tres temporadas, dominó el grupo de los recolectores con abundancias superiores a los 1,500 organismos. En la temporada de lluvias (septiembre, 2016) se presentaron las mayores abundancias, disminuyendo en los próximos meses muestreados; en este mes también se encontró la mayor cantidad de filtradores. En lo referente a los raspadores y depredadores, la mayor cantidad se presentó en sequía cálida (abril, 2017); asimismo, los fragmentadores también incrementaron en este mes, aunque ligeramente. De manera general, en la temporada de sequía fría (noviembre, 2016) se encontraron las menores abundancias de los diferentes grupos funcionales (Fig. 9).

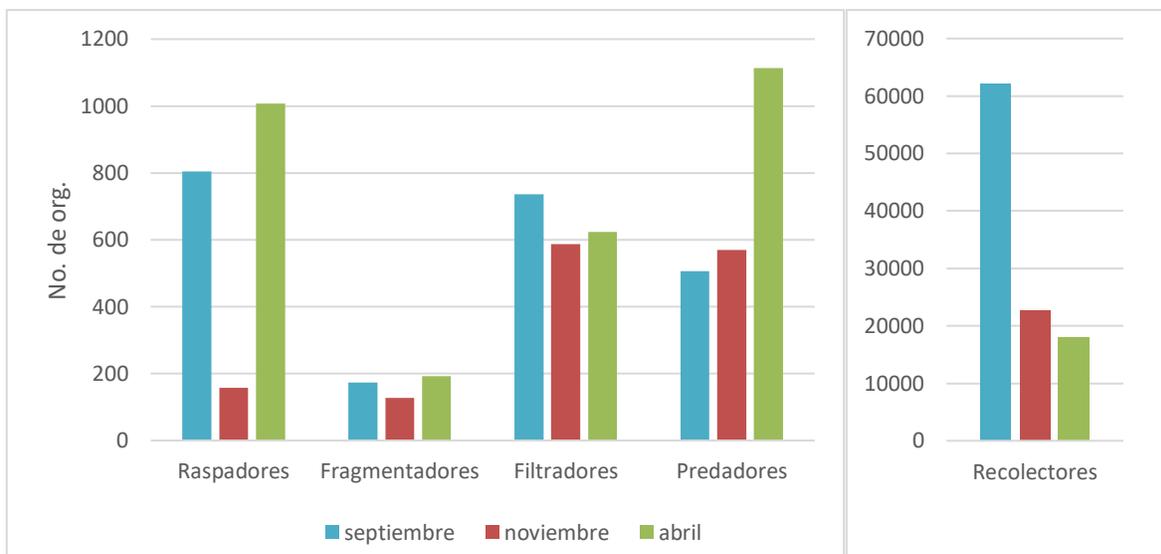


Figura 9. Comparación de abundancia de organismos por grupo funcional.

7.6. Características físicas y químicas de los hábitats, septiembre 2016

En la temporada de lluvias, de acuerdo con el análisis de similitud (Fig. 10) se formó un primer grupo con las localidades de Salida de Requena, Río Taxhimay, Tepeji del Río y Tianguistengo. En estos sitios la temperatura se encontró entre los 15.4 °C y 17.6 °C; el oxígeno disuelto estuvo por arriba de los 4.8 mg/L; presentaron un pH de 7.2 a 7.7; la conductividad estuvo entre los 0.073 y 0.128 mS/cm; la alcalinidad varió entre 39 a 214 mg/L de Ca CO₃; la turbidez se encontró por debajo de las 11.1 NTU; los valores de nitrógeno total se encontraron por debajo de los 3 mg/L. En lo que respecta al fósforo total se obtuvieron valores inferiores a los 2 mg/L y el carbono orgánico total fue inferior a 5.5 mg/L. En cuanto a los sólidos totales disueltos solo se midieron en Río Taxhimay y Tianguistengo, con valores de 0.103 y 0.096 g/L respectivamente (Tabla 4).

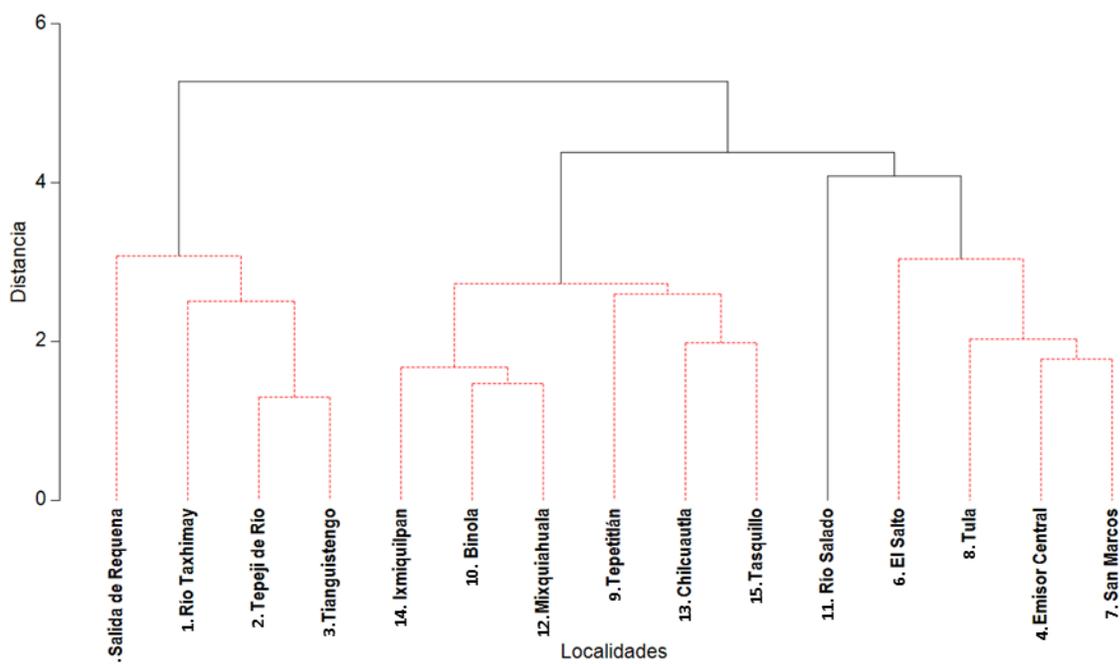


Figura 10. Similitud de las localidades de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos, septiembre 2016

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de las localidades, septiembre 2016.

	Temperatura del agua (°C)	O ₂ Disuelto (mg/L)	Conductividad (mS/cm)	pH	STD(g/L)	N-total (mg/L)	P-total (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	COT (mg/L)	Profundidad promedio (m)	Transparencia Secchi (cm)
Río Taxhimay	15.36	6.6	0.128	7.19	0.103	0.3	0.62	39	5.75	1.2	0.6	>80
Tepeji de Río	16.69	8.56	0.095	7.9	*	1.2	1.2	127	10.5	1.7	0.3	45
Tianguistengo	17.12	7.54	0.117	7.71	0.096	2.6	1.55	214	11.1	5.4	0.6	40
Emisor Central	17.23	2.63	0.206	7.89	0.159	8.5	6.34	232	85.3	13.9	0.4	5
Salida de Requena	17.57	4.86	0.073	7.66	*	0.3	0.69	79	5.57	2.6	0.2	>60
El Salto	18.76	2.68	0.177	7.99	0.131	5.9	5.1	126	79	4.3	0.6	25
San Marcos	17.1	2.59	0.254	8.02	0.202	15.5	8.1	125	96.6	17.3	0.3	5
Tula	17.09	2.57	0.249	8.63	0.210	13.1	7.84	238	67	15	0.7	5
Tepetitlán	19.75	3.63	0.379	7.71	0.274	2.4	1.19	285	4.9	2.6	0.4	>60
Binola	18.31	2.74	0.361	8.13	0.269	8.5	5.3	370	24.7	6	0.4	45
Río Salado	19.34	3.17	0.295	8.19	0.361	19.6	12.44	415	79	17.1	0.4	10
Mixquiahuala	18.92	3.27	0.472	8.33	0.347	10.8	6.24	435	18.5	6	0.8	28.1
Chilcuautla	19.2	3.26	0.477	7.57	0.349	13.4	5.78	415	19.7	4.8	0.4	33
Ixmiquilpan	18.19	3.1	0.464	8.7	0.347	7.7	4.4	351	20.9	2.8	0.4	40
Tasquillo	18.14	3.34	0.502	7.3	0.375	5.9	2.99	355	25.3	2.8	0.4	38

*Datos faltantes, no fue posible determinarlos en campo. Números en verde: se encuentran fuera del LMP de P-total promedio diario, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996. Números en morado: por arriba del LMP de P-total promedio mensual, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996. Números en rojo: sobrepasan el LMP de N-total promedio mensual, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996.

El segundo grupo se formó con las localidades de Ixmiquilpan, Binola, Mixquiahuala, Tepetitlán, Chilcuautla y Tasquillo (Fig. 10), en estos sitios la temperatura se encontró entre los 18.3 y 19.7 °C; el oxígeno disuelto varió de 2.74 a 3.63 mg/L; presentaron un pH de entre 7.3 a 8.7; la conductividad estuvo entre los 0.361 y 0.502 mS/cm; la alcalinidad en un rango de 285 a 435 mg/L de CaCO₃; en lo que respecta a la turbidez, en Tepetitlán se encontró un valor de 4.9 NTU, el resto de los sitios tuvieron valores por arriba de las 18 NTU. El nitrógeno total varió de 2.4 a 13.4 mg/L. En cuanto al fósforo total, se obtuvieron valores de 1.19 a 6.24 mg/L, el carbono orgánico total estuvo entre 2.6 y 6 mg/L y los STD en un rango de 0.269 a 0.375 g/L (Tabla 4).

El tercer grupo se conformó por las localidades El Salto, Tula, Emisor Central y San Marcos; Río Salado, a pesar de que la prueba SIMPROF no lo incluye en este grupo, se encuentra relacionado con estos sitios, aunque con una menor similitud (Fig. 10). Las características fisicoquímicas en estas localidades fueron las siguientes: temperatura entre 17.1 y 19.3 °C; oxígeno disuelto de 2.63 a 3.17 mg/L; pH de 7.9 a 8.6; conductividad entre los 0.177 y 0.295 mS/cm; la alcalinidad varió de 125 a 415 mg/L de CaCO₃; en lo que respecta a la turbidez se encontró entre las 67 y 96.6 NTU; los valores de nitrógeno variaron de 5.9 a 19.6 mg/L. El fósforo total se encontró en un rango de 4 a 7.84 mg/L, el carbono orgánico total estuvo entre 4.3 y 17.3 mg/L y los STD entre 0.131 a 0.361 g/L (Tabla 4)

7.7. Características físicas y químicas de los hábitats, noviembre 2016

De acuerdo con el análisis de similitud de los parámetros fisicoquímicos, en la temporada de sequía fría (noviembre, 2016) se presentaron tres grupos principales y una localidad que quedó sin agrupar (Fig. 11). El primer grupo se conformó por las localidades Río Taxhimay, Tepeji del Río, Tianguistengo y Salida de Requena; en estos sitios la temperatura se encontró entre los 8.5 °C y 14.5 °C; el oxígeno disuelto fue superior a los 4.2 mg/L; la conductividad estuvo en un rango de 0.194 a 0.378 mS/cm; el pH varió de 7 a 7.8; los valores de nitrógeno total estuvieron en un rango de 0.3 a 3 mg/L; en cuanto al fósforo total, se encontró por debajo de 1.4 mg/L; la turbidez fue inferior a 10 NTU; el COT estuvo en un rango de 0.5 a 2.7 mg/L; los STD variaron de 0.106 a 0.406 g/L y la alcalinidad fue de 33 a 153 mg/L de CaCO₃ (Tabla 5).

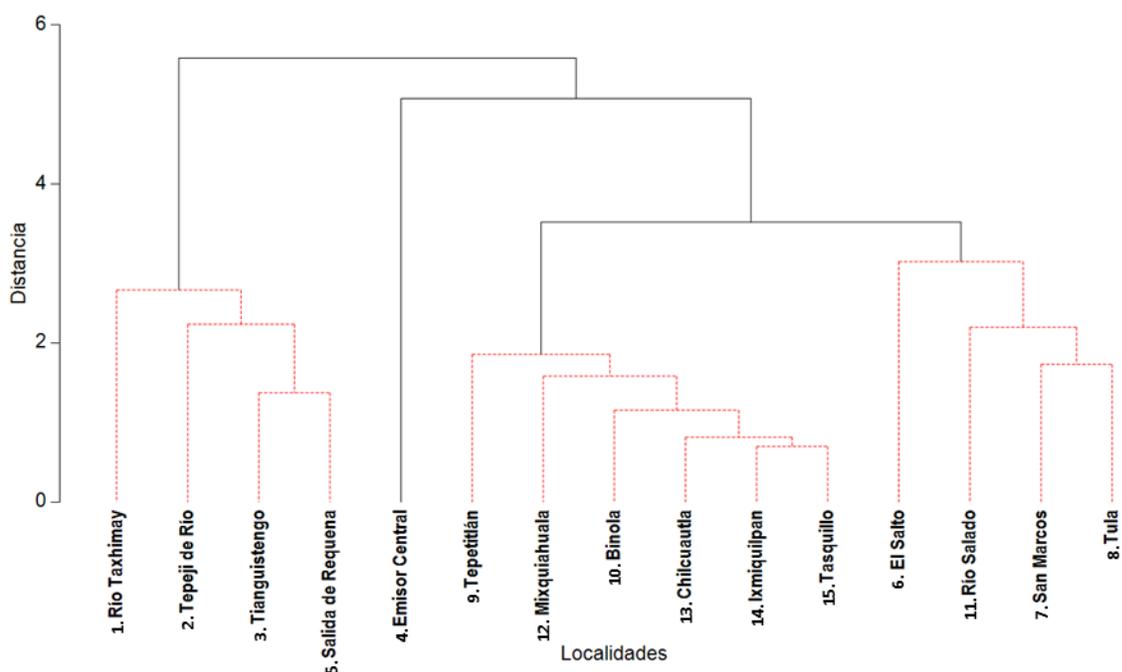


Figura 11. Similitud de las localidades de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos, noviembre 2016.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de las localidades, noviembre 2016.

	Temperatura del agua (°C)	O ₂ Disuelto (mg/L)	Conductividad (mS/cm)	pH	STD (g/L)	N-total (mg/L)	P-total (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	COT (mg/L)	Profundidad promedio(m)	Transparencia Secchi (cm)
Río Taxhimay	8.53	6.14	0.194	7.07	0.106	0.3	0	33	1.9	0.5	0.6	>90
Tepeji de Río	12.96	9.5	0.378	7.79	0.406	3	1.37	153	9.85	2.7	0.4	45
Tianguistengo	14.54	6.82	0.298	7.49	0.242	1.6	1.36	106	7.91	1.5	0.6	62.1
Emisor Central	15.95	2.2	1.208	8.1	0.946	24	10.95	300	85.6	18.2	0.5	7
Salida de Requena	13.9	4.27	0.239	7.8	0.196	0.9	0.45	89	5.1	2	0.4	>90
El Salto	15.59	2.2	0.721	7.6	0.576	18	8.4	171	88.2	15.6	0.6	9
San Marcos	15.53	2.21	1.107	7.9	0.879	14.2	12.3	416	98	18.3	0.4	10
Tula	15.67	2.62	1.158	7.9	0.916	13.6	20	354	80.5	13.1	*	9.1
Tepetitlán	19.96	3.58	0.994	8.2	0.763	7.1	5.3	384	32.1	6.4	0.7	8
Binola	16.12	3.6	1.04	8.2	0.813	7.4	5.88	390	22.4	6.4	0.3	21
Río Salado	16.08	3.53	1.51	8	1.19	14.4	12.57	532	99.9	23	0.8	5
Mixquiahuala	16.51	3.35	1.328	8.15	1.031	9.5	7.68	445	57.2	9.5	0.6	10
Chilcuautla	16.73	3.4	1.177	8.2	1.058	5.3	8.5	358	14.5	3.6	0.6	15
Ixmiquilpan	16.6	3.6	1.324	8.37	1.02	8.7	6.92	341	19.7	4.9	0.9	33
Tasquillo	16.82	3.06	1.42	8.3	1.096	6.1	5.04	333	12.6	4.2	0.8	32

* Datos no determinados en campo. Números en verde indican valores superiores al LMP de P-total, promedio diario, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996. Números en morado muestran valores por encima del LMP de P-total, promedio mensual, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996.

El segundo grupo incluye las localidades de Tepetitlán, Mixquiahuala, Binola, Chilcuahutla, Ixmiquilpan y Tasquillo (Fig. 11); en estos sitios la temperatura se encontró entre los 16.1 °C y 19.9 °C, el rango del oxígeno disuelto fue de 3.06 a 3.6 mg/L, la conductividad de 0.994 a 1.42 mS/cm, el pH en un rango de 8.15 a 8.37, los valores de nitrógeno total estuvieron entre 5.3 a 9.5 mg/L, el fósforo total estuvo entre 5.04 a 7.68 mg/L, la turbidez varió de 12.6 a 57.2 NTU, el COT entre de 3.6 y 9.5 mg/L, los STD fueron de 0.76 a 1.09 g/L y la alcalinidad en un rango de 331 a 445 mg/L de CaCO₃ (Tabla 5).

El tercer grupo se conformó por los sitios El Salto, Río Salado, San Marcos y Tula (Fig. 11); en estas localidades, la temperatura se encontró entre los 15.5 °C y 16.0 °C, el oxígeno disuelto fue de 2.6 a 3.5 mg/L, conductividad entre 0.721 y 1.158 mS/cm, el pH en un rango de 7.6 a 8, los valores de nitrógeno total estuvieron entre los 13.6 a 18 mg/L, el fósforo total varió de 8.4 a 20 mg/L, la turbidez fue de 80.5 a 99.9 NTU, el COT en un rango de 13.1 a 23 mg/L, los STD variaron de 0.576 a 1.19 g/L y alcalinidad de 171 a 532 mg/L de CaCO₃ (Tabla 5).

7.8. Características físicas y químicas de los hábitats, abril 2017

De acuerdo con el análisis de similitud en la temporada de sequía cálida (abril 2017), se presentaron tres grupos principales y una localidad que quedó sin agrupar (Fig. 12). El primer grupo se conformó por las localidades: Tepeji del Río, Río Taxhimay, Tianguistengo y Salida de Requena; en estos sitios la temperatura se encontró entre los 13.3 °C y 16.5 °C, el oxígeno disuelto fue superior a los 4.1 mg/L, la conductividad estuvo en un rango de 0.092 a 0.774 mS/cm, el pH fue de 7.4 a 7.9, los valores de nitrógeno total fueron de 0.42 a 5.2 mg/L, en cuanto al fósforo total estuvo entre 0.79 a 3.5 mg/L, turbidez de 3.9 a 48.3 NTU, el COT entre 2.4 a 8.3 mg/L, los STD variaron de 0.288 a 0.647 g/L y la alcalinidad en un rango de 125 a 530 mg/L de CaCO₃ (Tabla 6).

El segundo grupo incluye las localidades Binola, Tasquillo, Chilcuahutla, Mixquiahuala, e Ixmiquilpan (Fig. 12); en estos sitios la temperatura se encontró entre los 17 °C y 18.2 °C, el oxígeno disuelto fue de 4.7 a 5.5 mg/L, la conductividad estuvo en un rango de 1.160 a 1.571 mS/cm, pH de 8.06 a 8.77, el nitrógeno total entre 3.29 a 5.27 mg/L, el fósforo total de 1.72 a 3.52 mg/L, la turbidez se encontró en un rango de 6.4 a 15.8 NTU, el COT entre 2.3 y 3.7

mg/L, los STD variaron de 1.067 a 1.189 g/L y la alcalinidad de 718 a 941 mg/L de CaCO₃ (Tabla 6).

La localidad de Tepetitlán no fue agrupada (Fig. 12), pero presenta una similitud con una distancia de dos con el grupo anterior, presentando una temperatura de 19 °C, oxígeno disuelto de 4.5 mg/L, conductividad de 1.073 mS/cm, nitrógeno total de 0.93 mg/L, fósforo total de 1.45 mg/L, turbidez de 14.1 NTU, COT de 1.1 mg/L, STD de 0.787 g/L y alcalinidad de 874 mg/L de CaCO₃ (Tabla 6).

El tercer grupo se compone de las localidades el Salto, San Marcos, Emisor Central, Tula, Río Salado (Fig. 12); en estos sitios, la temperatura estuvo entre los 17.09 °C y 18.3 °C, el oxígeno disuelto de 2.8 a 3.2 mg/L, la conductividad varió de 0.838 a 1.218 mS/cm, el pH se encontró en un rango de 8,0 a 11.0, los valores de nitrógeno total estuvieron entre 9.3 y 17.3 mg/L, el fósforo total tuvo valores de 7.8 a 18.9 mg/L, la turbidez fue de 82.1 a 115.2 NTU, el COT entre 12.7 a 18.5 mg/L, los STD variaron de 0.642 a 1.0 g/L y la alcalinidad de 568 a 1038 mg/L de CaCO₃ (Tabla 6).

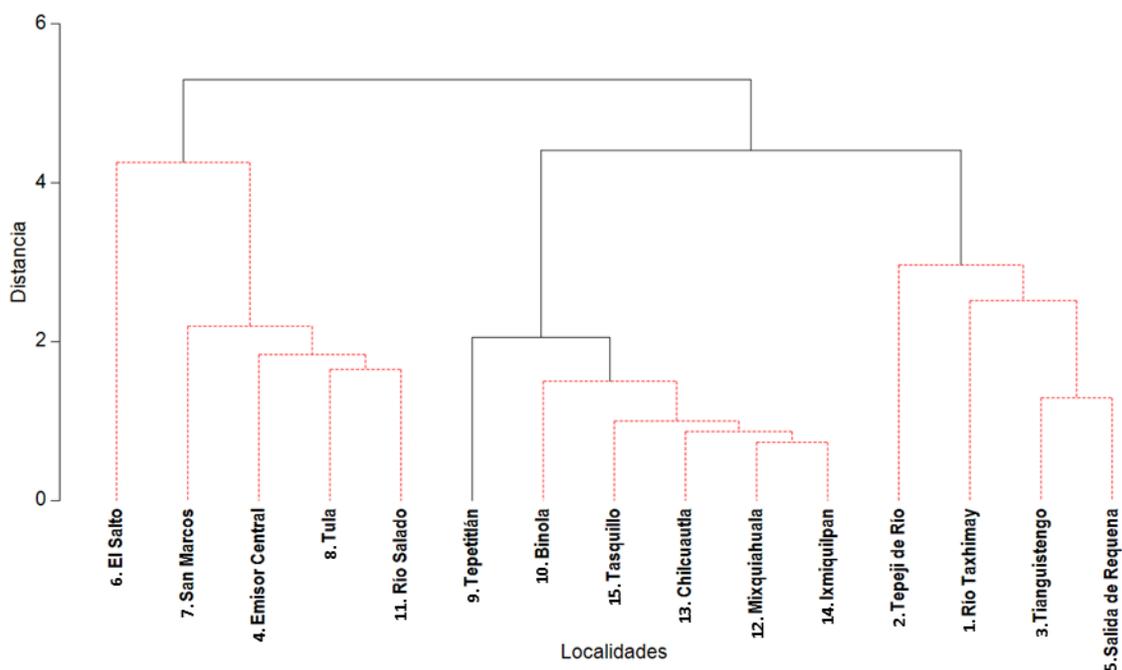


Figura 12. Similitud de las localidades de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos, abril 2017.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de las localidades, abril 2017.

	Temperatura del agua (°C)	O2 Disuelto (mg/L)	Conductividad (mS/cm)	pH	STD (g/L)	N-total (mg/L)	P-total (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	Turbidez (NTU)	COT (mg/L)	Profundidad promedio(m)	Transparencia Secchi(cm)
Río Taxhimay	14.96	6.04	0.092	7.37	*	0.424	0.79	125	4.7	2.4	0.4	81
Tepeji de Río	13.33	5.1	0.774	7.9	0.647	5.204	3.12	358	48.3	8.3	0.2	40
Tianguistengo	16.53	4.71	0.48	7.75	0.372	2.985	3.5	530	3.9	3.1	0.15	35.1
Emisor Central	18.23	2.87	1.188	8.13	*	17.302	12.4	568	91.3	18.5	*	15
Salida de Requena	15.87	4.11	0.366	7.85	0.288	1.026	1.37	310	6.8	3.2	0.3	>90
El Salto	17.5	3.21	1.218	11.07	0.924	9.502	18.92	1038	101.2	12.7	0.4	0.4
San Marcos	17.09	3.03	0.838	8.1	0.642	9.252	7.76	682	115.2	16.1	0.7	*
Tula	18.34	3.08	1.208	8.03	0.9	11.202	8.3	719	87.4	17	0.4	3
Tepetitlán	19.08	4.51	1.073	*	0.787	0.934	1.45	874	14.1	1.1	0.7	90
Binola	17.02	4.71	1.16	8.06	*	3.503	3.28	931	6.4	2.8	*	48.1
Río Salado	17.2	3.4	1.323	8.22	1.009	12.815	14.04	920	82.1	17.1	0.7	4
Mixquiahuala	18.3	5.53	1.413	8.26	1.067	5.272	3.52	941	6.7	2.9	0.8	*
Chilcuautila	18.19	5.37	1.485	8.61	1.112	4.562	3.12	718	9.2	3.7	0.7	21
Ixmiquilpan	17.93	5.43	1.447	8.77	1.088	3.981	2.72	899	6.7	2.9	*	*
Tasquillo	17.6	4.89	1.571	8.63	1.189	3.299	1.72	847	15.8	2.3	*	39.1

*Datos no determinados en campo. Números en verde, indican valores por encima del LMP de P-total promedio diario, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996. Números en morado, muestran valores por encima del LMP de P-total promedio mensual, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996. Números en rojo, muestran valores superiores al LMP de N-total, promedio mensual, para la protección de la vida acuática NOM-001- SEMARNAT 1996.

De manera general, en cuanto a las características físicas y químicas, se formaron tres principales tipos de hábitat que se mantienen en las tres temporadas; por un lado, los sitios de Taxhimay, Salida de Requena, Tepeji del Río y Tianguistengo, que se caracterizan por presentar mayores cantidades de oxígeno, así como valores más bajos de nitrógeno total, carbono orgánico y fósforo total. Por el contrario, las localidades que presentan las mayores cantidades de nutrientes, pero menores de oxígeno, forman otro grupo compuesto de los sitios El Salto, San Marcos, Emisor Central, Tula y Río Salado. El último grupo se integra por los sitios Tepetitlán, Binola, Tasquillo, Chilcuautila, Mixquiahuala e Ixmiquilpan.

7.9. Caracterización de los sitios de muestreo

En lo referente a la caracterización del hábitat, de acuerdo a la propuesta de United States Environmental Protection Agency (USEPA) en Barbour y colaboradores (1999), los valores de calidad del hábitat se encontraron entre 2.4 (pobre en el Río salado) y 14.9 (subóptimo en Taxhimay); mostrando que el tramo muestreado de la cuenca del Río Tula, se encuentra afectado de forma antrópica, ocasionando distintos niveles de degradación del hábitat. Inclusive en los sitios donde no se aprecia una contaminación visible del agua, si se mostraron

alteraciones en la calidad del hábitat, como resultado de las diferentes actividades humanas aledañas. Los sitios con mayor puntuación fueron Río Taxhimay y Salida de Requena, con valores por arriba de 11.9, con una calidad del hábitat subóptima en las tres temporadas muestreadas; seguido de los sitios Tepetitlán, Chilcuatla y Tasquillo, también con una calidad subóptima, pero con valores entre 10.8 y 12.0. Los menores valores se encontraron en Tianguistengo, El Salto, Tula y Río Salado, con una calidad de hábitat pobre en las tres temporadas (Tabla 7).

Tabla7. Valores de calidad de hábitat de las localidades muestreadas.

	Septiembre 2016	Noviembre 2016	Abril 2017
Río Taxhimay	13.9 Subóptimo	14.9 Subóptimo	14.1 Subóptimo
Tepeji del Río	11.4 Subóptimo	9.1 Marginal	6.8 Marginal
Tianguistengo	4.5 Pobre	5.2 Pobre	1.6 Pobre
Emisor Central	5.6 Marginal	5.5 Marginal	4.9 Pobre
Salida de Requena	13.2 Subóptimo	13.1 Subóptimo	11.9 Subóptimo
El Salto	2.9 Pobre	2.8 Pobre	2.5 Pobre
San Marcos	6.3 Marginal	6.1 Marginal	5.2 Marginal
Tula	3.6 Pobre	3.9 Pobre	2.9 Pobre
Tepetitlán	11.1 Subóptimo	10.8 Subóptimo	11.5 Subóptimo
Binola	6.8 Marginal	7.0 Marginal	9.4 Marginal
Río Salado	2.7 Pobre	2.7 Pobre	2.4 Pobre
Mixquiahuala	9.1 Marginal	9.3 Marginal	10.9 Subóptimo
Chilcuatla	11.1 Subóptimo	11.0 Subóptimo	11.0 Subóptimo
Ixmiquilpan	8.5 Marginal	9.1 Marginal	6.5 Marginal
Tasquillo	12.0 Subóptimo	12.0 Subóptimo	11.8 Subóptimo

Datos calculados de acuerdo a United States Environmental Protection Agency (USEPA), Barbour *et al.* 1999.

Los cambios más significativos se presentaron en Tianguistengo, pasando de valores arriba de 4.0 en septiembre y noviembre 2016 a un valor de 1.6 en abril 2017, debido al desvío del agua en el cauce y al dragado que sufrió, lo que alteró completamente el hábitat; sin embargo, en las tres temporadas se clasificó con una calidad de hábitat pobre. De igual forma, en Tepeji del Río la calidad del hábitat disminuyó, pasando de subóptimo en septiembre 2016 a marginal en las siguientes temporadas (Tabla 7).

7.10. Relación de los ensamblajes de macroinvertebrados y los parámetros ambientales

En la temporada de lluvias (septiembre, 2016), el ACP mostró una acumulación de variación del 83.4%, explicando el 57.2% en el primer componente, el 18% en el segundo y el 8.2% en el tercero. En el primer componente, las variables que contribuyeron significativamente a la agrupación de los sitios fueron la diversidad de Shannon y el fósforo total. En el componente dos, las variables que contribuyen en mayor grado a la agrupación de sitios son abundancia, alcalinidad y temperatura. Para el tercero, se destacan las variables pH, riqueza y oxígeno disuelto (Tablas 8 y 9).

Tabla 8. Valores propios y porcentaje de variación total en el ACP, septiembre 2016.

CP	Valor propio	%Variación	Acum.%Variación
1	7.43	57.2	57.2
2	2.35	18	75.2
3	1.07	8.2	83.4
4	0.796	6.1	89.5
5	0.632	4.9	94.4

Tabla 9. Contribución de las variables en los CP, septiembre 2016.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Temperatura	0.176	-0.413	0.21	-0.332	0.531
O ₂	-0.31	0.135	-0.382	-0.168	0.062
pH	0.231	-0.086	-0.554	0.449	0.22
N-Total	0.327	-0.009	-0.16	-0.32	-0.339
P-total	0.338	0.068	-0.19	-0.268	-0.189
Alcalinidad	0.185	-0.473	-0.14	-0.412	-0.01
Turbidez	0.29	0.358	0.068	0.056	-0.052
COT	0.286	0.324	-0.147	-0.222	-0.216
Ca hábitat	-0.257	-0.22	0.329	0.013	-0.565
Gpo funcional	-0.33	-0.021	-0.229	-0.281	-0.115
Riqueza	-0.319	0.036	-0.386	-0.178	0.043
Abundancia	0.042	-0.536	-0.276	0.351	-0.354
Diversidad	-0.346	0.069	-0.1	-0.173	0.076

*Valores en rojo, correlaciones de mayor peso.

Este análisis muestra la agrupación de los sitios Río Taxhimay, Tepeji del Río, Tianguistengo y Salida de Requena, asociados a aguas con mayores cantidades de oxígeno disuelto, valores de diversidad y riqueza más altos y mayor cantidad de grupos funcionales. Un segundo grupo lo conforman las estaciones que se encuentran después de la presa Endhó (Tepetitlán, Binola, Mixquiahuala, Chilcuautla, Ixmiquilpan y Tasquillo), las cuales se caracterizan por presentar valores altos de alcalinidad, lo cual está relacionado con alta cantidad de sólidos totales, tanto orgánicos como inorgánicos; por lo cual, presentan altas abundancias de organismos. Un tercer grupo se conforma de las estaciones con mayor grado de contaminación, que se encuentran en la zona media, posteriores a la entrada de aguas negras provenientes de la zona metropolitana y expuestas a las mayores descargas industriales y residuales de la zona urbana de Tepeji y Tula, por lo que presentan valores altos de COT y turbidez, cantidades elevadas de nutrientes (fósforo total y nitrógeno total) y valores bajos de calidad ambiental y sin presencia significativa de organismos (Fig. 13).

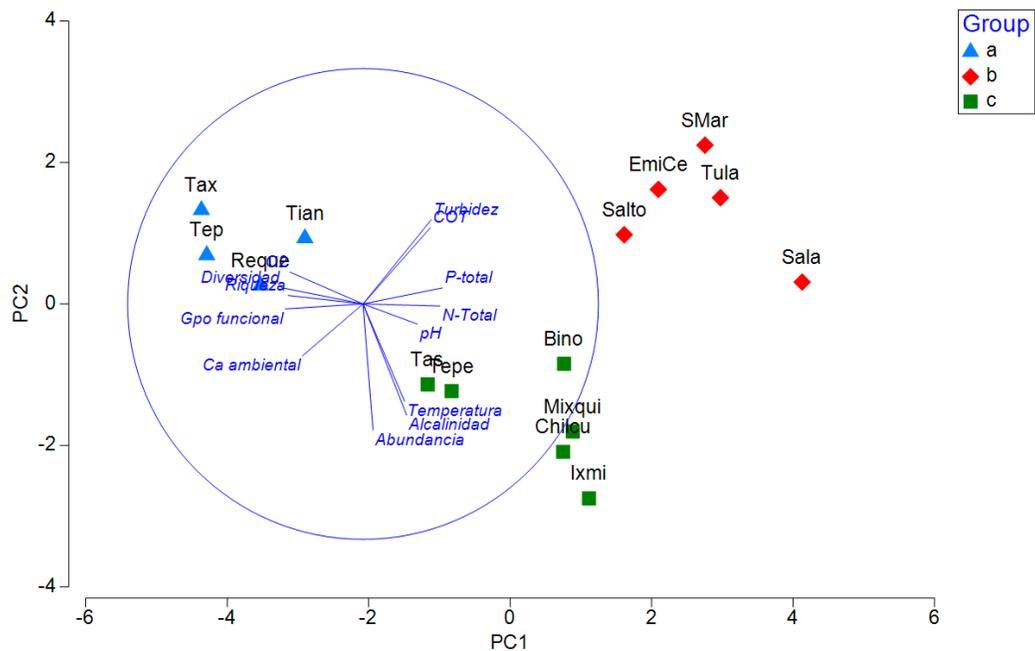


Figura 13. Análisis de componentes principales con los atributos de los ensamblajes de macroinvertebrados y variables ambientales, septiembre 2016. (Tax= Río taxhimay; Tepe=Tepeji del Río; Tian=Tianguistengo; EmiCe=Emisor Central; Reque= Salida de Requena; Salto=El Salto; SMar=San Marcos; Tula=Tula; Tep= Tepetitlán; Bino= Binola; Sala= Río Salado; Mixqui= Mixquiahuala; Chilcu= Chilcuahutla; Ixmi= Ixmiquilpan; Tas=Tasquillo).

En la temporada de sequía fría (noviembre, 2016), el ACP mostró un acumulado de 79.1% en los dos primeros componentes, con 61.4% en el primero y 17.7% en el segundo. En el primer componente, las variables que contribuyen en mayor medida a la variación mostrada, fueron la cantidad de grupos funcionales de macroinvertebrados y la riqueza taxonómica. En el segundo componente, destaca el aporte de las variables pH y abundancia de organismos (Tablas 10 y 11).

Tabla 10. Valores propios y porcentaje de variación total en el ACP, noviembre 2016.

CP	Eigenvalores	% Variación	Acum.% Variación
1	7.98	61.4	61.4
2	2.31	17.7	79.1
3	0.851	6.5	85.7
4	0.668	5.1	90.8
5	0.373	2.9	93.7

Tabla 11. Contribución de las variables en los CP, noviembre 2016.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Temperatura	0.23	-0.392	0.265	-0.346	0.387
O2	-0.253	0.216	-0.173	-0.649	-0.344
pH	0.178	-0.529	0.071	-0.183	-0.128
N-Total	0.313	0.155	-0.221	0.101	0.268
P-total	0.311	0.066	-0.024	0.169	-0.305
Alcalinidad	0.277	-0.267	0.212	-0.055	-0.654
Turbidez	0.313	0.268	-0.063	0.13	-0.108
COT	0.314	0.231	-0.102	0.084	-0.194
Ca hábitat	-0.253	-0.289	0.094	0.476	-0.163
Gpo funcional	-0.342	-0.063	-0.058	-0.151	-0.046
Riqueza	-0.338	0.087	-0.107	0.082	-0.211
Abundancia	-0.094	-0.442	-0.699	0.191	-0.012
Diversidad	-0.28	0.068	0.523	0.26	-0.014

*Valores en rojo, correlaciones de mayor peso.

En cuanto a la distribución de los sitios, presentaron la misma ordenación que en septiembre de 2016, formándose tres grupos. El primero conformado por aquellos sitios en donde el impacto antrópico es menor; el segundo con las localidades que se encuentran en el tramo del río con mayor contaminación, altamente degradados y el tercero en los sitios que se

encuentran posteriores a las descargas de la presa Endhó, donde se presenta una disminución gradual de la contaminación a medida que el río avanza a lo largo de su cauce (Fig. 14).

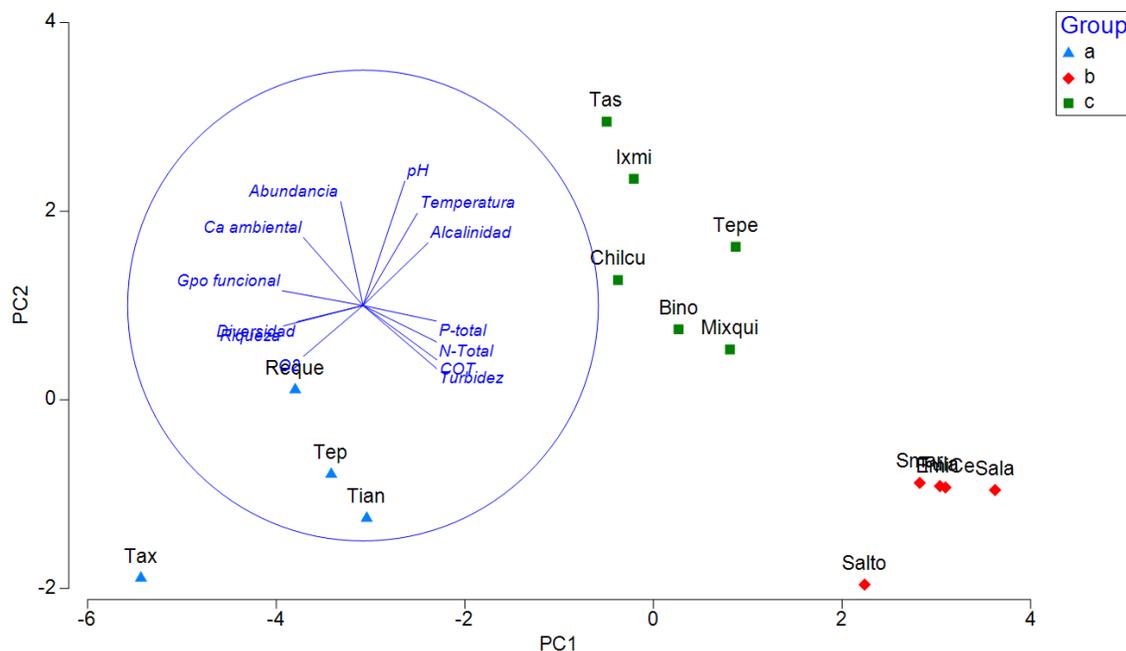


Figura 14. Análisis de componentes principales con los atributos de los ensamblajes de macroinvertebrados y variables ambientales, noviembre 2016. (Tax= Río taxhimay; Tepe=Tepeji del Río; Tian=Tianguistengo; EmiCe=Emisor Central; Reque= Salida de Requena; Salto=El Salto; SMar=San Marcos; Tula=Tula; Tep= Tepetitlán; Bino= Binola;Sala= Río Salado; Mixqui= Mixquiahuala; Chilcu= Chilcuahutla; Ixmi= Ixmiquilpan; Tas=Tasquillo).

Para la temporada de sequía cálida (abril 2017), el porcentaje de acumulación alcanzado con el ACP fue de 84% en los tres primeros componentes, con un porcentaje de variación del 58.7% en el primer componente, 14.4% en el segundo y 11% en el tercero. En el primer componente, las variables que contribuyeron en mayor medida a la ordenación de las localidades, fueron las cantidades de COT y la variación en la cantidad de grupos funcionales. En el segundo, las variables que tuvieron mayor aporte fueron la variación de temperatura y alcalinidad. Mientras que en el tercer componente, destacan las variables de pH, abundancia y oxígeno disuelto (Tablas 12 y 13).

En esta temporada se formaron cinco grupos, por un lado, las estaciones Río Taxhimay y Salida de Requena, se agrupan por sus mayores valores de oxígeno disuelto, el cual muestra una relación con la riqueza y la diversidad; además son los sitios que presentan valores más bajos de nutrientes (nitrógeno y fósforo). A diferencia de lo encontrado en los muestreos de septiembre y noviembre, las estaciones de Tepeji del Río y Tianguistengo, formaron un grupo

aparte. Los sitios Binola, Chilcuautla, Mixquiuuala, Ixmiquilpan y Tasquillo, mostraron una agrupación similar a los muestreos anteriores, relacionados con altos valores de alcalinidad y temperaturas más elevadas; asimismo, los sitios ubicados en la parte media del río se agruparon nuevamente, siendo la zona con mayor contaminación, con los valores más altos de nitrógeno y fósforo totales. El sitio de Tepetitlán ubicado a la salida de la presa Endhó, en este muestreo, se separó como un grupo aparte, aunque muy cercano a las estaciones incluidas en el grupo d (Fig.15).

Tabla 12. Valores propios y porcentaje de variación total en el ACP, abril 2017.

CP	Eigenvalores	% Variación	Acum.% Variación
1	7.63	58.7	58.7
2	1.87	14.4	73
3	1.43	11	84
4	0.8	6.2	90.2
5	0.504	3.9	94.1

Tabla 13. Contribución de las variables en los CP, abril 2017.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Temperatura	0.065	-0.654	0.188	-0.052	0.178
O2	-0.304	0.035	-0.349	-0.163	0.063
pH	0.148	0.109	-0.616	0.424	-0.375
N-Total	0.328	-0.072	0.039	0.259	0.306
P-total	0.319	-0.092	0.039	0.275	-0.349
Alcalinidad	0.103	-0.644	-0.085	-0.092	-0.371
Turbidez	0.326	0.054	0.176	0.281	0.081
COT	0.335	0.083	0.149	0.263	0.22
Ca hábitat	-0.318	-0.048	0.05	0.391	0.327
Gpo Funcional	-0.331	-0.14	0.119	0.216	-0.209
Riqueza	-0.311	0.041	0.252	0.356	-0.104
Abundancia	-0.222	-0.312	-0.422	0.316	0.378
Diversidad	-0.294	0.024	0.375	0.254	-0.334

*Valores en rojo, correlaciones de mayor peso.

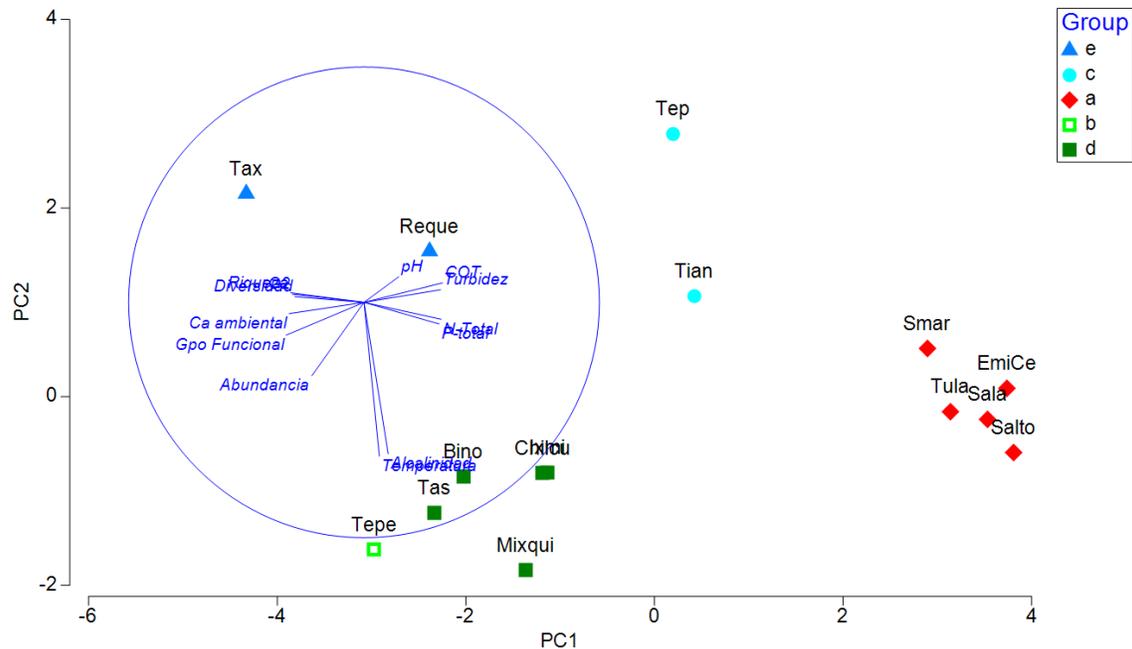


Figura 15. Análisis de componentes principales con los atributos de los ensamblajes de macroinvertebrados y variables ambientales, septiembre 2016. (Tax= Río taxhimay; Tepe=Tepeji del Río; Tian=Tianguistengo; EmiCe=Emisor Central; Reque= Salida de Requena; Salto=El Salto; SMar=San Marcos; Tula=Tula; Tep= Tepetitlán; Bino= Binola; Sala= Río Salado; Mixqui= Mixquiahuala; Chilcu= Chilcuahutla; Ixmi= Ixmiquilpan; Tas=Tasquillo).

Para conocer el valor de las relaciones entre los atributos de los ensamblajes de macroinvertebrados y las variables ambientales, se realizó un análisis de correlaciones, entre los componentes estructurales de riqueza taxonómica, abundancia y diversidad de las tres temporadas, contra las variables fisicoquímicas y características del hábitat, las cuales presentaron correlaciones con $p < 0.05$.

En la temporada de lluvias (septiembre 2016), las correlaciones más altas se presentaron entre la riqueza y el oxígeno disuelto, con un valor de $r=0.9047$ y una $p= 0.000$; asimismo, la diversidad se relacionó con el oxígeno disuelto con una $r= 0.9239$ y una $p= 0.000$, en esta temporada se presentó una correlación alta de tipo negativa, entre riqueza y turbidez con valor de $r= -0.7121$ y una $p= 0.006$ (Tabla 14).

En la temporada de sequía (noviembre, 2016), se presentaron correlaciones altas entre la riqueza y la caracterización del sustrato con un valor de $r= 0.8406$ y $p= 0.000$, lo cual refleja que la riqueza aumenta a medida que aumenta el número de sustratos disponibles para ser utilizados como hábitats. Otra de las correlaciones más altas, aunque de manera negativa, se

presentó entre la riqueza con el nitrógeno y fósforo totales con $r = -0.7880$ y $r = -0.7985$ respectivamente, ambos con $p = 0.000$ (Tabla 14).

En el muestreo de sequía cálida (abril 2017), se observó que las correlaciones mayores, se presentaron con los parámetros de riqueza y abundancia y la característica ambiental de variabilidad del río, con valores de $r = 0.8398$, $p = 0.001$ y $r = 0.8889$, $p = 0.000$, respectivamente. Esta característica se refiere a la presencia de diferentes tipos de flujo en el río, creando zonas con diferente velocidad de corriente, que va desde lento hasta rápidos; asimismo, la profundidad es variable dando lugar a pozas de diferente tamaño, lo cual contribuye a un mayor número de microhábitats diferentes (Tabla 14).

Además, en esta misma temporada se encontraron correlaciones entre la riqueza, abundancias y diversidad con las características que se refieren a la cobertura vegetal, como la estabilidad de la zona ribereña, protección vegetal y ancho de la zona ribereña.

Tabla 14. Análisis de correlación entre atributos de los ensambles y variables ambientales.

	Temperatura del agua (°C)	O2 Disuelto (mg/L)	Conductividad (mS/cm)	pH	STD (g/L)	N-Total (mg/L)	P-total (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO3)	Turbidez (NTU)	COT (mg/L)	Cobertura del sustrato	Caracterización del sustrato	Variabilidad del río	Deposición de sedimentos	Estado del flujo	Estabilidad de la zona ribereña	Protección vegetal	Ancho de la zona ribereña	
septiembre-2016	Riqueza (S)	.9047	-.2002	-.5093	-.2894	-.6077	-.6553	-.1081	-.7121	-.5607	.5806	.6229	.3706	.2783	.3172	.1684	.1344	.2469	
		p=.227	p=.512	p=.075	p=.338	p=.028	p=.015	p=.725	p=.006	p=.046	p=.037	p=.023	p=.213	p=.357	p=.291	p=.582	p=.662	p=.416	
	Abundancia (N)	-.1673	.7029	.3572	.6415	.0965	-.0137	.5696	-.3869	-.3702	.3529	.4678	.1325	-.0325	.4089	.2464	.3897	.0631	
		p=.320	p=.585	p=.007	p=.231	p=.018	p=.754	p=.964	p=.042	p=.191	p=.213	p=.237	p=.107	p=.666	p=.916	p=.165	p=.417	p=.188	p=.838
	Índice de Shannon-W (H'(log2))	.9139	-.2718	-.6225	-.3534	-.7279	-.7569	-.2983	-.6773	-.5501	.6357	.5211	.6163	.5328	.3658	.2870	.2066	.3345	
		p=.190	p=.369	p=.023	p=.236	p=.005	p=.003	p=.322	p=.011	p=.051	p=.020	p=.068	p=.025	p=.061	p=.219	p=.342	p=.498	p=.264	
noviembre-2016	Riqueza (S)	.6943	-.7954	.0791	-.7915	-.7880	-.7985	-.7825	-.7619	-.7539	.7677	.8406	.5343	.5915	.4333	.4437	.5738	.4682	
		p=.001	p=.000	p=.779	p=.000	p=.000	p=.000	p=.001	p=.001	p=.001	p=.001	p=.000	p=.040	p=.020	p=.107	p=.098	p=.025	p=.078	
	Abundancia (N)	-.0191	.2053	.2449	.1744	-.2711	-.2691	-.0517	-.4452	-.3927	.3759	.3202	.4270	.0868	.5629	.3703	.4876	.2425	
		p=.934	p=.463	p=.379	p=.534	p=.328	p=.332	p=.855	p=.096	p=.148	p=.167	p=.245	p=.112	p=.758	p=.029	p=.174	p=.065	p=.384	
	Índice de Shannon-W (H'(log2))	.3850	-.6403	.1199	-.6408	-.7361	-.6780	-.5631	-.6502	-.6776	.7726	.7748	.3617	.5887	.3224	.4190	.4590	.4777	
		p=.156	p=.010	p=.670	p=.010	p=.002	p=.005	p=.029	p=.009	p=.006	p=.001	p=.001	p=.185	p=.021	p=.241	p=.120	p=.085	p=.072	
abril-2017	Riqueza (S)	.4451	.1169	-.0925	.1095	-.6987	-.6031	-.1188	-.6393	-.6853	.7442	.6698	.8398	.7090	.6832	.8146	.7267	.7163	
		p=.821	p=.732	p=.787	p=.748	p=.017	p=.050	p=.728	p=.034	p=.020	p=.009	p=.024	p=.001	p=.015	p=.020	p=.002	p=.011	p=.013	
	Abundancia (N)	.6540	.5414	-.0288	.5422	-.4154	-.4715	.2936	-.5672	-.6119	.8128	.5617	.8889	.4975	.7687	.6608	.6238	.5948	
		p=.295	p=.085	p=.933	p=.085	p=.204	p=.143	p=.381	p=.069	p=.045	p=.002	p=.072	p=.000	p=.119	p=.006	p=.027	p=.040	p=.054	
	Índice de Shannon-W (H'(log2))	.2246	-.2396	-.1590	-.2531	-.6594	-.5031	-.3603	-.5348	-.5439	.6302	.7265	.5606	.8194	.4031	.7223	.5664	.6236	
		p=.827	p=.478	p=.640	p=.453	p=.027	p=.115	p=.276	p=.090	p=.084	p=.038	p=.011	p=.073	p=.002	p=.219	p=.012	p=.069	p=.040	

*Valores en rojo, correlaciones de mayor peso.

8. DISCUSIÓN

Varias de las familias de insectos encontradas en este trabajo fueron reportadas por Eustaquio (2018), en muestreos realizados en la cuenca del Río Tula en los años 2014 y 2015, quien reportó siete órdenes de insectos distribuidos en 32 familias; Coleoptera (Dryopidae, Dytiscidae, Elmidae, Hydrophilidae y Staphylinidae); Diptera (Ceratopogonidae, Chironomidae, Empididae, Psychodidae, Simulidae y Tipulidae); Ephemeroptera (Baetidae, Caenidae, Hetageniidae, Leptohiphidae y leptophlebiidae); Hemiptera (Belostomatidae, Corixidae, Naucoridae y Veliidae); Megaloptera (Corydalidae); Odonata (Aeshnidae y Calopterygidae) y trichoptera (Calamoceratidae, Glossosomatidae, Helicopsychidae, Hydrobiosidae, Hydropsychidae, Hydroptilidae, Philopotamidae y Polycentropodidae). La mayoría de estas familias también fueron encontradas en este estudio a lo largo de la cuenca alta, media y baja, a excepción de Corydalidae y Philopotamidae. Al igual que lo reportado por Eustaquio (2018), la familia más frecuente fue Chironomidae, de acuerdo con Merritt y Cummins (1996) la mayoría de los géneros de esta familia están catalogados como tolerantes a efectos de la contaminación.

Lo anterior muestra que la composición de insectos en este río fue similar a lo encontrado en los años 2014 y 2015; en este estudio, además se encontraron otros órdenes y familias de insectos no reportadas anteriormente: Trichoptera (Leptoceridae); Diptera (Ephydriidae, Syrphidae, Culicidae, Stratiomyidae); Hemiptera (Hebridae, Cicadellidae, Aphididae). Coleoptera (Curculionidae); Odonata (Libellulidae, Coenagrionidae); Hymenoptera y Lepidoptera (Cambridae); Asimismo, se identificaron 14 órdenes y 14 familias de otros grupos de macroinvertebrados pertenecientes a: Collembola (Poduridae); Trombidiformes (Hydrachnidae); Aracnida, Lumbriculida (Lumbricidae, Lumbriculidae); Rhynchobdellida (Glossiphoniidae); Arhynchobdellida (Erpobdellidae); Seriata (Planariidae); Haplotaxida (Tubificidae); Nematoda; Mollusca (Planorbidae, Physidae, Bivalvia); Amphipoda (Hyalellidae); Isopoda (Asellidae); Decapoda (Palaemonidae) y Pseudoscorpion.

En la cuenca de México, Caro y colaboradores (2016) en un estudio para evaluar la calidad ecológica de los ríos periurbanos de la Ciudad de México, encontraron sitios con buena calidad relacionados con los taxones de macroinvertebrados: Nemouridae, Podonominae, Tanypodinae, Acarina, Baetis, Tipula, Antocha, Atopsyche, Glossosoma, Polycentropus,

Hesperophylax y Limnephilus. En este estudio, en la parte alta de la cuenca en la Presa Taxhimay y el sitio de Tepeji del Río en la temporada de lluvias (septiembre 2016), también se encontraron organismos de los taxones Podonominae, Tanypodinae, Acarina, Baetis, Tipulidae, Glossosoma y Polycentropus; sin embargo, también hubo presencia de organismos de los taxones Lumbriculidae y *Simulium*. Estos autores reportaron que sitios modificados antropicamente y con flujos de descarga más bajos se relacionaron con organismos de la clase Oligochaeta y el género *Simulium*. Lo cual coincide con las condiciones que presentaron estos sitios, ya que la estación de Río Taxhimay a pesar de no mostrar visualmente alteraciones antrópicas, al encontrarse cercana a la entrada de la presa Taxhimay, tiene un impacto principalmente en la variación del flujo de agua. En cuanto a Tepeji del Río, a pesar de tener condiciones de hábitats para el establecimiento de macroinvertebrados, al encontrarse cercano al poblado de Tepeji, se encuentra expuesto a las descargas tanto residuales como industriales, por lo que la calidad del agua y caracterización del hábitat varió significativamente entre las tres temporadas de estudio.

En este trabajo, a lo largo del tramo estudiado se registraron organismos pertenecientes a las familias Physidae, Tubicifidae, Glossiphoniidae, Erpobdellidae, Asellidae, Baetidae, Siphonuridae, Coenagrionidae, Lestidae, Belostomatidae, Corixidae, Veliidae, Hydropshychidae, Elmidae, Dytiscidae, Culicidae, Chironomidae y Simuliidae, las cuales fueron reportados en un estudio llevado en la cuenca del Río Lerma por López y colaboradores (2007), en donde concluyeron que la mayoría de estos organismos son considerados facultativos o tolerantes a la contaminación, indicadores de deterioro del medio acuático, que se encuentran adaptados a condiciones de anoxia y a elevadas concentraciones de nutrientes y materia orgánica. De acuerdo con lo anterior, el Río Tula presenta ensamblajes de macroinvertebrados que están reflejando algún tipo de impacto antrópico.

En las tres temporadas, las localidades de Taxhimay y Salida de Requena estuvieron entre las más diversas; sin embargo, se encuentran expuestas a cambios en el flujo del cauce, debido a su proximidad a la entrada de la presa Taxhimay y la salida de la presa Requena respectivamente. Hurtado y colaboradores (2005), en un estudio realizado en el Río San Juan y parte del Tula, en sitios localizados antes y después de la presa Zimapán; encontraron que los cambios en las fluctuaciones hídricas debido a la represa, afectan la estabilidad y

diversidad biológica de los macroinvertebrados, ya que al afectarse el balance hidráulico se afectan los ciclos de vida de las especies, como respuesta a la velocidad con la que los niveles de agua suben o bajan, ocasionando que los hábitats en los ríos puedan expandirse o contraerse, modificando la disponibilidad de los recursos.

Al tratarse de un sistema que puede llegar a transportar altas cantidades de materia orgánica y contaminantes, el paso del cauce del Río Tula por la presa Requena, genera una influencia positiva, debido a la retención del agua que permite la sedimentación y el desarrollo de diferentes procesos limnológicos que contribuyen a una mejora en la calidad del agua; este mismo efecto se produce en la presa Endhó, aunque es menos notorio por tratarse de un sistema con mayor grado de contaminación y mayor volumen de almacenamiento. López y colaboradores (2007) encontraron el mismo efecto en la cuenca del Río Lerma.

A pesar de que Tianguistengo y Tepeji del Río presentaron los mayores valores de diversidad en la temporada de lluvias (septiembre, 2016), en los posteriores muestreos las condiciones ambientales cambiaron drásticamente, debido a que se encuentran ubicadas en el tramo del poblado de Tepeji, donde están expuestas a las descargas residuales e industriales principalmente de empresas textiles; además, en la estación Tianguistengo en la temporada de sequía cálida (abril, 2017), la zona sufrió desvío del agua y un dragado para la extracción de materiales, dejando a este tramo del río completamente alterado.

El incremento en la diversidad de macroinvertebrados en Tepetitlán, Binola y Tasquillo en la temporada de sequía cálida, responde a condiciones más estables en el cauce del río, además del desarrollo de perifiton y macrófitas acuáticas que crecen en esta temporada, lo cual contribuyó a un incremento de fuentes de hábitat y alimento. Las estaciones Tepetitlán y Binola, por su ubicación cercana a la presa Endhó, se encuentran influenciadas por las descargas de agua contaminada por parte de este embalse; sin embargo, al ser época de secas, la presa retiene sus aguas y las descargas no son tan frecuentes, dando lugar a una recuperación por parte del sistema, aunado a que en estos sitios existe el aporte de agua proveniente de manantiales, lo que contribuye significativamente a una mejora en la calidad del ecosistema.

Las estaciones Mixquiahuala, Chilcuautla e Ixmiquilpan presentaron bajas diversidades y se caracterizan por presentar abundancias elevadas, principalmente de anfípodos de la familia Hyalellidae. Esto se debe a las altas cantidades de materia orgánica suspendida y disuelta que contienen, de acuerdo con Correa-Araneda y colaboradores (2010) y Tapia y colaboradores (2018), la familia Hyalellidae se ha encontrado en ambientes alterados por materia orgánica; asimismo, estos sitios se caracterizaron por presentar organismos de las familias Quironomidae y Oligochaeta, reportados por Tapia y colaboradores (2018) junto con el género *Hyalella* como organismos tolerantes a condiciones anóxicas y altas concentraciones de materia orgánica. Al respecto Alonso y Camargo (2006), mencionan que estas condiciones son indicios de ecosistemas eutróficos, en los que existe solamente una o dos especies dominantes, lo que indica disturbios por el aumento de la contaminación orgánica.

Los sitios Emisor central, El Salto, San Marcos, Tula y Río Salado, al encontrarse en la cuenca media, la zona más contaminada expuesta constantemente al transporte de aguas provenientes del valle de México y descargas residuales e industriales por parte de las poblaciones aledañas, esto ocasionó que sin importar la temporada estacional, siempre presentaran cargas altas de sustancias contaminantes, lo que ha llevado al deterioro del hábitat, impidiendo el desarrollo de organismos y si los hay suelen ser únicamente del orden Oligochaeta o nematodos y en abundancias bajas. Asimismo, estos sitios presentaron los valores más bajos de oxígeno disuelto y valores elevados de nitrógeno y fósforo total, los cuales se encontraron en la mayoría de estos sitios y en las diferentes temporadas, por arriba de los valores máximos permitidos para la protección de la vida acuática (SEMARNAT, 1997).

Respecto a los grupos funcionales, coinciden con lo que indicaron las características estructurales de los ensamblajes (diversidad, riqueza y abundancia), siendo en Río Taxhimay donde se encontró mayor estabilidad, con taxones representantes de los cinco grupos funcionales en las tres temporadas. Tepeji del Río y Tianguistengo aunque en lluvias y secas frías (septiembre y noviembre, 2016) presentaron organismos de los 5 grupos, esto no se mantuvo en la temporada de secas cálidas (abril, 2017), debido a un incremento en la contaminación en Tepeji del Río por descargas de la zona, aparentemente provenientes de las empresas textiles, ya que en las muestras de agua tomadas en el sitio, se observó la

presencia de residuos de tintes y en el caso de Tianguistengo el desvío del agua y dragado de los sedimentos altero el hábitat en su totalidad.

La mayoría de las estaciones que se ubican posteriores a la presa Endhó (Tepetitlán, Binola, Mixquiahuala, Chilcuautila, Ixmiquilpan y Tasquillo) incrementaron la cantidad de grupos funcionales en el mes de abril, lo cual puede deberse a que en esta temporada, por ser época de secas, hay una mayor estabilidad del caudal, aunado al desarrollo de macrófitas acuáticas, biofilm y perifiton, que constituyen nuevos hábitats y fuentes de alimento; asimismo, a una disminución en las descargas de la presa Endhó, lo que dio oportunidad a una mejora del sistema y a un aprovechamiento por parte de algunos grupos de macroinvertebrados para establecerse. Además, a medida que avanza el cauce, se puede observar una mejora gradual del sistema; al respecto, Piñón y colaboradores (2014) en un estudio de integridad biótica, basándose en la comunidad de macroinvertebrados de la microcuenca del Río Chiquito en Morelia, observaron el mismo efecto, encontrando que los sitios mejor conservados son los de la cabecera, la zona intermedia es la más afectada y en la parte baja se observó la capacidad resiliente del río.

Al tratarse de un sistema con alta carga de materia orgánica, en las tres temporadas predominó el grupo de los recolectores respecto a los otros grupos funcionales. Sin embargo, en el mes de septiembre 2016, se incrementaron considerablemente las abundancias de organismos pertenecientes a este grupo, ya que al ser época de lluvias se genera un mayor transporte de sólidos en el agua, al respecto Astudillo y colaboradores (2014) en un estudio en la cuenca alta del Río La Antigua, Veracruz, encontraron una mayor cantidad de organismos recolectores en la época de lluvia, debido al incremento en las partículas que se produce por la fragmentación física cuando hay un incremento en el caudal de los ríos.

En septiembre 2016 también se encontró la mayor cantidad de filtradores, representados en su mayoría por organismos del género *Simulium*. Se ha reportado que este género suele incrementar sus abundancias como respuesta a las perturbaciones causadas en el sustrato durante la época lluviosa, mientras que otros grupos de macroinvertebrados disminuyen en abundancias (Astudillo *et al.*, 2014; Piñón *et al.*, 2014).

En lo referente a los raspadores, la mayor cantidad se presentó en abril 2017, temporada climática de sequía cálida, lo cual concuerda con la mayor cantidad de recurso alimenticio observado en esta temporada; debido a que al disminuir el nivel del cauce, se genera una mayor incidencia de luz solar sobre las rocas del sustrato, permitiendo el mayor desarrollo de microalgas bentónicas, con lo cual, el grupo de los raspadores que generalmente son organismos herbívoros se vio beneficiado. Asimismo, en esta temporada también se presentó un incremento de taxones depredadores y fragmentadores, aunque estos últimos en menor proporción. Esto pudo ser consecuencia del incremento del recurso alimento, por la mayor disponibilidad de algas bentónicas y macrófitas acuáticas, lo que también beneficia a organismos de otros niveles tróficos, como los depredadores y fragmentadores.

Al igual que con la riqueza, diversidad y abundancia, en noviembre 2016 se encontraron las menores abundancias de los diferentes grupos funcionales. Esto puede deberse a los ciclos de vida propios de los macroinvertebrados y a que a pesar de que noviembre no es época de lluvias en la región, en esa temporada si se presentaron lluvias en la Ciudad de México, este río al ser receptor de esas aguas, generó un incremento del caudal, así como de contaminantes y materia orgánica, por lo que estos aportes pudieron impactar negativamente a la comunidad de macroinvertebrados.

En cuanto a la caracterización del hábitat, de acuerdo con la propuesta de Barbour y colaboradores (1999), los sitios con mayor calidad fueron Río Taxhimay y Salida de Requena, en donde también se registró la mayor estabilidad en cuanto a diversidad, riqueza y grupos funcionales. Tianguistengo presentó una disminución drástica de calidad en el mes de abril 2017, debido a la desviación de agua y el dragado que realizaron en este sitio, lo cual altero completamente el entorno. Asimismo, en Tepeji del Río la calidad del hábitat disminuyó, a pesar de tener condiciones de sustrato adecuadas para el establecimiento de los organismos; las descargas de aguas residuales e industriales de la zona, crearon condiciones no aptas para la sobrevivencia de los macroinvertebrados.

En Binola aumentó la diversidad y grupos funcionales en sequía cálida, lo que indica que es una localidad que presenta variaciones constantes por las descargas de agua de la presa Endhó, pero también se encontró que la temporada estacional influye, debido a que en el mes de abril el crecimiento de macrófitas acuáticas creó nuevos microhábitats y fuentes de

alimento, los cuales contribuyeron a un incremento en la diversidad de los macroinvertebrados. En el caso de Tepetitlán a pesar de estar expuesto a las descargas de agua provenientes de la presa Endhó, presenta condiciones favorables, como los aportes de agua de manantial, variaciones en profundidad, con lo que se crean pozas de distintos tamaños; asimismo, la aparente estabilidad de la zona ribereña, aunado al crecimiento de macrófitas con raíces sumergidas. Todo esto contribuye a que tenga el potencial de recuperarse y estar en constantes episodios de colonización, cuando las descargas de la presa no son constantes. Sin embargo, el ensamblaje de macroinvertebrados en estos dos sitios, se compone principalmente de las familias Chironomidae, Lumbriculidae y Tubificidae, organismos adaptados a los constantes descensos de oxígeno y cambios en el flujo del cauce. En las tres temporadas los organismos de Chironominae *Chironomus* fueron la población dominante. Al respecto Oviedo y Reynoso (2018), encontraron a la subfamilia Chironominae en lugares con fuerte impacto antrópico y asociadas a bajos niveles de oxígeno, reportándola como altamente tolerante a condiciones adversas.

Las condiciones de caracterización del hábitat, reflejan que toda la cuenca se encuentra con algún grado de afectación, por lo que no se encontró ningún sitio con clasificación óptima. Las principales afectaciones son de tipo antrópico, lo que ha contribuido a la degradación de los ecosistemas, de esta forma las localidades más alejadas de las poblaciones se encontraron en mejores condiciones y con una mayor estabilidad.

Respecto a las relaciones entre los atributos de los ensamblajes y las variables ambientales; de manera general, en las tres temporadas, ya sea la riqueza, abundancia o diversidad, estuvieron correlacionadas con el oxígeno disuelto de manera positiva, esto se explica debido a que el oxígeno es uno de los elementos más importantes para el desarrollo de la mayoría de los organismos acuáticos.

Las tres temporadas mostraron correlaciones negativas con nitrógeno y fósforo totales. Se esperaría una correlación positiva con estos nutrientes y la estructura de los ensamblajes de macroinvertebrados; a pesar de que no son nutrientes que utilicen de manera directa, son una medida del potencial de los hábitats para el desarrollo de los organismos base de la cadena alimenticia, como las algas bentónicas y las macrófitas acuáticas, las cuales son fuente de alimento y refugio para varios grupos de macroinvertebrados. Sin embargo, la correlación

negativa se debe a que el Río Tula es un ecosistema que presenta alta contaminación en varias localidades, alcanzando niveles de N y P totales por encima del límite máximo permisible para la protección de la vida acuática de los ríos, de acuerdo a la NOM 001-SEMARNAT-1996, por lo que las cantidades elevadas que se encontraron en los sitios más degradados pueden ser perjudiciales para los organismos (SEMARNAT, 1997).

De la misma forma, en las tres temporadas se encontraron correlaciones negativas con las variables de conductividad, sólidos totales disueltos, alcalinidad, turbidez y carbono orgánico total. Estas variables reflejan la cantidad de partículas disueltas en el agua, ya sea de forma orgánica o inorgánica, las cuales al aumentar provocan una disminución de la riqueza y diversidad, debido a que para varios organismos, especialmente para los efemerópteros y plecópteros, elevadas cantidades de partículas en el agua dificultan su desarrollo al interferir con el adecuado funcionamiento de sus branquias (Alonso y Camargo, 2006). Esta puede ser la causa, por lo cual en este estudio no se encontraron organismos del orden Plecoptera, reportado como uno de los principales grupos indicadores de buena calidad del agua, por ser muy sensibles a la contaminación (Gamboa *et al.*, 2008).

Una de las características que más influye en la distribución de los organismos, es la variedad de sustratos disponibles para ser utilizados como microhábitats, lo cual se observa en las correlaciones positivas encontradas en las tres temporadas, con las variables de cobertura y caracterización del sustrato. Además, en la temporada de sequía cálida (abril 2017), se encontraron correlaciones entre la riqueza, abundancias y diversidad con las características que se refieren a la cobertura vegetal (estabilidad de la zona ribereña, protección vegetal y ancho de la zona ribereña); estas correlaciones son importantes en esta temporada, debido a que fue el periodo estacional donde hubo mayor cantidad de vegetación, la cual, además de proteger la zona de ribera de fenómenos erosivos, parte de esa vegetación se encontraba con raíces sumergidas creando nuevos microhábitats para los macroinvertebrados.

Los ensamblajes de macroinvertebrados encontrados en el Río Tula, indican que hay degradación en toda la cuenca. Inclusive en sitios donde la calidad del agua es buena, se encontraron afectaciones que pudieron estar asociadas a la reducción de la zona ribereña, lo que favorece a fenómenos erosivos, arrastre de partículas y deslaves, originando una reducción de los microhábitats para los macroinvertebrados.

9. CONCLUSIONES

- Se encontraron un total de 55 familias pertenecientes a 23 órdenes. Trichoptera y Diptera fueron los órdenes con mayor número de familias, siendo los organismos de la familia Chironomidae los más frecuentes, espacio-temporalmente.
- El sitio con mejores condiciones durante las tres temporadas de estudio fue el Río Taxhimay, presentando mayor estabilidad en composición estructural y funcional de los macroinvertebrados, así como de las características ambientales.
- En las localidades Tepetitlán y Binola, los organismos más frecuentes en las tres temporadas fueron los quironómidos, los cuales se encuentran adaptados a los constantes descensos de oxígeno.
- La parte media-baja de la cuenca (Mixquiahuala, Chilcuautila, Ixmiquilpan, y Tasquillo) se caracterizó por presentar principalmente, organismos recolectores y depredadores, con dominancia de organismos de la familia Hyalellidae, esto asociado a las altas cantidades de materia orgánica.
- Ecológicamente, la composición estructural y funcional de ensamblajes de macroinvertebrados estuvo correlacionada con las cantidades de oxígeno disuelto y la disponibilidad de microhábitats y fuentes de alimento.
- El Río Tula se encuentra impactado antrópicamente, aunque esta afectación es menor antes de la entrada de las aguas negras, el mayor impacto se encontró en el tramo que va de Tepeji hasta la presa Endhó, con afectaciones constantes por la descarga de aguas provenientes del Valle de México, aguas residuales de la zona y altas descargas industriales.
- Las presas Requena y Endhó, mostraron un efecto positivo en la disminución de contaminantes y materia orgánica, permitiendo una mejora en la calidad del agua y hábitats, de los sitios que se encuentran aguas abajo de estos embalses (Salida de Requena, Tepetitlán y Binola). Aunado a esto, los diferentes aportes de agua de manantiales contribuyen a la mejora en las condiciones ambientales.
- Los ensamblajes de macroinvertebrados mostraron variaciones debidas tanto a los cambios estacionales, como a los impactos antrópicos.

- El Río Tula en su tramo más contaminado (Emisor Central, El Salto, San Marcos Tula y Río Salado) no presentó variaciones significativas de acuerdo a la temporada estacional, ya que la constante descarga de aguas residuales e industriales no permiten una recuperación del sistema.
- Se cumple la hipótesis propuesta que a mayor impacto antrópico disminuiría la cantidad de grupos funcionales, la diversidad y la riqueza.

10. LITERATURA CITADA

Agencia Vasca del Agua (URA). (2014). Evaluación de fauna bentónica macroinvertebrada en ríos vadeables. Recuperado de: https://www.uragentzia.euskadi.eus/contenidos/informacion/protocolos_estado_aguas/es_def/adjuntos/01_RW_MACROINVERTEBRADOS_URA_V_3.1.pdf

Alba, J., Pardo, I. Prat, N. y Pujante, A. (2005). Protocolos de muestreo y análisis para invertebrados bentónicos. España: Ministerio de Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Ebro.

Alonso, A. y Camargo, J. (2006). Estado actual y perspectivas en el empleo de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como indicadora del estado ecológico de los ecosistemas fluviales españoles. *Ecosistemas*, 14(3), 87-99.

APHA. (1999). *Standard Methods for the Examination of water and wastewaters*. 20th ed. Washington. D. C., USA: American Public Health Association.

Astudillo, M., Ramírez, A., Novelo, R. y Vázquez, G. (2014). Descomposición de hojarasca en seis arroyos de Bosque Mesófilo de Montaña en la cuenca alta del río La Antigua, Veracruz, México. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744)* 62 (Suppl. 2), 111-127.

Badillo, R. (2008). Ordenamiento ecológico territorial regional en los municipios donde se ubica el Parque Nacional Los Mármoles. Consejo Estatal de Ecología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DQ006. México.

Barba-Álvarez, R., De la Lanza-Espino, G., Contreras-Ramos, A. y González-Mora, I. (2013). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 84: 381-383.

Barbour, M., Gerritsen, J., Snyder, B. y Stribling, J. (1999). *Rapid bioassessment protocols for use in wadeable streams and rivers: Periphyton, Benthic macroinvertebrates, and Fish*, Second edition. EPA 841-B-99-002. Washington D. C., U. S: Environmental Protection Agency, Officer of water.

Bohórquez, P. y Campos, C. (2007). Evaluación de *Lactuca sativa* y *Selenastrum capricornutum* como indicadores de toxicidad en aguas. *Universitas Scientiarum. Revista de la Facultad de Ciencias*, 12 (2), 83-98.

Capps, K., NG, G., y Strickland, J. (2014). Environmental assessment of stream habitats bordering Palenque National Park, Chiapas, Mexico. *The Southwestern Naturalist* 59(2), 286–292.

Carmona, J. y Caro, A. (2017). The last peri-urban rivers of the Mexico Basin: establishment of potential reference conditions through the evaluation of ecological quality and biological indicators. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 425-436.

Caro, A., Carmona, J. y Mazari, M. (2016). Evaluation of ecological quality in peri-urban rivers in Mexico City: a proposal for identifying and validating reference sites using benthic macroinvertebrates as indicators. *Journal of Limnology*, 75(s1), 1-16.

Carrera, C. y Fierro, K. (2001). *Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Quito, Ecuador: EcoCiencia.

Chong L. A. (1989). *Variación de la comunidad planctónica de la Presa Requena, Hidalgo*. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 112 pp.

Comisión Nacional del Agua (CNA). (2003). *Inventario Nacional de Descargas de aguas residuales Industriales*. Subdirección General Técnica. México. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). *Revisión de disponibilidad de aguas superficiales en las cuencas del valle de México y Tula*. México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013). *Estadísticas del Agua en México*, Edición 2013. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018). *Atlas del Agua en México*, edición 2018. México. 146 p. recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. México. 276 pp. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf

Correa-Araneda, F., Rivera, R., Urrutia, J., De Los Ríos, Contreras, A. y Encina-Montoya, F. (2010). Efectos de una zona urbana sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos de un ecosistema fluvial del sur de Chile. *Limnetica*, 29(2): 183-194.

Dall, P. (1995). Commonly used methods for assessment of water quality. En Toman, M. y F. Steinman. *Biological assessment of organic pollution in streams (theory, application and comparison of methods)*. Tempus. Universidad de Ljubljana, Eslovenia.

De la Lanza, G. Hernández, S. y Carbajal, J. (2011). Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores). México: Editorial Plaza y Valdes.

Domínguez, E. y Fernández, H. (2009). Macroinvertebrados bentónicos Sudamericanos. Sistemática y biología. Tucumán, Argentina: Fundación Miguel Lillo.

Downs, T., Cifuentes, E. y Suffett, M. (1999). Risk screening for human exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico City Region. *Environmental Health Perspectives*, 107(7), 553-561.

Eustaquio, C. (2018). Insectos acuáticos del Río Tula Hidalgo, México: Composición, abundancia y distribución. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México. 79 pp.

Flowers, R. y De la Rosa, C. (2010). Capítulo 4. Ephemeroptera. *Revista de Biología Tropical*. 58(4), 63-93.

Gamboa, M., Reyes, R. y Arrivillaga, J. (2008). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 48(2), 109-120. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1690-46482008000200001&lng=es&tlng=es

González, N., Sánchez, S. y Mairena, A. (2013). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua del trópico húmedo en las microcuencas de los alrededores de Bluefields, RAAS. *Revista WANI*, (68), 53-63.

Grimaldo, W. (2004). Aspectos tróficos y ecológicos de los macroinvertebrados acuáticos. *Ecological explorers*, 1(1), 1-7.

Giller, P. y Malmqvist, B. (2002). *The biology of streams and rivers*. Prensa de la Universidad de Oxford. Gran Bretaña. 296 pp.

Hanson, P., Springer, M. y Ramírez, A. (2010). Introducción a los grupos de macroinvertebrados acuáticos. *Revista Biología Tropical*, 58(4), 3-37.

Hauer, R. y Lamberti, G. (1996). *Methods in stream ecology*. San Diego, California, Estados Unidos de América. Academic Press.

Hernández, V. y Nélica, C. (2018). El río y su territorio. Espacio de libertad: un concepto de gestión. *Terra Nueva Etapa*, 34(56), 1-30.

Herrera, I. (2006). Estudio de la calidad fisicoquímica de las aguas del río Tula. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis para obtener el grado de ingeniero, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. México.

Hurtado, S., García, F. y Gutiérrez, P. (2005). Importancia ecológica de los macroinvertebrados bentónicos de la subcuenca del Río San Juan, Querétaro, México. *Folia Entomológica Mexicana.*, 44(3), 271-286.

Jiménez, B., Siebe, C. y Cifuentes, E. (2005). El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula. pp. 33-55. En: Jiménez, B. y Marín, L. *El agua en México vista desde la academia.* México. Academia Mexicana de Ciencias.

López, M., Ramos, E. y González, F. (2015). Variación de carbono orgánico disuelto en la cuenca del río Tula, Hidalgo. Pp. 489-495. En: Paz, F., Wong, J. y Torres, R. *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México.* México. Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

López, M., Ramos, M. y Hernández, M. (2007). Biomonitorio rápido para evaluar contaminación orgánica en el río Lerma. Parte del proyecto Evaluación del manejo del agua como elemento integrador en la Cuenca Lerma Chapala Santiago, Número SEMARNAT2002C010249/A1.

Mafla, M. (2005). Guía para Evaluaciones Ecológicas Rápidas con Indicadores Biológicos en Ríos de Tamaño Mediano Talamanca-Costa Rica. Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Turrialba.

Margalef, R. (1998). *Ecología.* España. Omega.

Merritt, R. y Cummins, K. (1996). *An introduction to the aquatic insects of North America.* Estados Unidos de América. Kendall Hunt.

Merritt, R., Cummins, K. y Berg, M. (2008). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America.* Estados Unidos de América. Kendall/Hunt Publishing Company.

Molineri, C. (2002). Cladistic Analysis of the South American Species of *Tricorythodes* (Ephemeroptera: Leptohiphidae) with the Description of New Species and Stages. *Aquatic Insects*, 24(4), 273-308.

Molineri, C. y Zúñiga, M. (2006). New species of Leptohiphidae (Insecta: Ephemeroptera) from Colombia with evidence of reproductive time segregation. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 41(2), 139-151.

Montelongo, R., Gordillo, A., Otazo, E., Villagómez, J., Acevedo, T. y Prieto, F. (2008). Modelación de la calidad del agua del Río Tula, Estado de Hidalgo, México. *Dyna*, 75(154), 5-18.

Ontiveros, R., Diakite, L., Álvarez, M. y Coras, P. (2013). Evaluación de aguas residuales de la Ciudad de México utilizadas para riego. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(4), 127-140.

Oscoz, J. (2009). *Guía de campo Macro-invertebrados de la Cuenca del Ebro*. España. Confederación Hidrográfica del Ebro. Cemeycá.

Oviedo, N. y Reinoso, G. (2018). Aspectos ecológicos de larvas de Chironomidae (Diptera) del río Opia (Tolima, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología* 44(1): 101-109. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcen/v44n1/0120-0488-rcen-44-01-00101.pdf>

Pennak, R. (1978). *Fresh water invertebrates of the Unites States*. Estados Unidos de América. John Wiley & Sons, Inc.

Pino, R. y Bernal, J. (2009). Diversidad, distribución de la comunidad de insectos acuáticos y calidad del agua de la parte alta- media del río David, provincia de Chiriquí, república de Panamá. *Revista Gestión y Ambiente*, 12(3), 73-84.

Piñón, M., Pérez, R., Torres, U. y Pineda, R. (2014). Integridad biótica de la microcuenca del Río Chiquito, Morelia, Michoacán, México, basada en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos. *Revista de Biología Tropical*. 62(2), 221-231.

Prat, N., Acosta, R., Villamarín, C. y Rieradevall, M. (2012). *Guía para el reconocimiento de las larvas de Chironomidae (diptera) de los Ríos Altoandinos de Ecuador y Perú, Clave para la determinación de los principales morfotipos larvarios*. Grupo de Investigación F.E.M. Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona.

Ramírez, A. (2010). Capítulo 5. Odonata. *Revista de Biología Tropical*, 58(4), 97-136.

Roldán, G. (1988). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*. Medellín, Colombia. Fondo FEN.

Rosenberg, D. y Resh, V. (1993). *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. Nueva York, Estados Unidos de América. Chapman y Hall.

Rubio, I., López, M., Ramos, M. y Rico, R. (2016). Bioaccumulation of Metals Arsenic, Cadmium, and Lead in Zooplankton and Fishes from the Tula River Watershed, México. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(5), 1-12.

Sánchez, P. (2002). *Valoración ecotoxicológica de la contaminación de origen agrario: incorporación de bioensayos en los protocolos de evaluación del riesgo ambiental*. Tesis de doctorado. España. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1997). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1996, Que Establece Los Límites Máximos permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales. México. 35 pp.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Planta de tratamiento de aguas residuales, Atotonilco. México.

Soto, C. (2003). La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. México: Instituto de Geografía, UNAM.

Springer, M., (2010). Capítulo 7 Trichoptera. Revista de Biología Tropical. 58(4), 151-198.

Tapia, L., Sánchez, T., Baylón, M., Jara, E., Arteaga, C., Maceda, D. y Salvatierra A. (2018). Invertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua en lagunas altoandinas del Perú. *Ecología Aplicada*, 17(2), 149-163.

Toman, M. y Steinman, F. (1995). Biological assessment of organic pollution in streams (theory, application and comparison of methods. Universidad de Ljubljana, Eslovenia: Tempus.

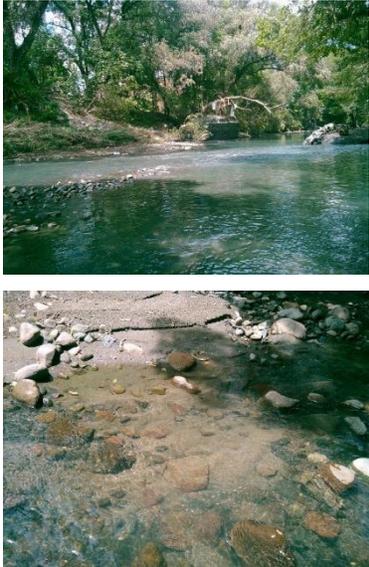
Usinger, R. (1956). Aquatic insects of California, with keys to North American genera and California species. Estados Unidos de América: prensa de la Universidad de Berkeley, California.

Wallace, B. y Webster, J. (1996). The Role of Macroinvertebrates in Stream Ecosystem Function. *Annual Review of Entomology*, 41, 115-139.

Wetzel, R. y Likens, G. (1991). *Limnological Analyses*. Springer Science Business Media New York. USA.

11. ANEXOS

Tabla 1. Características generales de los sitios de muestreo.

<p>1.Río Taxhimay</p> <p>Presenta una profundidad promedio de 0.6 m, el agua es transparente; el ancho del cauce varía de acuerdo a la temporada, con un valor promedio de 12 m; el tipo de flujo es en su mayoría laminar 60% y un 40% moderado con pequeñas ondulaciones; el sustrato predominante es rocoso arenoso, con clastos angulosos de tamaños aproximados de 5-30 cm, con presencia de hojarasca en las orillas. En la parte media suele presentar microalgas bentónicas y macroalgas filamentosas, variando en cobertura de acuerdo a la temporada estacional; aparentemente no hay indicios de un impacto antrópico que esté afectando de manera significativa. La vegetación ribereña se compone de árboles y arbustos que se mantienen estables a lo largo del año.</p>	
<p>2. Tepeji del Río</p> <p>Es un sitio somero, con una profundidad menor a 0.4 m; el ancho del cauce varía de acuerdo a la temporada estacional, disminuyendo de 25 m hasta aproximadamente 5 metros en época de estiaje; el tipo de flujo es predominantemente laminar; el sustrato es rocoso arenoso, con clastos de entre 5 y 30 cm, en su mayoría con bordes redondeados; la vegetación ribereña está constituida principalmente de árboles con raíces sumergidas. La presencia de basura y las condiciones observadas indican impacto antrópico, ya que a los alrededores se encuentra la zona urbana de Tepeji del Río, por lo cual este sitio se ve afectado por descargas domésticas e industriales, principalmente de empresas textileras.</p>	

<p>3. Tianguistengo</p> <p>Tiene una profundidad variable de acuerdo a la temporada estacional, siendo esta inferior a un metro; presenta una transparencia promedio de 40 cm, el ancho del cauce varía de acuerdo a la temporada, el sustrato es principalmente arenoso, la vegetación ribereña es muy reducida, destacando los árboles con raíces sumergidas, constituyendo uno de los pocos hábitats disponibles para los macroinvertebrados; el flujo es laminar, se observó un fuerte impacto antrópico por evidencias de, desvío del agua del caudal, dragado y presencia de asentamientos humanos en las cercanías. En un extremo hay un camino y en la otra orilla, la presencia de terrenos de cultivo.</p>	
<p>4. Emisor Central</p> <p>Debido a que transporta las aguas de desecho provenientes de la Ciudad de México, es un sitio que presenta alta contaminación, con sedimentos muy oscuros y la presencia de gran cantidad de basura, principalmente en las orillas. Tiene una profundidad promedio de 0.6 m, con un ancho de cauce variable, en promedio de 30 m, tipo de flujo turbulento medio; el sustrato es principalmente rocoso-arenoso, con clastos grandes de entre 5 y 50 cm, en su mayoría con bordes redondeados; el color del agua se observa en tonalidades cafés y olor fuerte. Sin embargo, al estar en una zona alejada de la población, la vegetación ribereña es predominantemente nativa, constituida principalmente de ahuehuetes.</p>	
<p>5. Salida de la Requena</p> <p>Presenta una profundidad promedio de 0.3 m. Es un sitio con aguas cristalinas, con un ancho de cauce variable, de acuerdo a la temporada y a las descargas de la presa Requena, con promedio de 11 m; presenta un tipo de flujo en su mayoría laminar 70% y 30% turbulento medio, con gran cantidad de materia orgánica (ramas y hojarasca); el tipo de sustrato es rocoso con clastos grandes de entre 20 y 70 cm, con formas redondeadas y angulosas; tiene presencia de macroalgas filamentosas variando en cantidad de cobertura de acuerdo a la temporada estacional; se encuentra sombreado en un 80%, la vegetación ribereña es estable, compuesta en su mayoría de especies nativas como el ahuehuete.</p>	

6. El Salto, 7. San Marcos y 8. Tula

Estos tres sitios se encuentran dentro de la cuenca media del Río Tula, son sitios someros con una profundidad menor a un metro, transparencias aproximadas de 10 cm. El tipo de flujo que presentan es predominantemente laminar; el color del agua varía de café oscuro a café verdoso, de acuerdo a las descargas de agua que esté recibiendo y al sitio; presenta fuerte olor; el tipo de sustrato es arenoso-rocoso, con rocas de entre 5 y 20 cm, mayormente redondeadas; los sedimentos presentan una coloración oscura; la vegetación ribereña es inestable y muy reducida. Se trata de sitios fuertemente impactados antrópicamente por descargas residuales e industriales, tanto de la zona como de las provenientes de la Ciudad de México.



9. Tepetitlán

Presenta una profundidad promedio de 0.7 m; El ancho del cauce es de 12 m en promedio; se alimenta constantemente de agua proveniente de manantiales, sin embargo, al ubicarse a la salida de la cortina de la presa Endhó, recibe las descargas de agua de este embalse, por lo que presenta variaciones de flujo y transparencia de acuerdo a la magnitud de la descarga; además, es un cauce modificado, por lo cual una parte de su tramo se compone de un fondo de concreto y grandes rocas con tamaños que van de 30 a 70 cm y bordes irregulares. Cuando la presa Endhó no está arrojando agua se desarrolla la presencia de biofilm sobre las rocas, la vegetación ribereña dominante son árboles y arbustos predominantemente nativos, aunque de acuerdo a la temporada estacional y a la calidad del agua, pueden llegar a crecer macrófitas con raíces sumergidas en las orillas.



10. Binola

Se ubica posterior a la presa Endhó, presenta una profundidad promedio de 0.4 m, una transparencia y ancho del cauce variable de acuerdo con las descargas de agua que esté recibiendo. Presenta un tipo de flujo 50 % de moderado a rápido y 50% laminar; el tipo de sustrato es rocoso arenoso con tamaños de rocas de entre 5 y 20 cm, con bordes redondeados 70% y 30% angulosas. El color, olor y la vegetación acuática varían de acuerdo a la temporada y al tipo de descargas recibidas. Este sitio además recibe agua proveniente de manantiales. El área de la vegetación ribereña se ve reducida por la presencia de la apertura de un camino en uno de los bordes, la vegetación nativa predominante son ahuehuetes.



11. Río Salado

Es un sitio altamente contaminado, ya que constituye uno de los ríos tributarios que transporta las aguas del Valle de México hacia el Río Tula, por lo cual no hay presencia de vegetación acuática, solo vegetación ribereña con hierbas y arbustos no nativos y con un ancho de cobertura muy reducido. Tiene una profundidad promedio de 0.7 m, el ancho del cauce es de 26 m; el tipo de flujo es laminar; presenta sustrato arenoso, con color obscuro y olor muy fuerte, el color del agua varía de acuerdo con el agua transportada; asimismo, hay presencia de basura en las orillas, además en la zona aledaña existen cultivos y asentamientos humanos.



12. Mixquiahuala, 13. Chilcuautila

Estos sitios presentan profundidades promedio menores a 1 m. El tipo de flujo del agua va de moderado a turbulento. Por su ubicación geográfica presentan condiciones similares de vegetación aledaña, destacando la presencia de ahuehuetes con raíces sumergidas a las orillas del río, el tipo de sustrato es arenoso-rocoso con rocas redondeadas. A lo largo del tramo que ocupan estos sitios existen aportes de agua por parte de manantiales.



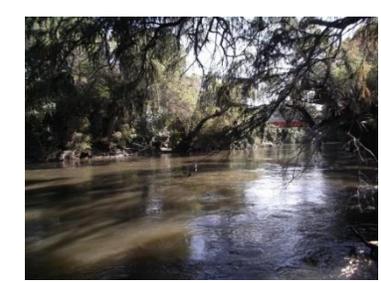
Mixquiahuala



Chilcuautila

14. Ixmiquilpan

Se localiza dentro del poblado que lleva el mismo nombre. Por lo cual se encuentra expuesto a las descargas residuales de la zona, presentando problemas de contaminación, presencia de basura y una cobertura reducida de la vegetación ribereña, compuesta principalmente por árboles y arbustos. El tipo de flujo es laminar, el sedimento es arenoso, con un color obscuro y olor fuerte.



15. Tasquillo

Se localiza en el poblado de Tasquillo, se encuentra aguas arriba de la presa Zimapán. Este sitio presenta profundidades promedio de 1 m. el ancho del cauce es de aproximadamente 22 metros. El tipo de flujo del agua va de moderado a turbulento. En cuanto a vegetación aledaña se encuentran la presencia de ahuehuetes con raíces sumergidas a las orillas del río, en la temporada de primavera crecen macrófitas acuáticas en las orillas; el tipo de sustrato es arenoso-rocoso con rocas redondeadas.



Tabla 15. Abundancia relativa (%) de las familias encontradas en las distintas localidades, septiembre 2016.

Taxón	Río Taxhimay	Tepeji del Río	Tianguistengo	Emisor Central	Salida de Requena	El Salto	San Marcos	Tula	Tepetitlán	Binola	Río Salado	Mixquiahuala	Chilcuautila	Ixmiquilpan	Tasquillo
Baetidae	45.17	61.52	10.10	0	6.90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Siphonuridae	0	0.15	1.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caenidae	0.89	0.07	2.55	0	5.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptophlebiidae	0	1.62	0.73	0	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptohyphidae	1.53	14.33	0	0	1.43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heptageniidae	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidropsychidae	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glossosomatidae	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polycentropodidae	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydroptilidae	0.13	0.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrobiosidae	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptoceridae	0	0.04	0.24	0	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ephydriidae	0	0	0.36	0	0	0	0	0	0	0.97	0	0	0	0	0
Simuliidae	30.66	2.94	0.36	0	22.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chironomidae	18.83	8.82	46.59	0	54.30	0	0	0	47.72	98.88	0	13.16	0.91	0.91	12.35
Syrphidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0
Empididae	0	0.26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0.59
Culicidae	0.13	0.04	0.49	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Psylloidea	0	0.04	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Veliidae	0	2.94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hebridae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0
Corixidae	0	0	1.09	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Naucoridae	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aphidoidea	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0	0	0	0	0
Elmidae	0.64	0.26	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
Staphylinidae	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0
Dryopidae	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Curculionidae	0	0	1.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Megaloptera.	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gomphidae	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrachnidae	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aracnida	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lumbricidae	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lumbriculidae	1.65	5.77	33.45	0	2.81	0	0	0	52.07	0	0	0	0	0	0
Glossiphoniidae	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.83	0.22	0	1.63
Erpobdellidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.09	0	0
Tubificidae	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100	0	0	0	6.13
Nematoda	0	0.18	0.24	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planorbidae	0.13	0	0	0	0.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Physidae	0	0	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hyalrellidae	0	0	0	0	0.17	0	0	0	0	0	0	84.78	98.68	99.05	79.15
Asellidae	0	0	0	0	4.80	0	0	0	0	0	0	0.09	0.10	0.03	0.13
Palaemonidae	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 16. Abundancia relativa (%) de las familias encontradas en las distintas localidades, noviembre 2016.

Taxón	Río	Tepeji	Emisor	Salida de	El	San	Tula	Tepetitlán	Binola	Río					
	Taxhimay	del Río								Tianguistengo	Central	Requena	Salto	Marcos	Salado
Baetidae	57.71	0.43	0	0	7.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Siphonuridae	5.25	0	0.53	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caenidae	0.18	0.69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptophlebiidae	1.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptohypidae	0.55	0.37	0	0	3.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heptageniidae	0.37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polycentropodidae	3.22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrobiosidae	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydroptilidae	0.37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ephydriidae	0	0	1.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Simuliidae	0.74	0.53	3.21	0	34.20	0	0	0	0	0	0	0	0.30	0	0.01
Chironomidae	26.14	5.01	47.06	0	42.47	0	0	0	96.88	78.26	0	33.17	28.61	0.59	2.35
Ceratopogonidae	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Culicidae	0.28	0.05	2.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Syrphidae	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Empididae	0	0.05	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Psychodidae	0	0	1.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Psylloidea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
Veliidae	0.92	0.43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corixidae	1.47	0.05	1.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Belostomatidae	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cicadellidae	0.05	0	0.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elmidae	0.05	0.16	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coenagrionidae	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lestidae	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrachnidae	0.05	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lumbriculidae	0.92	0	0	0	2.35	0	0	0	3.13	0	0	0	3.01	0	0
Glossiphoniidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0
Planariidae	0	0.05	0	0	7.78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erpobdellidae	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0
Tubificidae	0	91.47	42.78	0	0	0	0	0	0	21.28	0	34.63	0	2.09	0
Planorbidae	0	0.05	0	0	0.25	0	0	0	0	0.23	0	0	0	0	0
Physidae	0	0.11	0	0	0.49	0	0	0	0	0.23	0	0	0	0	0
Hyalellidae	0	0.16	0	0	0	0	0	0	0	0	32.20	68.07	96.87	97.60	0
Asellidae	0	0.37	0	0	0.74	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18	0.03
Pseudoscorpion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
Aracnida	0	0	0.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hymenoptera	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 17. Abundancia relativa (%) de las familias encontradas en las distintas localidades, abril 2017.

Taxón	Río Taxhimay	Tepeji del Río	Tianguistengo	Emisor Central	Salida de Requena	El Salto	San Marcos	Tula	Tepetitlán	Binola	Río Salado	Mixquiahuala	Chilcuautila	Ixmiquilpan	Tasquillo
Baetidae	46.62	0	0	0	15.89	0	0	0	1.70	10.91	0	0	0	0	0
Siphonuridae	2.10	0	0	0	0	0	0	0	0.79	0	0	0	0	0	0
Caenidae	0.30	0	0	0	9.78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptophlebiidae	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
Leptohyphidae	2.65	0	0	0	11.00	0	0	0	1.31	0	0	0	0	0	0.04
Heptageniidae	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Polycentropodidae	4.96	0	0	0	2.93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrobiosidae	1.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydroptilidae	4.32	0	0	0	0.24	0	0	0	8.64	0	0	0	0	0	0.07
Helicopsychidae	2.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptoceridae	0.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Goeridae	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glossosomatidae	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calamoceratidae	0.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Simuliidae	5.82	0	0	0	0	0	0	0	0.39	5.97	0	0	0	0.09	0.07
Stratiomyidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2.09	0	0	0	0	0	0
Chironomidae	13.52	0	0	0	15.16	0	0	0	39.14	45.27	0	0	0	0.63	4.36
Psychodidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0.52	0	0	0	0	0	0
Ceratopogonidae	0.86	0	0	0	0	0	0	0	0.52	0	0	0	0	0	0.11
Empididae	0	0	0	0	0	0	0	0	0.65	1.10	0	0	0	0	0.02
Culicidae	0.38	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0.63	0	0	0	0	0
Ephydriidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0.26	0	0	0	0	0	0
Psychodidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.26
Veliidae	0.04	0	0	0	4.16	0	0	0	0.13	0	0	0	0	0	0
Cicadellidae	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Belostomatidae	0	0	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aphidoidea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0
Corixidae	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0.79	0.04	0	0	0	0.99	0
Elmidae	0.60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dytiscidae	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrophilidae	0.09	0	0	0	0	0	0	0	3.93	0	0	0	0	0	0
Crambidae	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calopterygidae	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0	0	0	0	0	0.02
Libellulidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0.65	0	0	0	0	0	0
Coenagrionidae	0	0	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poduridae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0
Hydrachnidae	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lumbricidae	0.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lumbriculidae	10.35	0	0	0	1.47	0	0	0	12.43	0	0	2.91	0	0	9.34
Tubificidae	0	100	0	0	0	0	0	0	0	12.64	0	0	4.30	9.26	0
Glossiphoniidae	0	0	0	0	0.24	0	0	0	0	0	0	1.02	0	2.52	0.02
Planariidae	0.38	0	0	0	0.24	0	0	0	0	1.37	0	0	0.22	0	5.22
Erpobdellidae	0	0	0	0	0.37	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0.81	0.33
Planorbidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0	0
Physidae	0.04	0	0	0	0.24	0	0	0	25	9.46	0	0	0	0.09	0.02
Bivalvia	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hyalellidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94.82	94.05	83.72	80.09
Asellidae	0	0	0	0	38.02	0	0	0	0	0	0	1.09	1.36	1.89	0
Ostracoda	0	0	0	0	0	0	0	0	0.79	12.52	0	0	0	0	0.02
Aracnida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0

Tabla 18. Distintos taxones encontrados en el Río Tula y sus grupos funcionales.

Orden	Familia	Género	Grupo funcional
Ephemeroptera	Baetidae	<i>Americabaetis/Apobaetis</i>	Recolectores
	Baetidae	<i>Americabaetis/Apobaetis</i>	Recolectores
	Baetidae	<i>Callibaetis</i>	Recolectores
	Baetidae	<i>Baetodes</i>	Raspadores
	Baetidae	<i>Callibaetis b</i>	Recolectores
	Caenidae	<i>Caenis</i>	Raspadores
	Leptophlebiidae	<i>Choroterpes</i>	Raspadores
	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	Raspadores
	Leptohyphidae	<i>Tricorythodes</i>	Raspadores
Heptageniidae		Raspadores	
Trichoptera	<i>Hidropsychidae</i>	<i>Leptonema</i>	Filtradores
	Glossosomatidae	<i>Culoptila</i>	Raspadores
	Polycentropodidae	<i>Polycentropus</i>	Depredadores
	Hydroptilidae	<i>Leucotrichiini</i>	Recolectores
	Hydroptilidae	<i>hydroptila</i>	Raspadores
	Hydrobiosidae	<i>Atopsyche</i>	Depredadores
	Helicopsychidae	<i>Helicopsyche</i>	Raspadores
	Anomalopsychidae		Raspadores
	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	Fragmentadores
	Leptoceridae	<i>Trianodes</i>	Fragmentadores
Diptera	Ephydriidae		Fragmentadores
	Simuliidae		Filtradores
	Chironomidae 1		Raspadores
	Chironomidae 2		Fragmentadores
	Chironomidae 3		Recolectores
	Chironomidae 4		Recolectores
	Chironomidae 5		Recolectores
	Chironomidae 6		Depredadores
	Chironomidae 7		Depredadores
	Chironomidae 8		Depredadores
	Chironomidae 9		Recolectores
	Chironomidae 10		Recolectores
	Chironomidae 11		Raspadores
	Chironomidae 12		Raspadores
	Chironomidae 13		Recolectores
	Syrphidae	<i>Eristalis</i>	Recolectores
	Empididae		Depredadores
	Culicidae		Recolectores
	Ceratopogonidae		Raspadores
	Stratiomyidae		Recolectores
Psychodidae larva		Recolectores	
Psychodidae		Recolectores	
Hemiptera	Hemiptero		Depredadores
	Veliidae	<i>Rhagovelia</i>	Depredadores
	Hebridae		Depredadores
	Corixidae	<i>Corixa</i>	Depredadores
	Naucoridae		Depredadores
	Belostomateidae	<i>Belostoma</i>	Depredadores
	Cicadellidae		No identificado
Coleoptera	Elmidae	<i>Macrelmis</i>	Fragmentadores
	Elmidae	<i>Heterelmis</i>	Fragmentadores
	Dysticidae		Depredadores
	Hydrophilidae		Recolectores
	Hydrophilidae larva		Depredadores
	Staphylinidae		Depredadores
	Dryopidae		Fragmentadores
Odanata	Aeshnidae		Depredadores
	Calopterygidae	<i>Hetaerina</i>	Depredadores
	Libellulidae	<i>Sympetrum</i>	Depredadores
	Coenagrionidae	<i>Argia</i>	Depredadores

	Coenagrionidae	<i>Argia</i>	Depredadores
Trombidiformes	Hydrachnidae A		Filtradores
	Hydrachnidae B		Filtradores
Aracnida	Aracnido 1		Depredadores
	Aracnido 2		Depredadores
	Aracnido 3		Depredadores
Lumbriculida	Lumbricidae		Recolectores
	Lumbriculidae		Recolectores
Rhynchobdellida	Glossiphoniidae		Depredadores
Arhynchobdellida	Erpobdellidae		Depredadores
Seriata	Planariidae	<i>Dugesia</i>	Depredadores
Haplotaxida	Tubificidae		Recolectores
Mollusca	Planorbidae		Raspadores
	Physidae		Raspadores
	Bivalvia		Filtradores
Amphipoda	Hyaellidae		Recolectores
Isopoda	Asellidae		Recolectores
Decapoda	Palaemonidae		Recolectores
Hymenoptera	Himenoptero		Depredadores
Lepidoptera	Cambridae		Fragmentadores
Collembola	Poduridae		Depredadores
Podocopida	Clase-Ostracoda		Filtradores
Pseudoscorpion	Pseudoscorpion		Depredadores



Lámina 1. Orden Ephemeroptera: a.1, a.2. Ninfa de Baetidae *Americabaetis* (a), b.1, b.2. Ninfa de Baetidae *Americabaetis* (b), c. Ninfa de Baetidae *Callibaetis* (a), d.1, d.2. Ninfa de Baetidae *Callibaetis* (b), e. Ninfa de Baetidae *Baetodes*, f. Ninfa de Caenidae *Caenis*, g. Ninfa de Leptophlebiidae *Choroterpes*, h. Ninfa de Leptophlebiidae *Thraulodes*, i. Ninfa de Leptohyphidae *Tricorythodes*, j. Ninfa de Heptageniidae.



Lámina 2. Orden Trichoptera: **a.** Larva de Hidropsychidae *Leptonema*, **b.** Larva de Glossosomatidae *Culoptila*, **c.1.** Larva de Polycentropodidae *Polycentropus*, **c.2.** Casa de Polycentropodidae *Polycentropus*, **d.1, d.2.** Larva de Hydroptilidae *Leucotrichiini*, **e.1.** Larva de Hydroptilidae *Hydroptila*, **e.2.** Casa de Hydroptilidae *Leucotrichiini*, **f.** Larva de Hydrobiosidae *Atopsyche*, **g.** Larva de Helicopsychidae *Helycopsyche*, **h.1.** Larva de Anomalopsychidae, **h.2.** Casa de Anomalopsychidae, **i.1.** Larva de Calamoceratidae *Phylloicus*, **i.2.** Casa de Calamoceratidae *Phylloicus*, **j.1.** Larva de Leptoceridae *Trianodes*, **j.2.** Larva y casa de Leptoceridae *Trianodes*.



Lámina 3. Orden Diptera: **a.** Larvas de ephyrididae, **b.1.** Larva de simuliidae, **b.2.** Pupa de simuliidae, **b.3.** Adulto de simuliidae, **c.** Larva de Syrphidae, **d.1.** Larva de Empididae, **d.2.** Pupa de Empididae, **e.** Pupa de Culicidae, **f.1.** Larvas de Ceratopogonidae, **f.2.** Pupas de Ceratopogonidae, **g.** Larva de stratiomyidae, **h.** Larva de Psychodidae, **i.** Larva de Psychodidae, **j.** Larva de Orthoclaadiinae, **k.** Larva de Orthoclaadiinae *Cricotopus*, **l.** Larva de Orthoclaadiinae *Corynoneura*, **m.** Larva de Orthoclaadiinae *Onconeura*, **n, ñ, o.** Larvas de Chironominae Chironomini, **p.** Larva de Chironomini *Stenochironomus*, **q.** Larva de tanytarsini *Tanytarsus*, **r.** Larva de Chironominae *Chironomus*, **s.** Larva de Tanypodinae Macropelopiini, **t.** Larva de podonominae, **u.** Larva de Pentaneura Pentaneurini (a), **v.** Larva de Pentaneura Pentaneurini (b).

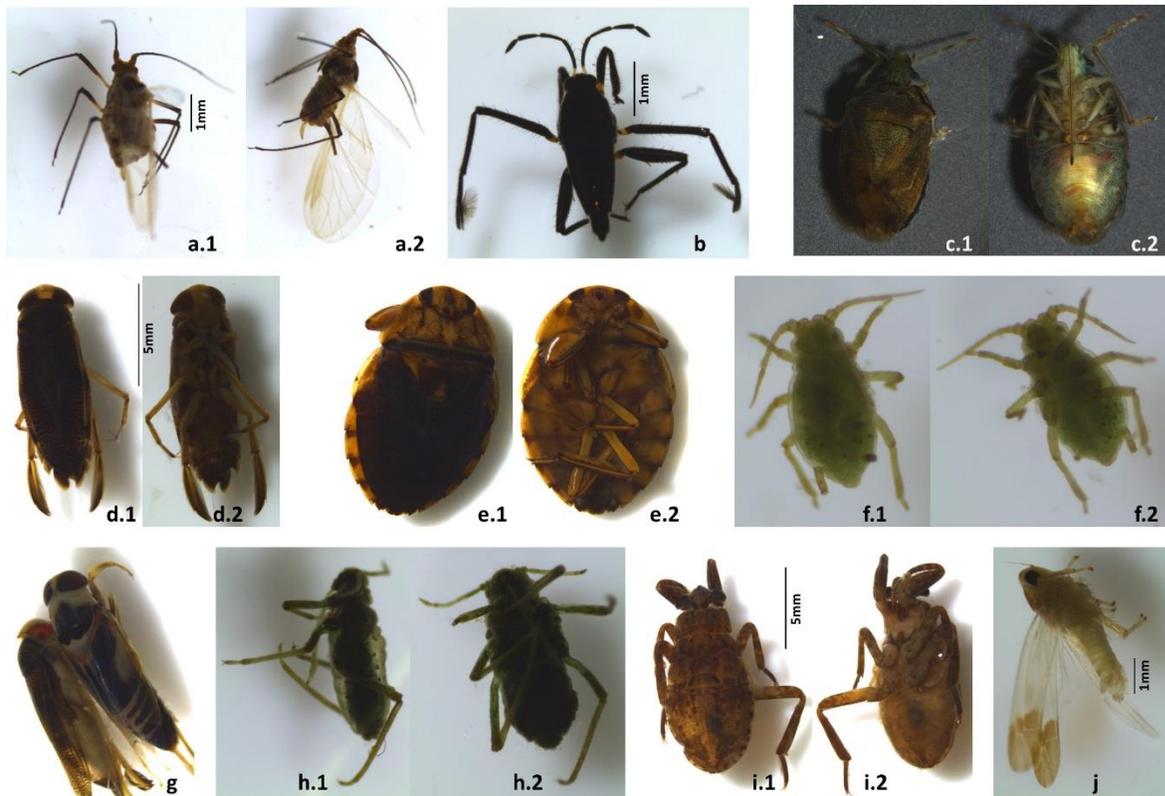


Lámina 4. Orden Hemiptera: a.1, a.2. Adulto de Hemiptero, b. Adulto de Veliidae *Rhagovelia*, c.1, c.2. Adulto de Hebridae, d.1, d.2. Adulto de Corixidae *Corixa*, e.1, e.2. Adulto de Naucoridae, f.1, f.2. Adulto de Aphididae (A), g. Adulto de Notonectidae, h.1, h.2. Adulto de Aphididae (B), i.1, i.2. Adulto de Belostomateidae *Belostoma*, j. Adulto de Cicadellidae.

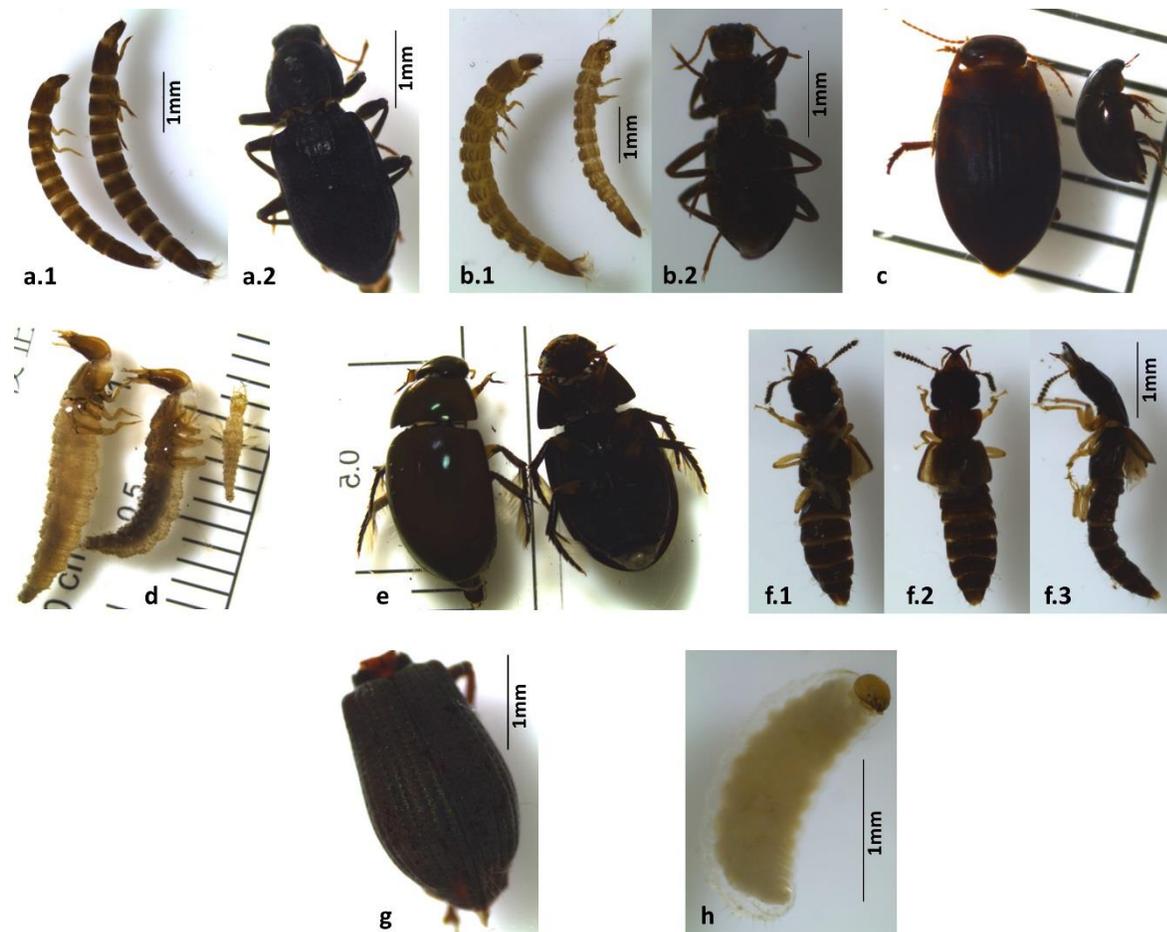


Lámina 5. Orden Coleoptera: **a.1.** Larva de Elmidae *Macrelmis*, **a.2.** Adulto de Elmidae *Macrelmis*, **b.1.** Larva de Elmidae *Heterelmis*, **b.2.** Adulto de Elmidae *Heterelmis*, **c.** Adulto de Dysticidae, **d.** Larva de Hydrophilidae, **e.** Adulto de Staphylinidae, **f.1, f.2, f.3.** Adulto de Staphylinidae, **g.** Adulto de Dryopidae, **h.** Larva de Curculionidae.



Lámina 6. Orden Odonata: **a.** Ninfa de Aeshnidae, **b.1, b.2.** Ninfa de Calopterygidae *Hetaerina*, **c.1, c.2.** Ninfa de Libellulidae *Sympetrum*, **d.1, d.2.** Ninfa de Coenagrionidae, **e.1, e.2.** Ninfa de Coenagrionidae *Argia*.

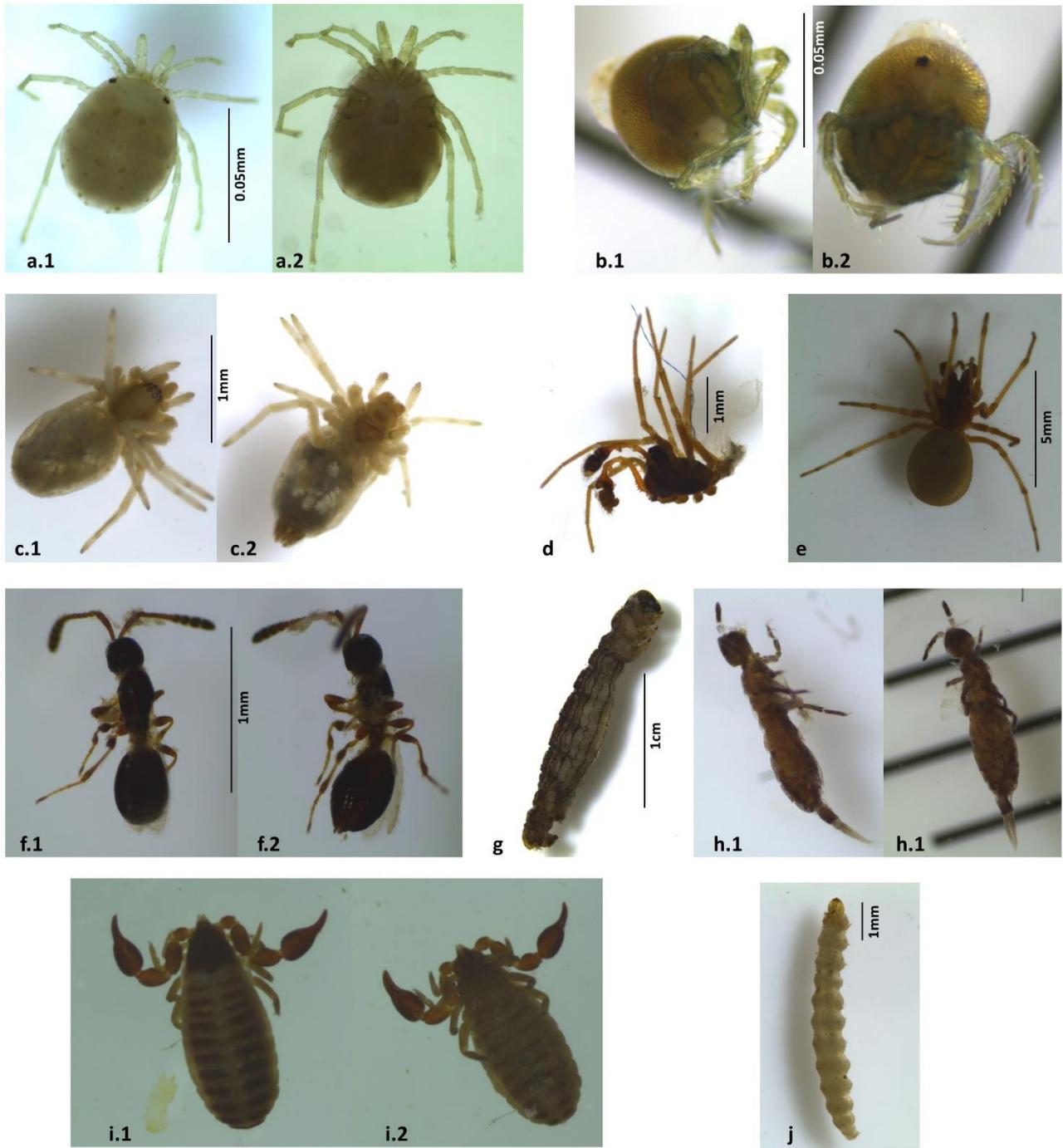


Lámina 7. Trombidiformes, arácnidos y otros insectos: a.1, a.2, b.1, b.2. Adultos de Hydrachnidae, **c.1, c.2, d, e.** Adultos de Arácnidos, **f.1, f.2.** Adulto de Hymenoptera Himenoptero, **g.** Larva de Lepidoptera Crambidae, **h.1, h.2.** Adulto de Collembola Poduridae, **i.1, i.2.** Adulto de Pseudoscorpion, **j.** Larva de Tortricidae.



Lámina 8. Gusanos: a.1, a.2. Lumbriculida Lumbricidae, b. Lumbriculida Lumbriculidae, c. Haplotaxida Tubificidae, d. Organismo de Nematoda, e.1, e.2. Rhynchobdellida Glossiphoniidae, f. Arhynchobdellida Erpobdellidae, g. Seriata Planariidae *Dugesia*, h.1, h.2. Planariidae.



Lámina 9. Moluscos y Crustáceos: a. Mollusca Planorbidae, b. Mollusca Physidae, c.1, c.2. Mollusca Bivalvia, d. Organismo de Podocopida clase-Ostracoda, e. Amphipoda Hyalellidae, f. Isopoda Asellidae, g. Decapoda Palaemonidae.