



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia

## TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN  
CIENCIAS AMBIENTALES

DIATOMEAS COMO INDICADORAS DE LA CALIDAD DEL AGUA  
EN EL ARROYO EL ARENAL, JURQUILLA, QUERÉTARO,  
MÉXICO.

**PRESENTA:**

María de Lourdes Mejía Guevara

**TUTOR PRINCIPAL DE TESIS:**

Dr. Enrique A. Cantoral Uriza

Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación,  
Facultad de Ciencias, Campus UNAM Juriquilla

Morelia, Michoacán 2017.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCES**  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

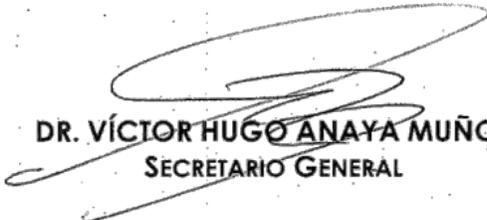
Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 02** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **09 de septiembre del 2015**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el Examen Profesional de la alumna **María de Lourdes Mejía Guevara** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales con número de cuenta **41202325-3**, con la tesis titulada: **"Diatomeas como indicadores de la calidad del agua en el arroyo El Arenal, Juriquilla, Querétaro, México"**, bajo la dirección como **tutor** del Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dra. Ek Del Val De Gortari  
Secretario: Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza  
Vocal: Dra. Cynthia Armendáriz Arnez  
Suplente: Dra. Miriam Guadalupe Bojorge García  
Suplente: Dra. Susana Maza Villalobos Méndez

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a, 25 de mayo del 2017.

  
**DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ**  
SECRETARIO GENERAL

## **AGRADECIMIENTOS**

A la licenciatura en Ciencias Ambientales y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas.

A la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación de la Facultad de Ciencias Juriquilla, que me brindo un espacio y los medios necesarios para la elaboración de mi tesis.

Al apoyo impartido por la UNAM con la beca para ex alumnos de alto rendimiento 2014.

Al Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza por haber sido tan considerado conmigo, lo cual alentó mi interés en el tema e hizo que mi formación nunca fuera un impedimento para poder apropiarme de conocimientos nuevos relacionados con la taxonomía e identificación de diatomeas.

A la Dra. Miriam Bojorge por dedicarme parte de su tiempo para ayudarme durante los muestreos, en el trabajo de laboratorio y en los análisis estadísticos.

A mis sinodales las doctoras: Ek del Val, Susana Maza y Cynthia Armendáriz por su apoyo durante la revisión de mi tesis.

A los profesores de la Licenciatura en Ciencias Ambientales y del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

A la pasante en Biología Laura Rodríguez por ayudarme durante los muestreos y al Biólogo Samuel Rico por explicarme un poco sobre la identificación, el uso de los manuales y también permitirme conocer un poco más de los humedales.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad que me ha dado para continuar con mis estudios y permitirme en incontables ocasiones formarme académica y personalmente

A las personas que trabajan en servicios escolares que me brindaron su apoyo durante los trámites.

## **AGRADECIMIENTOS A TITULO PERSONAL**

A mi familia por su paciencia por alentarme a continuar hasta alcanzar mis metas.

A Sara y Vera por estar conmigo siempre.

A Olivia por recordarme que el esfuerzo y la determinación son claves para alcanzar cualquier objetivo.

A Mine le agradezco tanto por recordarme que no hay obstáculos más grandes que nuestros sueños. .

A Ana Griselda, José y David que siempre están conmigo sin importar que estemos lejos.

A Andrea, Sochil y Rodrigo su amistad y por los momentos que hemos compartido.

A Yadis, Moni, Cecy, Anahí, Nadia y Ani por haber compartido conmigo tantas experiencias y momentos divertidos a lo largo de la carrera.

A Doris Arlette y Reynaldo a quienes les tengo mucho cariño y de verdad aprecio mucho los momentos que compartimos juntos.

A Luis, Marco, Saulo, Donovan, Piña y Néstor les agradezco el haber compartido conmigo tantos momentos divertidos y a pesar de mi carácter nuestras diferencias no eran impedimento para compartir el mismo gusto que tenemos por nuestra carrera.

Al resto de mis compañeras a las que les agradezco los pequeños momentos donde compartieron conmigo otra manera de ver al mundo.

## ÍNDICE

Resumen .....	8
Abstract .....	10
INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 La microcuenca como un reflejo de la condición ecológica de los ríos y arroyos .....	13
1.2 La microcuenca de Santa Rosa Jáuregui, Querétaro .....	14
1.3 Normatividad de la calidad del agua en México .....	18
1.4 Generalidades e importancia de las diatomeas .....	20
1.5 Diatomeas como indicadores biológicos de la calidad del agua .....	24
1.6 Estudios relacionados con el uso de diatomeas como indicadores biológicos de la calidad del agua en México .....	26
Hipótesis.....	28
Objetivos .....	28
1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	29
2 METODOLOGÍA.....	32
Trabajo de Campo.....	32
Trabajo de laboratorio .....	33
Análisis de datos .....	35
3 RESULTADOS .....	37
3.1 Descripción de los sitios de muestreo .....	37
3.2 Parámetros fisicoquímicos de los sitios de muestreo .....	39
3.3 Resultados del análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos y biológicos .....	41
3.4 Diatomeas: riqueza y abundancia relativa e índices de diversidad entre sitios.....	47

4	DISCUSIÓN.....	49
5	CONCLUSIONES.....	54
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
7	ANEXOS.....	64
	Listado de figuras.....	64
	Listado de tablas.....	65
	Láminas de diatomeas.....	70

## Resumen

Los ecosistemas acuáticos en particular los ambientes lóticos (con flujo unidireccional) han sido de los más manejados por el hombre, ocasionando que sean parte de los ecosistemas más degradados del planeta debido al uso irracional de sus recursos, las modificaciones en su estructura y la contaminación de sus aguas por aportes directos e indirectos. Estimar la biodiversidad (a nivel genético, funcional, o de comunidades) es de gran ayuda para generar conocimiento sobre la integridad biótica y la calidad ambiental de los sistemas acuáticos.

Dentro de los sistemas lóticos el grupo algal de mayor dominancia son las diatomeas, las cuales se caracterizan por ser algas unicelulares microscópicas que realizan fotosíntesis, presentan clorofila *a* y *c* y pigmentos accesorios como  $\beta$ -carotenos, fucoxantina, diadinoxantina y diatoxantina. Las diatomeas poseen una pared celular de sílice llamado frústulo, el cual está compuesto por una epivalva (epiteca) y una hipovalva (hipoteca) superpuestas.

Las diatomeas se encuentran distribuidas ampliamente en los ecosistemas acuáticos siendo las principales responsables de ingresar energía a éstos. En particular en los ambientes lóticos, las diatomeas junto con otros grupos algales son los productores primarios de mayor importancia, ya que mediante la fotosíntesis transforman la energía lumínica en energía química. Asimismo, ayudan a mantener el equilibrio acuático al regular la disponibilidad de nutrientes. La mayor parte de las poblaciones que conforman las especies tienen afinidades ecológicas muy particulares y sensibles, por lo que pueden ser utilizadas como bioindicadoras.

En México el estudio de la distribución taxonómica de comunidades algales en hábitats continentales (como los ríos, lagunas y arroyos) aún es escaso. El presente trabajo tiene como objetivo conocer la calidad ambiental del arroyo El Arenal, que se encuentra en la región central del país y tiene como característica ser un ambiente lótico manejado por el hombre. Se realizaron dos muestreos en tres sitios a lo largo del arroyo durante dos épocas contrastantes del año, se midieron los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua, se recolectaron muestras para identificar y caracterizar a las especies predominantes de comunidades de diatomeas. Posteriormente se realizó un análisis para conocer las variaciones dentro de estas comunidades en

relación con los cambios de los parámetros analizados durante las dos temporadas y caracterizar el estado del arroyo.

Los sitios de muestreo fueron clasificados de acuerdo a su estado de conservación: sitio conservado, sitio moderadamente perturbado y sitio altamente perturbado. El sitio conservado también se conoce como sitio de referencia, este sitio permite comparar las características fisicoquímicas del agua y de las comunidades de diatomeas con los sitios que presentan mayor perturbación.

En total se reconocieron 52 especies de diatomeas, pertenecientes a 13 géneros y 11 familias. En el sitio conservado el género más abundante fue *Epithemia*, mientras que en el sitio moderadamente perturbado fue *Nitzschia* y en el sitio altamente perturbado fue *Gomphonema*. El sitio conservado fue el sitio con mayor riqueza de especies.

El arroyo el Arenal mostró diversos grados de degradación a lo largo de su cauce, los cambios en sus características fisicoquímicas se vieron reflejados en la disminución de la riqueza de especies, el uso de diatomeas permitió reconocer esos cambios.

**Palabras clave:** Ecosistemas acuáticos, indicadores ambientales, diatomeas, biodiversidad, ambiente lótico.

## **Abstract**

Aquatic ecosystems in particular lotic environments have been the most handled by man, who has become one of the most degraded ecosystems on the planet due to the irrational use of their resources, changes in their structure and pollution of their waters by direct and indirect contributions. Estimating biodiversity (at a genetic, functional, or community level) in this kind of ecosystem is of great help to generate knowledge about biotic integrity and the environmental quality of aquatic systems.

Within the lotic systems the most dominant algal group are diatoms, which are characterized by being unicellular microscopic algae that perform photosynthesis, present chlorophyll a and c and accessory pigments such as  $\beta$ -carotenes, fucoxanthin, diadinoxanthine and diatoxanthin. This group of algae is characterized by having a silica cell wall called frustulum, which is composed of two parts, one is the epitheca that overlaps the other (hypotheca).

Diatoms are widely distributed in aquatic ecosystems, being one of the main responsible of income energy into them. In particular in the lotic environments, diatoms along with other algal groups are the primary producers of greater importance, through photosynthesis transform the light energy into chemical energy. Likewise they are each responsible for maintaining the balance of the system to regulate the availability of nutrients. Most of the species have very specific ecological affinities and can be used as bioindicators.

In Mexico the study of the taxonomic distribution of algal communities in continental habitats (such as rivers, lagoons and streams) is still scarce. This paper aims to determine environmental quality of the El Arenal stream, located in the central region of the country, which is characterized by being a lotic environment (unidirectional flow) handled by man.

Two samplings were conducted at three sites along the stream during two contrasting seasons of the year to measure physical and chemical parameters of water quality and samples were collected to identify the predominant species of diatom communities. Later analysis was

performed to know the variations within these communities in relation to the changes of the parameters analyzed during the two seasons and to characterize the state of the stream.

The sampling sites were classified according to their state of conservation: site conserved, site moderately disturbed and site highly disturbed. The conserved site is also known as a reference site, this site allows comparing the physicochemical characteristics of water and diatom communities with the sites that present some disturbance.

A total of 52 species were recognized, belonging to 13 genera and 11 families. In the conserved site the most abundant genus was *Epithemia*, while in the moderately disturbed site was *Nitzschia* and in the highly disturbed site was *Gomphonema*. The conserved site was the site with the highest species richness. The Arenal stream showed different degrees of degradation along its course, changes in its physicochemical characteristics were reflected in the decrease of species richness, the use of diatoms allowed to recognize these changes.

**Key words:** Aquatic ecosystems, environmental indicators, diatoms, biodiversity, lotic environment.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas epicontinentales hacen alusión a los cuerpos de agua que se distribuyen en los continentes y dentro de los cuales se generan ambientes propicios para el desarrollo de los ecosistemas acuáticos. Dichos ecosistemas realizan un papel importante dentro de los ciclos biogeoquímicos del planeta, afectan la composición de la atmósfera, el clima y los ciclos hidrológicos que mantienen a los ecosistemas terrestres y humedales. Por el contrario el clima determina muchas de las características críticas de los ecosistemas acuáticos, por ejemplo: puede definir la temperatura de la cual depende la sobrevivencia de ciertas especies y comunidades, controlando las tasas de meteorización química y evaporación que determinan las concentraciones químicas de ciertos elementos (Schindler, 1997).

Se conocen dos tipos de ecosistemas acuáticos; los lóticos que abarcan a los cuerpos de agua con corrientes que fluyen (como es el caso de los arroyos y ríos) y los lénticos, que son sistemas de agua estancada que pueden ser naturales o artificiales (como los lagos y las presas) y usualmente suelen ser almacenes de agua (Arriaga *et al.*, 2000).

Los ríos son cuerpos de agua que desembocan en otras corrientes o en el mar, mientras que los arroyos son torrentes variables de agua, pueden ser estacionales o permanentes con un volumen de agua menor que los ríos. Suelen circular sobre cauces rocosos y normalmente contienen aguas frías, saturadas de oxígeno (Lynn, 1988).

En México las aguas corrientes se han visto impactadas negativamente por actividades antropogénicas, por lo tanto, es difícil encontrar arroyos y ríos prístinos en la actualidad. En 1998, la red de medición de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales informó que 75% de los ríos y arroyos del país presentan algún grado de contaminación (CNA/SEMARNAP, 1999). Los impactos más comunes en estos ambientes son la alteración de su forma física, cambios en la descarga de agua y la introducción de materia orgánica junto con la presencia de sustancias químicas (Lindegaard, 1995).

A pesar de los beneficios que generan los ecosistemas acuáticos, éstos se encuentran desvalorizados debido a que se ha subestimado su importancia y la urgencia de revertir los daños que les ha causado la exigencia de agua limpia y la incongruencia existente entre su uso y desecho, sin reconocer que somos responsables de la alteración de la recarga y depuración natural. Además del desconocimiento existente en torno a la diversidad biológica y a las funciones de estos ecosistemas, existe un desinterés y desconocimiento en torno a las comunidades de algas microscópicas, de protozoarios y de otros organismos acuáticos, cuyas abundancias relativas y fluctuaciones a través del tiempo pueden tener efectos sumamente importantes en las condiciones del medio acuático. Un conocimiento más profundo acerca de estos ecosistemas, de su diversidad, su estado de conservación y restauración, permiten desarrollar herramientas fundamentales para las personas que tienen a su cuidado ecosistemas acuáticos, tanto en los diferentes niveles de gobierno (a nivel federal, estatal o municipal), como en organizaciones de la sociedad civil, en universidades y en otras instancias (Pérez *et al.*, 2007).

### **1.1 La microcuenca como un reflejo de la condición ecológica de los ríos y arroyos**

Una microcuenca desde una perspectiva integral se compone de aspectos socioambientales, funcionales y fisiográficos, por lo tanto, se puede definir como una pequeña cuenca de primer orden con un límite físico denominado parteaguas, donde habita una comunidad humana que utiliza y maneja los recursos del área, como la vegetación, la fauna, el suelo y el agua (Wambeke, 2003).

La integridad funcional de la microcuenca depende en gran medida de la interrelación que existe entre los factores que la componen, bajo esta perspectiva la condición ecológica de los ríos y arroyos refleja muchos de los procesos que alteran dicha integridad funcional (Pérez *et al.*, s.f.).

Los impactos más comunes sobre los ríos y arroyos se pueden dividir en tres categorías: la modificación de sus características físicas (cambios en sus cauces), cambios en las descargas de agua (entrada de aguas negras) y la introducción de materia orgánica y sustancias químicas (contaminación por desechos orgánicos y químicos) (Lindergaard, 1995). En conjunto estos impactos han deteriorado a nivel global la calidad ambiental de estos ecosistemas.

La importancia del mantenimiento de los ríos y arroyos reside en que son los ambientes donde se desarrollan los sistemas de ribera o sistemas riparios. Los sistemas de ribera son aquellos que se desarrollan a lo largo de las corrientes de agua permanentes o temporales, son muy importantes debido a que los árboles y arbustos proveen un hábitat a múltiples especies de plantas y animales, previenen la erosión, controlan los azolves, las inundaciones y la calidad del agua, regulan la producción primaria, la temperatura y la infiltración de la luz (Anderson *et al.*, 1978). Los sistemas riparios son considerados como sistemas muy frágiles y altamente vulnerables al exceso de nutrientes o elementos ajenos al sistema (Quiroz y Rodríguez, 2006). Asimismo forman parte de las redes hidrológicas que drenan el agua en las cuencas de manera natural desde los bosques hasta los cuerpos de agua como los grandes ríos, lagos, lagunas e inclusive presas, y reciben el agua fluvial por lo que su degradación puede causar inundaciones e incluso pueden convertirse en fuentes de enfermedades (Gómez, 2012).

## **1.2 La microcuenca de Santa Rosa Jáuregui, Querétaro**

Dentro del municipio de Querétaro existen 39 microcuencas delimitadas en base al Programa Nacional de Microcuencas de 2007, publicado por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). Estas unidades están localizadas en la región hidrológica 12 (RH-12) denominada Lerma-Santiago y en lo que se conoce como cuenca hidrológica del Río Laja.

De las microcuencas anteriormente mencionadas que corresponden al Municipio de Querétaro, nueve comparten el parteaguas con el límite municipal y se localizan en el

estado de Guanajuato, mientras que cuatro de ellas se encuentran en la misma condición, y se encuentran en municipios cercanos al estado de Querétaro. Son ocho las microcuencas que comparten su superficie con el estado de Guanajuato, mientras que las correspondientes de los municipios de Querétaro son seis. Las microcuencas que se encuentran en el municipio de Querétaro son 12 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Microcuencas en el municipio de Querétaro (FIRCO, 2007).

Microcuenca	Superficie (Ha)
Buena vista	12 778.41
Col. Rancho Menchaca	3 722.55
Colinas de Santa Cruz	2 122.59
La Estacada	2 490.43
La Gotera	4 989.97
El Nabo	2 628.29
Potrero	1 228.88
San José el Alto	7 568.30
Santa María del Zapote	4 453.54
Santa Rosa Jáuregui	10 136.01
Santiago de Querétaro	7 784.45
Tlacote El Bajo	3 696.42

Dentro del plan maestro pluvial de la zona Metropolitana de Querétaro, se menciona que existen 59 microcuencas, de las cuales 29 corresponden a microcuencas rurales y 30 a urbanas (Plan Maestro Pluvial 2008-2025).

La zona de estudio del presente trabajo se ubica en los límites de la microcuenca de Santa Rosa Jáuregui, una microcuenca de tipo exorreica con una extensión de 10,136.01 hectáreas que se ubica al norte de la Zona Metropolitana de Querétaro, que ha sufrido diversos cambios de uso de suelo, debido a la construcción de desarrollos urbanos en el área (Plan Rector de Producción y de Conservación de la microcuenca Santa Rosa Jáuregui, 2004).

Es importante mencionar que la microcuenca de Santa Rosa Jáuregui, la segunda más grande por su extensión, es una de las microcuencas que capta y genera

escurrimientos hacia las zonas más pobladas de Querétaro, por lo que es de vital importancia el buen uso y conservación de sus recursos naturales. Sin embargo, es visible que ha perdido gran parte de su cobertura vegetal (casi el 40% durante los últimos 30 años (González *et al.*, 2008) lo cual no sólo genera una problemática ambiental dentro de la microcuenca, causada por la pérdida de cobertura vegetal, sino que también disminuye el amortiguamiento de la precipitación provocando un menor control de inundaciones y un aumento de la erosión en las vertientes dentro de la microcuenca (Sánchez *et al.*, 2003).

El sitio de estudio conocido como el arroyo “El Arenal”, es uno de los escurrimientos generados por la presa Dolores que se encuentra en la parte media de la microcuenca de Santa Rosa Jáuregui (Miranda, 2007). El cauce principal de esta cuenca es intermitente, mientras que el resto de las corrientes son de carácter efímero (solo llevan agua cuando llueve), el cauce del arroyo continúa hasta llegar a la presa “El Cajón” también conocida como presa “Juriquilla” (esta presa tiene un régimen de propiedad particular que se destina a actividades recreativas como el golf del desarrollo residencial de la zona de Juriquilla y Jurica), el agua que escurre de esta presa forma nuevamente el cauce del arroyo hacia la zona residencial y el pueblo de Jurica y posteriormente a un costado del arroyo se pueden observar zonas de cultivo, hasta encontrarse nuevamente con otras colonias como Prados de Loma Bonita, Loma Bonita y Satélite hasta llegar a la zona industrial Benito Juárez, donde el cauce del arroyo se conoce como dren el Arenal que atraviesa diversas colonias hasta encontrarse con el río Querétaro.

El arroyo suele captar el agua pluvial durante los meses de marzo hasta octubre que corresponden a la temporada de lluvias (CONCYTEQ, 2012). Es importante mencionar que la calidad del agua del “dren arroyo El Arenal” y el “Río Querétaro” de acuerdo con el Centro de Estudios Académicos sobre la Contaminación Ambiental de la Facultad de Química (CEACA) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), son los puntos donde el agua está altamente contaminada (Perspectivas del medio ambiente urbano: GEO Zona Metropolitana Querétaro, 2008)

Este tipo de problemas surgen por la falta de conocimiento ambiental de la importancia de las redes hidrológicas y de los ecosistemas de ribera desde su papel ecológico, así como los beneficios económicos que pueden aportar a la sociedad, y por ello este tipo de estructuras no se cuidan o se manejan para otros fines (Gómez, 2012). Con base en lo anterior es importante generar mayor información sobre el estado de conservación del arroyo “El Arenal”, debido a que hay una estrecha relación entre la red hidrológica y la calidad del agua para la ciudad.



**Figura 1.** Red de drenaje pluvial existente hasta el año 2008 (Fuente: Plan maestro pluvial de la zona metropolitana de Querétaro).

En México la mayoría de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación y se conoce poco sobre la flora de diatomeas existentes en estos cuerpos de agua (Novelo y Tavera, 2011), mientras mejor conozcamos la flora de diatomeas se podrán diseñar programas de conservación realistas, así como planes productivos o de

impacto económico directo y por lo tanto se podrán manejar mejor los cuerpos de agua. Por ejemplo, en Alemania al tener floras algales bien documentadas se pudo manejar la eutrofización en un lago mediante la manipulación y control en la composición de las comunidades acuáticas, lo cual condujo a una disminución drástica de la carga de nutrientes (Koschelet *al.*, 1993).

### **1.3 Normatividad de la calidad del agua en México**

En México la constitución mexicana menciona en su artículo 27 que la propiedad de la tierra y de las aguas comprendidas en los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la nación. Las personas que pueden adquirir el dominio de las tierras y de las aguas se regirán de acuerdo a ciertas prescripciones.

En el título 5 De los estados de la federación y del Distrito Federal. Artículo 115 inciso tercero Menciona que los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: A) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales.

La Ley de Aguas Nacionales publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1° de Diciembre de 1992 es reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales, tiene por objetivo regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo sustentable.

En el artículo 5 de la Ley General del Equilibrio Ecológico (LEEGEPA) menciona que es facultad de la federación en su inciso XI. La regulación del aprovechamiento sustentable, la protección y preservación de las aguas nacionales, la biodiversidad, la fauna entre otros recursos de su competencia.

Dentro de la LEEGEPa en el capítulo tercero: Prevención y control del agua y de los ecosistemas acuáticos en el artículo 117 se mencionan los criterios a considerar para la prevención y control de la contaminación del agua. En el artículo 118 se menciona que dichos criterios serán considerados en:

I. Expedición de normas oficiales mexicanas para el uso tratamiento y disposición de aguas residuales para evitar riesgos y daños a la salud pública.

II. La formulación de las normas oficiales mexicanas que deberá satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados aguas nacionales.

Artículo 119. La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que se requieran para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales, conforme a lo dispuesto en esta Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones que resulten aplicables.

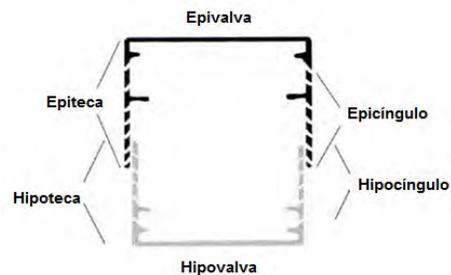
Artículo 120. Regula a nivel federal o local diversos tipos de descargas.

Artículo 121. Menciona que se requiere permiso previo para la descarga de aguas residuales que contienen contaminantes.

Las normas oficiales existentes que se usan para regular los contaminantes contenidos en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, es la NOM-001-SEMARNAT-1996. La NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público y tiene como objetivo proteger el medio ambiente y la salud de la población.

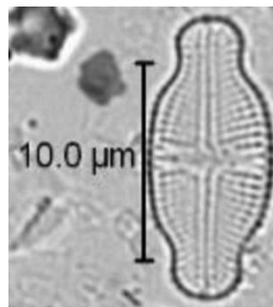
## 1.4 Generalidades e importancia de las diatomeas

Las diatomeas son un grupo de algas unicelulares autótrofas pertenecientes a la clase Bacillariophyceae. Dentro de los sistemas lóuticos el grupo algal de mayor dominancia son las diatomeas, las cuales se caracterizan por ser algas unicelulares microscópicas fotosintéticas con clorofila *a* y *c* y pigmentos accesorios como  $\beta$ -carotenos, fucoxantina, diadinoxantina y diatoxantina. Estas se caracterizan por poseer una pared celular de sílice llamado frústulo compuesto por una epivalva (epiteca) y una hipovalva (hipoteca) (Figura 2); que son dos mitades que encajan una con otra como si fueran una caja, siendo la epiteca la de mayor tamaño y la hipoteca la de menor (Raven *et al.*, 1992). La forma, tamaño y ornamentación del frústulo es utilizado para la identificación taxonómica de este grupo, lo que facilita en la mayoría de los casos la identificación a nivel de especie.



**Figura 2.** Estructura del frústulo (Fuente: Graham y Wilcox, 2000).

En cuanto a su tamaño, las diatomeas suelen medir algunos micrones de diámetro o de largo y llegan a ser más pequeñas que la célula de un mamífero (Figura 3), pero son más grandes que una bacteria (Menéndez, 2011).



**Figura 3.** *Diatomea Luticola ventricosa* (Fuente: The Academy of Natural Sciences in Philadelphia).

Existen dos tipos de hábitats principales para las diatomeas: las superficies húmedas o sumergidas donde viven adheridas (bentónicos) y las aguas abiertas donde viven flotando (planctónicos) (Round *et al.*, 1990). Tanto en los ambientes marinos como en los dulceacuícolas integran al fitoplancton que es la fuente de alimento de los animales acuáticos e incluso pueden encontrarse en estanques hipersalinos o en aguas menos salobres (Curtis y Schnek, 2006).

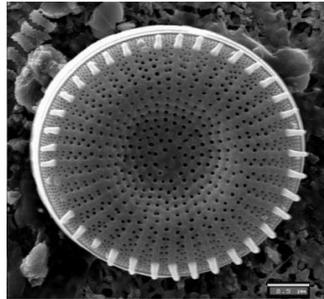
Hasta el momento se han descrito en el mundo alrededor de 12,000 especies de diatomeas marinas y de aguas dulces continentales, las cuales pertenecen a más de 250 géneros. Incluso algunos afirman que pueden existir cerca de 100,000 especies de diatomeas en el mundo (Van Den Hoek *et al.*, 1995).

El ciclo de vida de una diatomea comprende dos fases: una fase en estado vegetativo que puede durar meses o años, donde cada célula hija retiene una de las valvas paternas produciendo otra valva nueva por mitosis y una fase más corta, que incluye una reproducción sexual (gametogénesis o fertilización, que puede durar unas horas) o por un proceso complejo de desenvolvimiento que genera una nueva célula vegetativa que puede tomar días o semanas (Chepurnov *et al.*, 2004).

Existen dos grupos de diatomeas basadas en la morfología de su pared de sílice, las que tienen simetría radial, diatomeas Centrales y las que tienen simetría bilateral, diatomeas Pennales o Penadas (forma de navecilla o aguja) (Raven y Johnson, 2002). De acuerdo con una descripción (Des Abbayes *et al.*, 1989) las diatomeas tienen las siguientes características:

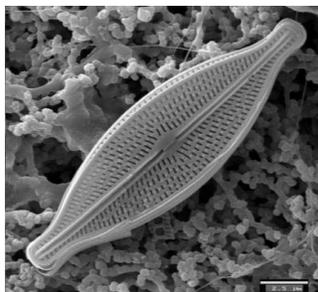
Las centrales están desprovistas de rafe (el rafe es una estructura central que puede ser recta, ondulada o sigmoide y provee movilidad a algunas especies de diatomeas con simetría bilateral) por lo tanto este tipo de diatomeas se encuentran inmóviles (Figura 4). La reproducción sexual es oogama. Algunos órdenes que se encuentran dentro de esta

clase son (en letra negra) y sus géneros más representativos son (en cursivas): **Coscinodiscales** (*Coscinodiscus*, *Cyclotella*, *Thalassorira*); **Rizosolemiales** (*Rhizosolenia*) y **Biddulphiales** (*Biddulphia*, *Chaetoceros*, *Bacteriastrum*).



**Figura 4.** *Stephanodiscus minustulus*, ejemplo de diatomea central (Fuente: Júcar y Alcober Bosch, 2015).

Las Pennales suelen estar provistas de un rafe; son células vegetativas a menudo móviles. Su reproducción es sexual por cistogamia o anisogamia. Son muy abundantes en las aguas dulces y marinas, sobre todo de formas bentónicas. Algunos órdenes dentro de esta clase son: **Diatomales** (diatomeas arráfidas que no tienen rafe): *Asterionella*, *Licmophora*; **Eunotiales** (diatomeas braquirráfidas que tienen rafes cortos) *Eunotia*; **Achnanthes** (diatomeas monorráfidas que poseen un rafe en una sola valva): *Achnanthes*, *Cocconeis*; **Naviculales** (diatomeas birráfidas que tienen un rafe en cada valva): *Navicula*, *Pinnularia*, *Pleurosigma*, *Nitzschiella*, *Cymbella* y *Surirella* (Figura 5).



**Figura 5.** *Brachysira vitrea*, ejemplo de diatomea pinnada (Fuente MARM y Alcober, 2015).

Es importante mencionar que las diatomeas también son un recurso natural muy importante, pues debido a su composición y sus características han sido empleadas por el ser humano para diversos fines. Un ejemplo de ello es la tierra fósil de diatomeas o diatomita que ha sido extraída y procesada para fabricar filtros para agua destinada al consumo humano como sucedió después de la segunda guerra mundial, donde se empezaron a fabricar filtros con este material para eliminar los quistes de *Entamoeba histolytica*, amiba que ocasionaban la disentería amebiana. De igual forma estos filtros se han empleado en las industrias y en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Weber, 1979). La diatomita también ha sido empleada como ingrediente inactivo dentro de los plaguicidas que se aplican como polvos, e incluso como coagulante para disminuir los sólidos suspendidos dentro de las aguas residuales en las plantas de tratamiento (Mata, 2005).

Las diatomeas son una alternativa para la producción de biocombustibles debido a su eficiencia fotosintética, gracias a que son más eficaces en la asimilación de CO<sub>2</sub> y otros nutrientes y pueden lograr acumular entre 20 y 80% de triglicéridos (Chisti, 2011). En otros campos como la nanotecnología, se han estudiado para modificarlas genéticamente y extraer sus componentes orgánicos con el fin de obtener células puras de silicio para emplearlas dentro de los paneles solares y aumentar la eficiencia de los mismos, incluso también se espera que puedan ser utilizadas en un futuro para crear nano cápsulas para suministrar medicamentos, crear redes de difracción en aparatos ópticos, entre otras aplicaciones (Takeuchi, 2010). Algunos investigadores ya están utilizando frústulas de óxido de titanio nano poroso dentro de sensores de gases (Menéndez, 2011).

De entre todas sus aplicaciones una de las más importantes para este trabajo es su uso como indicador biológico de la calidad del agua.

## 1.5 Diatomeas como indicadores biológicos de la calidad del agua

Existen dos tipos de aproximaciones para el estudio de la calidad del agua, uno de ellos es la medición de las variables físicas y químicas que proporcionan un panorama de la calidad del agua de un sistema lótico en un tiempo determinado, la segunda aproximación se trata del uso de métodos biológicos (biomonitoreo) que proveen información de la integridad ecológica observando cómo responde la biota a los cambios que ocurren dentro de los ecosistemas (Bere y Tundisi, 2010). Los cambios químicos, físicos y biológicos en los ecosistemas acuáticos se ven reflejados en daños sobre la condición y funcionamiento de las comunidades biológicas (Gibson *et al.*, 1996).

Uno de los indicadores de la salud del ecosistema es el estado y variedad de la biota que lo conforma, por lo tanto, su estudio puede proveer información de los cambios que se están llevando a cabo y que modifican el ecosistema. Por ejemplo: el cambio que puede producirse por la invasión de especies exóticas en el hábitat común de la biota nativa. Este tipo de cambios no se pueden medir sólo a través de los análisis químicos (Cairns y Pratt, 1992; Dixit *et al.*, 1992; Loeb, 1994; Lowe y Pan 1996).

Existen otras metodologías que implican el uso de ciertas especies como indicadores biológicos con diferentes enfoques de estudio para la evaluación de la calidad del agua (Lobo, 1995). Se conocen como especies indicadoras a aquella (o una asociación de especies) que presentan requerimientos específicos para un conjunto de variables físicas y químicas, de forma tal que los cambios en su presencia/ausencia, número, morfología, fisiología o comportamiento indicarán que las condiciones actuales y químicas se encuentran fuera del límite de tolerancia de la especie (Johnson *et al.*, 1993).

La biota elegida como indicador biológico en ambientes acuáticos debe estar ampliamente distribuida a lo largo del cuerpo de agua o tener un alto grado de universalidad en cuanto a su distribución (Round, 1991), ser fácil su identificación taxonómica y responder de manera rápida a los cambios del ambiente (López y Siqueiros,

2011). Las diatomeas por tener esta característica, han sido ampliamente usadas para el biomonitoreo de la calidad del agua en diversas partes del mundo. En los ríos en países Europeos (Kolkwitz y Marsson, 1909) lograron crear un sistema de clasificación para caracterizar la contaminación orgánica en corrientes y ríos basada en los patrones de distribución de las comunidades de diatomeas bentónicas. Prygiel y Coste, (1993) mostraron que las diatomeas pueden ofrecer información sobre la contaminación orgánica dentro de los ríos de la cuenca Artoise-Picardie en Francia.

Las diatomeas han sido uno de los grupos de biota ampliamente estudiados, basándose en su tolerancia individual y sus preferencias a ciertas condiciones ambientales a nivel de especie. Cairns y Pratt (1992) hicieron un estudio comparando la riqueza de especies con el número de individuos por especie en un sitio prístino y uno impactado dentro de un sistema acuático. Observaron que en el primer sitio la riqueza de especies puede ser alta comparada con el sitio impactado.

De igual forma se ha estudiado la relación de otras variables ambientales (por ejemplo: pH, salinidad y nutrientes) con el desarrollo de ciertas asociaciones de diatomeas. El uso de diatomeas como indicadores de pH ha sido utilizado en diversos estudios paleolimnológicos para estudiar la acidificación de los lagos en ciertos periodos de tiempo (Battarbee, 1984) y también para indicar la acidez dentro de las aguas corrientes en Alemania (Coring, 1996).

En la actualidad existen una serie de índices que permiten establecer una correlación entre la composición taxonómica de especies, la densidad algal y la calidad del agua en el sistema (Palmer, 1969). Por ejemplo en los años setenta se comenzaron a utilizar en Bélgica las diatomeas bentónicas como indicadores de la calidad del agua, en 1979 Descy propuso un método para medir el grado de contaminación en el río Meuse basado en 49 taxones de diatomeas y en el análisis de los componentes principales. Este índice se amplió y modificó en base a estudios de campo en 1990 y se intentó crear un estándar europeo (índice CEE) que pudiera ser empleado en la mayor parte de los ríos de

Europa (Descy y Coste, 1990). Hay que resaltar que en el resto del mundo se trabaja en paralelo probando otros índices de diatomeas (Schoeman, 1976; Mc Cormick y Cairns, 1994; Pan *et al.*, 1996).

De acuerdo a Gomà *et al.* (2002) la información que se tiene actualmente sobre las diatomeas de agua dulce es bastante extensa desde el punto de vista ecológico y taxonómico. Son muchos los trabajos realizados con diatomeas por toda Europa (Leclercq y Maquet, 1978; Lange-Bertalot, 1979; Steinberg y Schiefele, 1988; Lafont *et al.*, 1988; Lecointe *et al.*, 1993; Prygel, 1994; Van Dam *et al.*, 1994; Kelly y Whitton, 1995; Kelly *et al.* 1995, 1998; Lenoir y Coste, 1996; Pryegelet *al.* 1996; Coring, 1997; Kwadranset *al.*, 1997; Dell'Uomo, 1997; Eloranta y Andersson, 1998; Van de Vijver y Beyens, 1998), que han permitido que exista una veintena de métodos para analizar la calidad biológica del agua basados en diatomeas bentónicas.

#### **1.6 Estudios relacionados con el uso de diatomeas como indicadores biológicos de la calidad del agua en México**

El uso de microorganismos en el monitoreo de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos continentales en nuestro país y el conocimiento en general del uso de diatomeas, aún es escaso, más aún en aguas continentales debido a que para caracterizar o monitorear las condiciones ambientales se ha centrado la atención en el monitoreo de macro organismos en comparación a los microorganismos (Novelo y Tavera, 2011). Las diatomeas se caracterizan por ser uno de los grupos fotosintetizadores microscópicos determinantes en ambientes continentales. Aparecen de forma visible como manchones regularmente extensos de color pardo verdoso en lugares que guardan cierta humedad como las rocas y lodos (López y Siqueiros, 2011).

En México se han realizado algunos trabajos en aguas superficiales relacionados con el uso de diatomeas como indicadores y han aportado al conocimiento de la taxonomía de diatomeas.

En el centro del país Segura *et al.* (2012) realizaron un estudio taxonómico y ecológico de diatomeas epilíticas en la cuenca del Río Lerma para proponer un índice diatomológico para el río. Se reconocieron las especies dominantes en los sitios de estudio y se recurrió a explicar la distribución de las diatomeas en relación con las variaciones de parámetros como profundidad, conductividad, pH, temperatura y sólidos disueltos totales.

**Tabla 2.** Resumen de estudios relacionados con diatomeas en México.

Autores	Sitio de estudio	Riqueza de especies
Bojorge y Cantoral, 2007	Río Magdalena, Cd., de México.	Se registraron 31 especies de diatomeas, de las cuales siete son nuevos registros para la región
López y Siqueiros, 2011	Oasis Baja California	Se identificaron 283 especies
Segura et al. 2012	Cuenca del Río Lerma	Se reconocieron 178 especies, de las cuales 112 taxones (63 %) fueron de amplia distribución.
Siqueiros et al., 2013	Laguna Bacalar, Quintana Roo.	Se identificaron 68 especies de diatomeas epilíticas
Mora y Cantoral, 2013	Cuenca Alta del Río Laja, Guanajuato	Se encontraron 173 taxa infragenéricos (especies, variedades y formas) pertenecientes a 54 géneros

El trabajo más reciente cercano a la zona de estudio utilizando diatomeas como indicadores de la calidad del agua, fue realizado por Mora y Cantoral (2013) en la cuenca Alta del Río Laja, Guanajuato, México. Estos autores estudiaron la comunidad de diatomeas en seis sitios de muestreo en relación con el estado de la vegetación en cada sitio, analizaron parámetros fisicoquímicos y a partir de métodos estadísticos determinaron la relación de los parámetros fisicoquímicos con la comunidad de diatomeas identificadas y resaltaron la importancia del uso de bioindicadores para conocer la calidad del agua.

En este mismo sentido, el presente estudio pretende identificar las especies que pueden reflejar la calidad ambiental del arroyo “El Arenal”.

## **Hipótesis**

La introducción de materia orgánica en el arroyo puede afectar la calidad del agua y la producción algal, observándose la disminución de la abundancia de especies de algas que no están adaptadas a esas condiciones y pueden favorecer al crecimiento de otras asociaciones de diatomeas tolerantes a la contaminación, las cuales pueden convertirse en indicadoras de las condiciones ambientales de los sitios de muestreo.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar la calidad ambiental del arroyo El Arenal, Querétaro, mediante la identificación de la relación de los cambios fisicoquímicos con la estructura de la comunidad de diatomeas a lo largo de un gradiente espacial.

### **Objetivos específicos**

1. Identificar las especies de diatomeas de cada sitio de muestreo en el río.
2. Identificar la variación de la estructura comunitaria de las diatomeas y las características fisicoquímicas a lo largo de un gradiente espacial en el río.
3. Determinar la diversidad alfa de diatomeas de los sitios de estudio.
4. Relacionar las características fisicoquímicas de los sitios con su composición de especies y diversidad alfa.

5. Determinar la calidad ambiental de los sitios en función de su composición específica.

## **1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO**

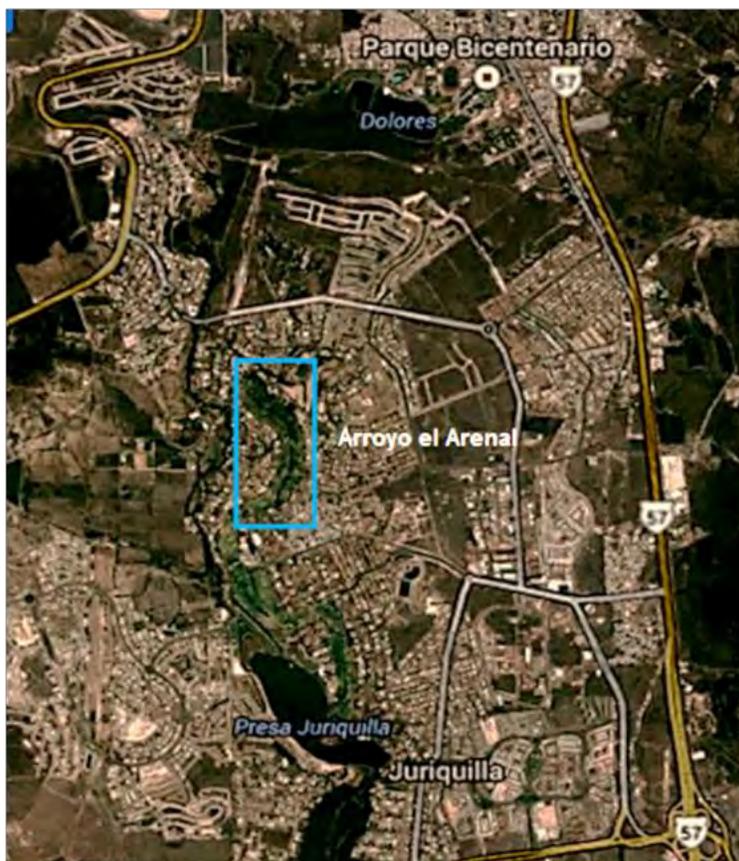
A continuación se mencionarán algunas características importantes del sitio de estudio como la geología, los tipos de suelo y el clima debido a que tienen gran influencia en la cantidad y concentración de iones en las aguas de los ríos y arroyos (Allan y Castillo, 2007).

El arroyo “El Arenal” se ubica dentro del cinturón volcánico mexicano, donde pueden observarse las zonas más irregulares de la región formadas por las derivaciones de la Sierra del Zamorano (Figura 6). En el valle de Querétaro existen dos sistemas de fallas regionales, cada uno con varias centenas de kilómetros de largo. El primer sistema es conocido como Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende que tiene una orientación norte-noroeste (NNO) y el segundo se conoce como el Sistema de Fallas Chapala-Tula, el cual tiene una orientación este-noroeste (ENO) (Johnson y Harrison, 1990).

Dichos sistemas se intersectan en una amplia franja que abarca desde el Municipio de Huimilpan, Querétaro, hasta Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, y desde Apaseo El Alto, Guanajuato, hasta Amazcala, Querétaro. Esta intersección de sistemas generó un arreglo ortogonal de fallas normales que forma un mosaico de largas depresiones y fallas paralelas levantadas donde el terreno presentando hundimientos a lo largo del valle de Querétaro (Aguirre *et al.*, 2000). La falla de Jurica con la orientación NNO-OSO es una de las más próximas al sitio de estudio.

En el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro se encuentran toda la gama de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas) por lo que puede observarse una gran diversidad de tipos de suelos. Entre ellos destacan los residuales y transportados (del tipo

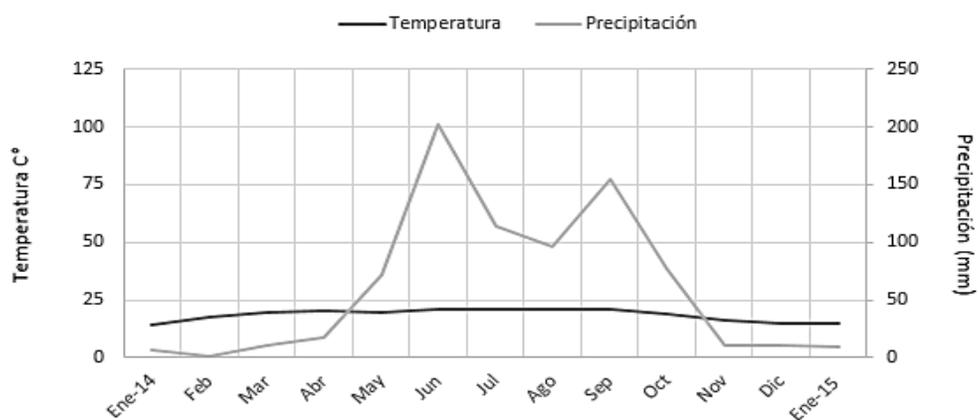
lacustre, fluvial) y de precipitación química. En los arroyos del valle y la zona metropolitana de Querétaro predominan los suelos del tipo fluvial y su espesor puede alcanzar los 3 metros (Álvarez *et al.*, 2002).



**Figura 6.** Zona de estudio (Fuente: Google maps, 2014).

En el municipio de Querétaro la temperatura media anual predominante oscila entre los 16° y 18°C. La media anual máxima corresponde al mes de mayo, con un valor cercano a 20°C y la más baja en diciembre de entre 12.5° y 13°C. En las zonas más bajas donde se presenta el clima más cálido, la media anual es de más de 18°C, en mayo la temperatura puede elevarse a más de 22°C y la que corresponde al mes de enero es ligeramente menor a los 15°C. Las zonas con climas templados subhúmedos presentan una temperatura media anual de menos 14° a 16°C y las temperaturas medias en el mes de mayo pueden variar de los 18° a 12°C en enero respectivamente. En la zona más elevada al norte del municipio, en el cerro de La Rochera y la parte más elevada de la

pequeña sierra sedimentaria metamórfica al norte de la comunidad las Monjas, presentan una temperatura media anual ligeramente por debajo de los 16°C. El rango de precipitación oscila entre 500 a 700 mm anuales donde los meses con más del 95% de toda la precipitación, se da de marzo a octubre (Figura 7). En amplias zonas de clima semiárido, semi-cálido o templado la precipitación anual es escasa: es menor o igual a 500 mm, por lo cual, presenta variaciones entre los años más y menos secos (CONCYTEQ, 2012).



**Figura 7.** Diagrama ombrotérmico elaborado a partir de datos de temperatura media y precipitación en el estado a partir de datos del sistema meteorológico nacional (Fuente: <http://smn.cna.gob.mx>).

La temporada de lluvias empieza en marzo y termina en octubre, los meses con mayor precipitación corresponden a junio y septiembre del 2014. El valor mínimo de temperatura fue de 14.4°C durante enero mientras que el valor máximo fue de 21.1°C durante agosto.

## 2 METODOLOGÍA

### Trabajo de Campo

Se seleccionaron tres puntos del arroyo El Arenal para llevar a cabo la colecta durante dos campañas de muestreo, una durante el mes de noviembre del 2014 (posterior a la temporada de lluvias), y la otra en enero de 2015 (temporada fría). El sitio 1 se encuentra ubicado en la parte alta de la microcuenca que corresponde al sitio de referencia (sitio conservado), el sitio 2 localizado en el arroyo El Arenal, ubicado antes de la presa El Cajón (sitio moderadamente perturbado) y el sitio 3 localizado en un punto del arroyo después de la presa El Cajón (sitio altamente perturbado), considerando inicialmente, transparencia del agua, olor y presencia de larvas de insectos. En cada sitio se registró *in situ* el pH, la conductividad, la temperatura y los sólidos disueltos totales con un potenciómetro marca Hanna modelo H19812-5 y el porcentaje de saturación de oxígeno se midió con un oxímetro marca Hanna modelo H19146. Se tomaron muestras de agua para determinar la cantidad de fósforo total, nitrógeno total, nitritos, nitratos e ion amonio con métodos colorimétricos con espectrofotometría en el Laboratorio de Ecología Acuática y Algas de la UMDI-Facultad de Ciencias, UNAM con un espectrofotómetro multiparamétrico Hanna HI 83099. Asimismo, se tomó nota sobre las principales especies arbóreas de ribera en cada sitio.

En cada sitio se eligió un transecto de 10 metros, donde cada 2 metros se tomó un canto rodado del arroyo para tomar una muestra para la identificación de diatomeas. Cada muestra corresponde al cepillado de un área de 100 cm<sup>2</sup> de cantos rodados sumergidos (Kelly *et al.*, 1998). En total se recolectaron 15 muestras.

Se registraron cinco valores de luz fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) para cada sitio con un medidor marca Li-cor modelo LI-1400 con un sensor Li-cor de plano sumergible, también se midió la profundidad con un metro y se tomaron cinco mediciones de la velocidad de corriente por cada sitio con un medidor marca Flowatch.

## **Trabajo de laboratorio**

### **Análisis de muestras de agua**

La determinación por método cuantitativo del fósforo total, nitrógeno total, nitritos, nitratos e ion amonio se llevó a cabo con un kit de reactivos y un espectrofotómetro marca Hanna HI 83099.

### **Limpieza de las muestras**

Se homogeneizó cada una de las muestras y se vertió la mitad de su contenido en vasos de precipitado de 100 ml y se agregó peróxido de hidrógeno al 40% en un volumen mayor al de las muestras (60 ml). En una campana de extracción, con la ayuda de una parrilla eléctrica (marca Thermoscientific) se calentaron las muestras a 90°C hasta no observar efervescencia (durante un tiempo aproximado de una a tres horas). En caso de ser necesario se agregó más peróxido y posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente. A continuación se añadieron diez gotas de ácido clorhídrico al 20% para remover los remanentes de peróxido y carbonato.

Posteriormente cada muestra se introdujo en un tubo de 15 ml y se aforó a 10 ml con agua destilada, para ser colocado posteriormente dentro de una centrifuga (marca UNICO) a 500 rpm durante 5 min. El sobrenadante se retiró y se agregó nuevamente agua destilada, se introdujo el tubo nuevamente en la centrifuga con el fin de retirar los remanentes de ácido y peróxido; ésta operación se repitió cinco veces (Para cada muestra por separado). Al finalizar la muestra concentrada de cada tubo se colocó en viales pequeños y fueron aforados con agua destilada hasta 2 ml. Cabe mencionar que se etiquetaron con número de muestra, sitio y fecha.

Para realizar la identificación taxonómica y conteo de valvas al microscopio se montaron 3 laminillas permanentes de acuerdo a la técnica propuesta por Kelly *et al.* (2001) y Sterreburg (2011).

### **Elaboración de laminillas**

Para elaborar las laminillas y realizar las observaciones de la morfometría de las diatomeas en el microscopio fotónico, se colocó sobre un cubre objetos redondo de 18mm de diámetro 100  $\mu$ l de agua destilada y 100  $\mu$ l de la muestra con ayuda de una micropipeta (en este caso esta operación se realizó para las muestras del sitio moderadamente perturbado) procurando esparcir la muestra homogéneamente y se dejaron secar a temperatura ambiente. En las muestras que tuvieron alta densidad de valvas y/o alto contenido de sedimentos se realizaron diluciones.

Una vez secas las muestras se colocó una pequeña cantidad de resina Naphrax® para montar las muestras sobre el portaobjetos, la cual se calentó a 140°C por unos segundos (hasta observar ebullición) e inmediatamente se colocó el cubreobjetos con las diatomeas secas y adheridas a uno de sus lados presionando de forma homogénea asegurándose de no dejar burbujas dentro del cubreobjetos y se dejaron secar por 1 a 2 días para su posterior observación al microscopio. Por cada muestra se elaboraron 3 laminillas y se etiquetaron con su número de muestra, sitio, fecha y la cantidad de muestra contenida.

### **Observación de laminillas en el microscopio**

La identificación de especies y conteo se llevó a cabo utilizando un microscopio marca Olympus BX51 con cámara digital Olympus DP12. Inicialmente se utilizó el objetivo con aumento (40x) para hacer una observación rápida y asegurar que cada laminilla tuviera la cantidad de individuos por campo que permitiera hacer un conteo de los mismos,

observando que no hubiese alta densidad de individuos o que la cantidad de sedimentos obstruyera una observación clara de los frústulos. Para la identificación taxonómica y realizar los conteos, se utilizó el objetivo de inmersión (100x), colocando una gota de aceite de inmersión sobre el cubreobjetos antes de comenzar a observar la muestra al microscopio.

La identificación de especies se realizó mediante fotos que fueron tomadas durante la revisión de las laminillas y se analizaron utilizando el software Sigma Scan Pro, este software permitió medir el largo y el ancho de la valva en micrones, contar el número de estrías en 10  $\mu\text{m}$  y observar el resto de caracteres morfológicos necesarios para realizar la identificación con ayuda de bibliografía especializada. El número de individuos a medir para tener una descripción morfológica completa se hizo utilizando la fórmula (Southwood, 1978).

Para realizar los conteos, se utilizó una laminilla por muestra y se contaron los individuos en un campo de visión. Se utilizaron los campos que fueran necesarios hasta completar el conteo de 400 individuos por laminilla (Kelly *et al.*, 1998).

$$n=(S/EX)^2,$$

Donde S= desviación estándar, E= error predeterminado (0.05) y X= media. El número de individuos n se encuentra en la descripción taxonómica en la parte de resultados.

### **Análisis de datos**

Se describió cada uno de los sitios y sus respectivas características. Se evaluó el comportamiento de los datos fisicoquímicos para cada sitio con el fin de elegir las pruebas estadísticas que se utilizarían. Debido a que no se cumplió con los supuestos para aplicar pruebas paramétricas se realizaron pruebas no paramétricas. Se utilizó la prueba de

Kruskall Wallis y como *post hoc* la prueba de Mann-Whitney ( $\alpha=0.05$ ) para evaluar si los sitios eran estadísticamente diferentes. Se realizó una correlación de Spearman para identificar los parámetros ambientales que influyen en la riqueza y diversidad de los sitios. Se utilizó la escala de Sampieri para interpretar los valores de correlación (Tabla 3). Todas las pruebas estadísticas se realizaron con el programa STATISTICA versión 11. **Tabla 3:** interpretación de valores de correlación de Spearman propuesta por Hernández Sampieri y Fernández Collado (1998).

Rango	Relación
-0.91 a - 1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76- a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75.	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0	No existe correlación
+ 0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

La riqueza se determinó mediante un conteo de las especies presentes en cada sitio. Las abundancias relativas se calcularon a partir del número de individuos por cada especie multiplicado por cien entre la cantidad total de individuos por sitio y así obtener la diversidad en cada punto de muestreo. Se calculó el índice de diversidad de Shannon para conocer la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada, empleando el índice de equidad de Pielou. Además se construyeron curvas de rango-abundancia también conocidas como curvas dominancia-diversidad para conocer la diversidad de especies, la dominancia y el número de especies presentes en cada sitio.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Descripción de los sitios de muestreo

##### **Sitio 1: Sitio conservado cercano a la comunidad de La Rochera**

Este sitio fue elegido como sitio de referencia, el ancho del arroyo fue de 4 m, se caracterizó por tener aguas transparentes y de flujo suave de 0.1 a 0.0 m/s con una profundidad promedio de 40 cm, un lecho conformado por cantos rodados de 30 a 50 cm de diámetro y una alta luminosidad de 590.7  $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$  (Figura 8). Cabe mencionar que este sitio se encuentra fuera de la zona urbana.

En las cercanías del arroyo se observaron algunas actividades que tal vez pudieran tener algún impacto sobre el estado del arroyo: la agricultura de temporal, la ganadería y algunos desechos como bolsas de basura (bolsas y envases de PET), que generalmente se vierten en tiraderos de manera clandestina.

##### **Sitio 2: Sitio moderadamente perturbado ubicado antes de la presa El Cajón en Juriquilla**

Este sitio de muestreo se ubica dentro de la zona residencial de Juriquilla antes de la presa El Cajón donde el ancho del arroyo fue de dos metros, con una intensidad luminosa baja 22  $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$  (resultado de la alta cobertura del dosel vegetal caracterizada principalmente por el Sauce *Salix*, Fresno *Fraxinus* y Pirúl *Schinus molle* además de algunos pastos). Con corriente de flujo constante de 0.2 a 0.4 m/s, la profundidad varió de los 15 cm hasta los 30 cm. El lecho del arroyo está conformado de cantos rodados de 10 a 20 cm de diámetro y de rocas emergentes de 20 a 40 cm. Se observó la presencia de algunos macroinvertebrados.

### **Sitio 3: Sitio altamente perturbado**

Este sitio se localiza después de la presa El Cajón en un lugar conocido como el pueblo de Jurica, a simple vista este sitio fue uno de los más perturbados, el ancho del cauce del arroyo fue de 1.80 m aproximadamente y la profundidad promedio de 60 cm. La radiación lumínica en el sitio era abundante registrando un valor de  $588.2 \mu\text{mol}/\text{cm}^2$  a pesar de la presencia de árboles de fresno y de la cercanía con un pequeño puente.

El río se caracterizó por presentar flujo suave de 0.1 m/s con agua muy turbia y con gran cantidad de sedimentos y un olor a aguas negras con presencia de cantos rodados de 10 por 15 cm. Los crecimientos algales en las rocas fueron de un color grisáceo; al hacer el raspado de las rocas y al removerlos, se observaron muchas larvas de moscas y mosquitos.

Los sitios de muestreo fueron clasificados de acuerdo a su estado de conservación basado en la vegetación presente en el sitio y las actividades que se desarrollan cerca de estos, por lo que se clasificaron de la siguiente manera: sitio conservado, sitio moderadamente perturbado y sitio altamente perturbado. Es importante mencionar que el sitio conservado también se conoce como sitio de referencia en la cuenca, debido a que permite comparar las características fisicoquímicas del agua y de las comunidades de diatomeas con los sitios que presentan mayor perturbación.



S1: Sitio conservado



S2: Sitio moderadamente conservado



S3: Sitio altamente perturbado

**Figura 8.** Sitios de muestreo

### 3.2 Parámetros fisicoquímicos de los sitios de muestreo

#### Temperatura

La temperatura del agua presentó diferencias entre los sitios siendo el sitio conservado la localidad con menor temperatura promedio de 16.6 °C con un EEM (Error Estándar del Promedio): 0.02, seguida por el sitio moderadamente perturbado con una temperatura promedio de 18.8°C con un EEM: 0.23 y el sitio 3 registró una temperatura promedio de 19.4°C con un EEM: 0.03. Las lecturas se tomaron entre las 10 am y 12 pm.

#### pH

En todos los sitios se obtuvo un pH alrededor de 8 con un EEM promedio de 0.06.

### **Conductividad (K 25°C)**

El valor promedio del sitio conservado fue de 180  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ . El sitio moderadamente perturbado registro el valor promedio más alto de 726  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , mientras que el sitio altamente perturbado tuvo un valor promedio de 702  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ .

### **Sólidos disueltos (ppm)**

En el sitio conservado se obtuvo un valor promedio de 88 ppm de sólidos disueltos con un EEM: 2, el sitio moderadamente perturbado mostró el valor promedio más alto de 364 ppm con un EEM: 4, el sitio altamente perturbado tuvo un valor promedio de 350 ppm con un EEM: 2.

### **Saturación de oxígeno (%)**

En el sitio conservado registró el valor promedio más alto de 96% con un EEM: 0.9. Seguido por el sitio moderadamente perturbado con un valor promedio de 82.9% con un EEM: 2. En el sitio altamente perturbado hubo una drástica disminución registrando un valor promedio de 31.6% con un EEM: 0.2.

### **Nitratos**

El sitio altamente perturbado registró el valor promedio de 11.7 mg/l con un EEM:1, seguido por el sitio moderadamente perturbado con un valor promedio de 10.1 mg/l con un EEM: 1.56. El sitio conservado tuvo una concentración promedio de nitratos de 2.6 mg/l con un EEM: 0.96 (más bajo en comparación a los otros sitios).

### **Fosfatos**

La concentración promedio más alta correspondió al sitio moderadamente perturbado con 7.0 mg/l con un EEM: 0.75, seguido por el sitio altamente perturbado con una concentración promedio de 6.1 mg/l de fosfatos con un EEM: 0.1 y finalmente el sitio conservado tuvo la concentración promedio más baja de 1.2 mg/l con un EEM: 0.35.

### **Velocidad de corriente**

En el sitio conservado, el valor de velocidad promedio fue igual a 0.04 m/s con un EEM: 0. En el sitio moderadamente perturbado el valor de velocidad promedio fue igual a 3 m/s con un EEM: 0, por último en el sitio altamente perturbado la velocidad de corriente promedio fue 0.1 m/s con un EEM: 0.

### **Luz**

En el sitio conservado la Luz Fotosintéticamente Activa (PAR por sus siglas en inglés) fue de 590.7 mol/cm<sup>2</sup> con un EEM: 12. El sitio moderadamente perturbado (donde se colectaron muestras bajo la sombra de los árboles) se registró el valor más bajo de 22 mol/cm<sup>2</sup> con un EEM: 2.1, mientras que en el sitio altamente perturbado se tuvo un valor de luz promedio muy cercano al sitio de conservado de 588.2 mol/cm<sup>2</sup> con un EEM: 24.6. Las lecturas se realizaron entre las 9:00 y 11:00 a.m.

### **3.3 Resultados del análisis estadístico de los parámetros fisicoquímicos y biológicos**

La prueba de Kruskal-Wallis no mostró diferencias significativas para el pH ( $H= 5.12, p > 0.05$ ). Se observaron diferencias significativas para la conductividad ( $H= 7.8, p < 0.05$ ), la temperatura ( $H=10.69, p < 0.05$ ), los sólidos disueltos ( $H=12.47, p < 0.05$ ), el oxígeno disuelto ( $H=12.52, p < 0.05$ ), los nitratos ( $H=8, p > 0.05$ ), los fosfatos ( $H =7.38, p > 0.05$ ), la riqueza ( $H=10.9, p < 0.05$ ) y la diversidad ( $H=10.9, p < 0.05$ ).

**Tabla 4.** Prueba de Mann-Whitney para la comparación entre sitios de muestreo con las variables físico-químicas. K25= conductividad específica a 25°C. \* Indica diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura; K25= Conductividad específica a 25 °C; OD= Oxígeno disuelto, SD= Sólidos disueltos; NO-3= Nitratos, PO3-4= Fosfatos; S= Riqueza; H'= Índice de diversidad de Shannon-Wiener. S1: Sitio conservado, S2: Sitio moderadamente perturbado y S3: Sitio altamente perturbado.

Variable	Grupo	suma de rangos 1	suma de rangos 2	U	P
K25	S1 vs. S2	15.0	40.0	0.0	0.01*
	S1 vs. S3	15.0	40.0	0.0	0.01*
	S2 vs. S3	37.0	18.0	3.0	0.06
°C	S1 vs. S2	15.0	40.0	0.0	0.01*
	S1 vs. S3	15.0	40.0	0.0	0.01*
	S2 vs. S3	20.0	35.0	5.0	0.14
SD	S1 vs. S2	15.0	40.0	0.0	0.01*
	S1 vs. S3	15.0	40.0	0.0	0.01*
	S2 vs. S3	37.5	17.5	2.5	0.05*
OD	S1 vs. S2	40.0	15.0	0.0	0.01*
	S1 vs. S3	40.0	15.0	0.0	0.01*
	S2 vs. S3	40.0	15.0	0.0	0.01*
NO-3	S1 vs. S2	10	26	0	0.03*
	S1 vs. S3	14	22	4	0.03*
	S2 vs. S3	14	22	4	0.31
PO3-4	S1 vs. S2	10	26	0	0.03*
	S1 vs. S3	10	26	0	0.03*
	S2 vs. S3	18	18	0	1.0
H'	S1 vs. S2	19.0	36.0	4.0	0.09
	S1 vs. S3	40.0	15.0	0.0	0.01*
	S2 vs. S3	40.0	15.0	0.0	0.01*
S	S1 vs. S2	35.5	19.5	4.5	0.12
	S1 vs. S3	40.0	15.0	0.0	0.01*
	S2 vs. S3	40.0	15.0	0.0	0.01*

En la prueba *post-hoc* se mostró que de acuerdo a la conductividad y temperatura se forman dos grupos, el grupo uno lo conforma el sitio conservado, que registró los valores más bajos y el grupo dos está conformado por los sitios mediana y altamente perturbados que registraron los valores más altos (Tabla 3). Con respecto a los nutrimentos también se forman dos grupos a compuesto por el sitio conservado que presenta los valores más bajos de concentración y el grupo dos conformado por los sitios perturbados quienes registraron las concentraciones más altas.

Para variables como los sólidos disueltos y el oxígeno disuelto, no hay relaciones entre sitios, cada sitio es diferente con respecto a otro. En cuanto a la diversidad y riqueza, sitios con alta diversidad y riqueza conforman un grupo (sitio conservado y moderadamente perturbado) y el sitio altamente perturbado que tiene baja diversidad y riqueza de especies formó otro grupo (Tabla 3).

**Tabla 5.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre las variables. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura; K25= conductividad específica a 25 °C; OD= Oxígeno disuelto, SD= Sólidos disueltos; NO-3= Nitratos, PO3-4= Fosfatos; S= Riqueza; H'= Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

Variable	pH	K25	°C	SD	OD	NO-3	PO3-4	H'	S
pH	1.00	0.50	0.07	0.48	0.17	-0.14	-0.05	0.36	0.13
K25	0.50	1.00	0.71*	0.97*	-0.44	0.27	0.33	0.15	-0.42
°C			1.00	0.65*	-0.73*	0.41	0.34	-0.36	-0.74*
SD				1.00	-0.47	0.40	0.45	0.22	-0.43
OD					1.00	-0.62*	-0.56*	0.46	0.84*
NO-3						1.00	0.96*	-0.06	-0.63*
PO3-4							1.00	0.09	-0.53*
H'								1.00	0.62*
S									1.00

A nivel general se puede observar que la temperatura tiene una correlación positiva considerable con la conductividad. Los sólidos disueltos tienen una correlación positiva perfecta con la conductividad y una correlación positiva considerable con la temperatura.

El oxígeno disuelto tiene una correlación negativa con la temperatura. Los nitratos tienen una correlación positiva con el oxígeno disuelto. Los fosfatos tienen una correlación negativa con el oxígeno disuelto y una correlación negativa perfecta con los fosfatos.

Parámetros como los fosfatos, nitratos y temperatura tuvieron una correlación negativa con la riqueza, mientras que la riqueza tuvo una correlación positiva con la diversidad (Tabla 4).

La correlación de Spearman muestra que las especies responden de distintas maneras a las variables ambientales. Las especies están citadas en las tablas por sus acrónimos, dicha tabla puede verse en la sección de anexos.

**Tabla 6.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre especies y las variables no biológicas del sitio 1. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura; K25= Conductividad específica a 25 °C; SD= Sólidos disueltos, NO-3= Nitratos, PO3-4=Fosfatos; S= Riqueza; H'= Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

Especie	°C	SD	OD	NO-3	PO3-4	H'	S
Spu	-0.41	0.25	0.36	-0.71	-0.71	0.40	0.71
Ean	0.00	0.00	-0.80	0.45	0.45	0.50	-0.22
Eso	0.58	-0.71	0.41	-0.10	-0.10	<b>-0.89</b>	0.10
Gcl	0.58	0.00	<b>-0.97</b>	<b>0.90</b>	<b>0.90</b>	0.45	0.00
Uul	-0.24	0.82	0.06	0.11	0.11	0.82	0.74
Cso	-0.30	0.36	0.79	-0.67	-0.67	0.00	0.56
Esp	-0.29	0.35	0.82	-0.60	-0.60	-0.11	0.40
Etr	0.15	0.36	0.39	-0.05	-0.05	0.00	0.41
Nfr	0.17	0.41	<b>-0.89</b>	0.87	0.87	0.65	-0.29
Psp	-0.44	0.54	0.66	-0.67	-0.67	0.29	0.62
Sla	-0.29	0.71	0.41	-0.10	-0.10	0.22	0.10
Ugo	0.32	0.40	-0.06	0.45	0.45	0.13	0.11
Cme	0.29	0.35	-0.62	0.40	0.40	0.78	0.60
Ggr	1.00	-0.61	-0.44	0.58	0.58	-0.32	0.29
Cpl	-0.58	0.71	-0.21	0.30	0.30	0.45	-0.70
San	0.76	-0.19	-0.14	0.53	0.53	-0.29	0.16
Gla	1.00	-0.61	-0.44	0.58	0.58	-0.32	0.29
Cam	1.00	-0.61	-0.44	0.58	0.58	-0.32	0.29
Cal	-0.44	0.73	0.55	-0.31	-0.31	0.23	0.15
Als	-0.41	0.25	0.73	-0.35	-0.35	-0.40	-0.35
Lmu	-0.41	0.25	0.73	-0.35	-0.35	-0.40	-0.35
Gla	-0.30	0.56	0.11	0.26	0.26	0.06	-0.58
Ggr	-0.65	0.40	0.34	-0.11	-0.11	-0.13	-0.78
Gac	-0.17	-0.41	-0.15	-0.29	-0.29	0.00	0.00
Cpp	-0.65	0.40	-0.06	0.11	0.11	0.13	<b>-0.89</b>
Ssp	-0.41	0.25	-0.54	0.35	0.35	0.40	-0.71
Nli	-0.30	0.56	0.65	-0.37	-0.37	0.06	0.26
Rho	0.00	-0.40	0.34	-0.67	-0.67	-0.13	0.67
Nli	-0.41	0.25	0.36	-0.71	-0.71	0.40	0.71
Psp1	0.00	-0.40	0.34	-0.67	-0.67	-0.13	0.67
Cel	-0.41	0.25	0.36	-0.71	-0.71	0.40	0.71
Psp2	-0.41	0.25	0.36	-0.71	-0.71	0.40	0.71

En el sitio 1 *Gomphonema clavatum* (Gcl) registró una correlación negativa con el oxígeno disuelto y una correlación positiva muy fuerte con los nutrientes. La especie *Nitzschia frustulum* (Nfr) registró una correlación negativa muy fuerte con el oxígeno disuelto.

*Epithemia sorex* (Eso) mostró una correlación negativa muy fuerte con la diversidad mientras que *Coconeis placentula var. placentula* (Cpp) mostró una correlación negativa con la riqueza (Tabla 5).

**Tabla 7.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre especies y las variables no biológicas del sitio 2. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura; K25= Conductividad específica a 25 °C; OD= Oxígeno disuelto, SD=Sólidos disueltos; NO-3= Nitratos, PO3-4=Fosfatos; S= Riqueza; H'= índice de diversidad de Shannon-Wiener.

Especie	K25	°C	SD	OD	NO-3	PO3-4	H'	S
Gpu	-0.31	-0.36	-0.11	-0.20	<b>0.90</b>	<b>0.90</b>	0.20	-0.45
Spu	-0.87	<b>-0.97</b>	-0.78	<b>-0.90</b>	0.30	0.30	-0.10	0.22
Agr	-0.82	-0.67	<b>-0.89</b>	-0.70	0.10	0.10	0.70	0.67
Sov	-0.13	0.11	-0.34	0.05	-0.10	-0.10	<b>0.97</b>	0.57
Cme	-0.36	-0.54	-0.40	-0.35	0.35	0.35	0.00	0.00
Dku	-0.03	0.11	-0.23	0.15	0.10	0.10	0.87	0.34
Esu	-0.03	-0.34	0.00	-0.21	-0.05	-0.05	-0.82	-0.23
Ean	-0.73	-0.54	-0.79	-0.71	-0.35	-0.35	0.35	0.79
Nfr	0.10	-0.05	0.22	-0.10	-0.30	-0.30	<b>-0.90</b>	-0.22
Nlj	0.10	-0.21	0.11	-0.10	-0.20	-0.20	<b>-0.90</b>	-0.22
Nin	-0.66	-0.79	-0.80	-0.72	-0.21	-0.21	-0.05	0.57
Npa	-0.50	-0.26	-0.69	-0.36	-0.21	-0.21	0.87	0.80
Nha	0.10	0.36	0.22	0.30	0.50	0.50	0.70	-0.22
Nso	0.26	0.50	0.00	0.36	-0.56	-0.56	0.67	0.57
Nca	-0.05	0.15	-0.34	0.10	-0.30	-0.30	<b>0.90</b>	0.67
Aex	0.52	0.34	0.63	0.34	-0.22	-0.22	<b>-0.89</b>	-0.50
Ncu	-0.57	-0.80	-0.50	-0.67	0.22	0.22	-0.45	0.00
Nen	-0.82	-0.67	<b>-0.89</b>	-0.70	0.10	0.10	0.70	0.67
Cac	-0.34	-0.06	-0.50	-0.22	-0.34	-0.34	0.78	0.75
Fmo	0.15	0.46	0.11	0.30	-0.10	-0.10	0.70	0.22
Del	-0.36	-0.54	-0.40	-0.35	0.35	0.35	0.00	0.00
Nsi	0.55	0.39	0.23	0.46	-0.67	-0.67	-0.21	0.23

En el sitio moderadamente perturbado *Gomphonema populum* (Gpu) tiene una correlación positiva muy fuerte con los nitratos y fosfatos. *Sellaphora pupula* (Spu) tuvo una correlación negativa perfecta con la conductividad y una correlación negativa muy fuerte con el oxígeno disuelto. Especies como *Aulacoseira granulata* (Agr) y *Navicula*

enfuga (Nen) tuvieron una correlación positiva con los sólidos disueltos. *Nitzschia capitellata* (Nca) tuvo una correlación positiva con la diversidad mientras que *Achnanthisdium exiguum* (Aex), *Nitzschia frustulum* (Nfr) y *Nitzschia linearis* (Nli) tuvieron una correlación negativa con la diversidad (Tabla 6).

**Tabla 8.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre especies y las variables no biológicas del sitio 3. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura; K25= Conductividad específica a 25 °C; OD= Oxígeno disuelto, SD=Sólidos disueltos; NO-3= Nitratos, PO3-4=Fosfatos; S= Riqueza; H'= índice de diversidad de Shannon-Wiener.

Especie	pH	K25	°C	SD	OD	NO-3	PO3-4	H'	S
Gpu	<b>0.89</b>	0.54	0.80		<b>0.97</b>	0.05	-0.21	<b>-0.92</b>	0.16
Agr	-0.38	-0.36	-0.34		-0.56	0.36	0.62	0.29	0.29
Dku	0.58	0.56	0.35		0.63	-0.47	-0.79	-0.35	-0.16
Esp	0.75	1.00	0.79		0.71	-0.71	-0.71	-0.40	0.73
Nfr	<b>0.95</b>	0.71	0.67		0.80	-0.10	-0.30	-0.78	0.46
San	0.19	-0.25	0.00		0.00	0.71	0.71	-0.40	0.18
Nls	0.30	0.41	0.65		0.29	0.00	0.29	-0.32	<b>0.89</b>
Cam	0.30	0.41	0.65		0.29	0.00	0.29	-0.32	<b>0.89</b>
Nin	0.14	-0.18	0.34		0.15	0.67	0.82	-0.46	0.37
Nha	-0.56	-0.25	0.00		-0.35	0.00	0.35	0.40	0.18
Nso	<b>-0.95</b>	-0.71	<b>-0.89</b>		<b>-0.90</b>	0.00	0.10	<b>0.89</b>	-0.62

En el sitio altamente perturbado *Gomphonema pupula* (Gpu) tiene una correlación positiva muy fuerte con el pH y una correlación positiva perfecta con el oxígeno disuelto. *Nitzschia solita* (Nso) tiene una correlación negativa perfecta con el pH y el oxígeno disuelto y una correlación negativa con la conductividad. Especies como *Navicula libonesis* (Nls) y *Craticula ambigua* (Cam) tienen una correlación positiva con la riqueza (Tabla 7).

Estos resultados pueden deberse a la afinidad que tienen ciertas especies con los parámetros fisicoquímicos del agua en cada sitio de muestro. En el sitio conservado se observan especies afines con una buena calidad del agua baja en nutrientes (Velázquez *et. al.*, 2007). En el sitio moderadamente conservado se observan especies que se relacionan con un aumento en los nutrientes (nitratos y fosfatos) mientras que otras especies se

relacionaron negativamente con altos valores de conductividad y oxígeno disuelto. Especies afines a sitios contaminados se correlacionaron negativamente con la diversidad. Por último en el sitio altamente perturbado algunas especies se desarrollan mejor con un pH alcalino y con bajos valores de oxígeno disuelto (Calizaya *et. al.*, 2013).

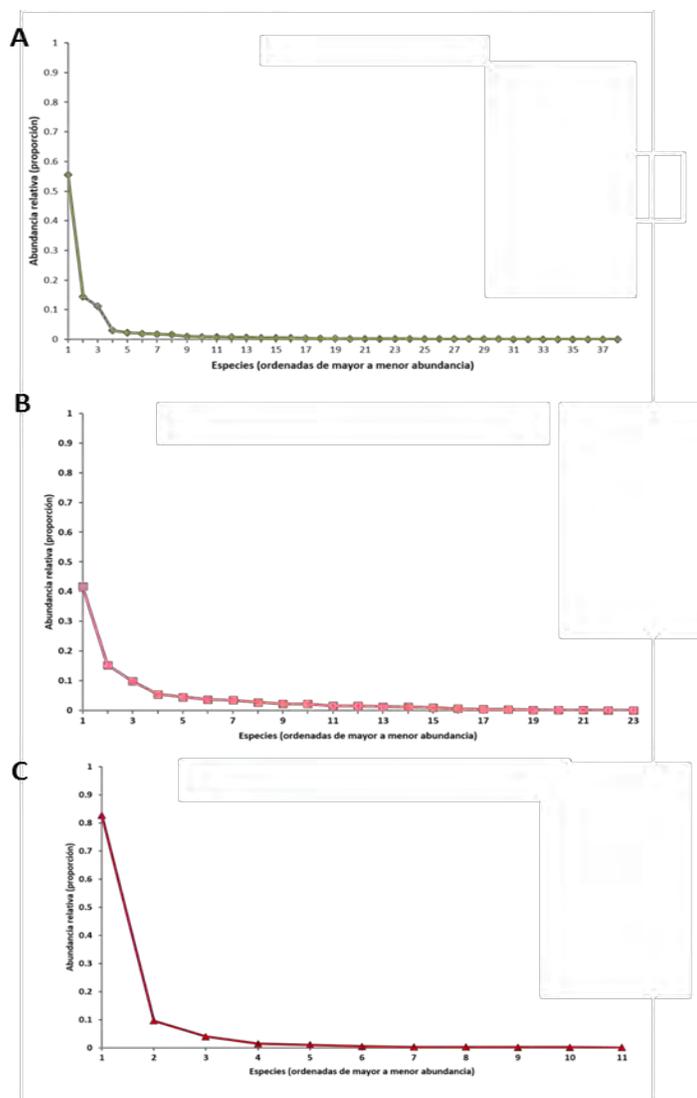
### **3.4 Diatomeas: riqueza y abundancia relativa e índices de diversidad entre sitios**

#### **Riqueza de especies**

En total se reconocieron 52 especies, pertenecientes a 13 géneros y 11 familias. Siendo el género *Epithemia* el más abundante en el sitio conservado, *Nitzschia* en el sitio moderadamente perturbado y *Gomphonema* en el sitio altamente perturbado. El género menos abundante fue *Nitzschia* en el sitio conservado, *Diploneis* en el sitio moderadamente perturbado y *Surirella* en el sitio altamente perturbado. En cuanto a riqueza el sitio conservado fue el sitio de mayor riqueza de especies con 38 especies, seguido por el sitio moderadamente perturbado con 25 especies y el sitio altamente perturbado con 12 especies.

Las curvas dominancia-diversidad muestran que el sitio con mayor riqueza de especies corresponde al sitio conservado (37 especies), seguido por el sitio moderadamente conservado (23 especies) y finalmente el sitio altamente perturbado (11 especies) (Figura 9). En términos de dominancia, el sitio altamente perturbado presentó la mayor dominancia, más del 80% de los registros estuvieron representados por *Gomphonema parvulum* (Figura 9c). Contrariamente a lo esperado, en el sitio conservado, *Epithemia sorex* (se desarrolla en sitios con baja carga de nutrientes) representó más del 50% de los individuos de la comunidad (Figura 9a), el sitio con menor dominancia fue el sitio moderadamente conservado con 40% de sus individuos representados por *Nitzschia frustulum* (Figura 9b).

En los tres sitios la equidad es baja, siendo el sitio más perturbado el que registró la menor equidad (Figura 9 y 10), esto se debe a que en los dos primeros sitios hay tres especies que concentran entre el 57% y 81% de la abundancia y el tercero *Gomphonema parvulum* concentra el 83 % de la abundancia de las especies que conforman la comunidad.

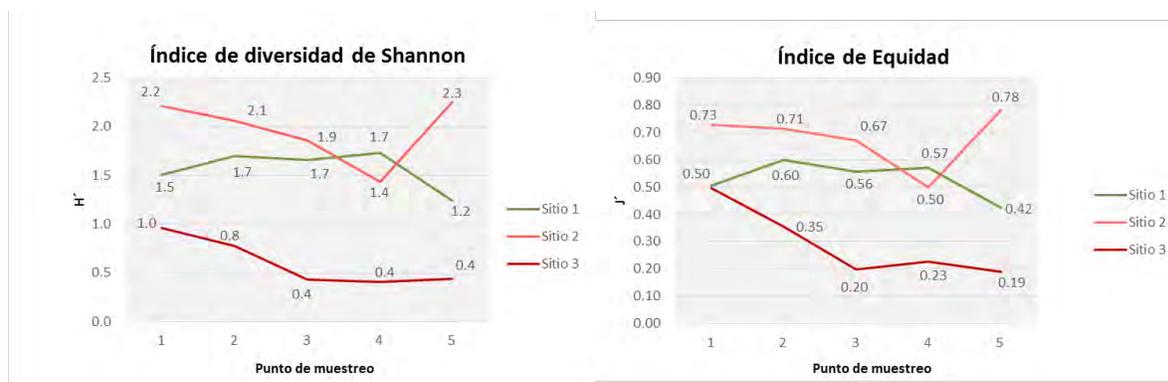


**Figura 9. Curvas dominancia-diversidad. A) Sitio Conservado:** Se observa que la abundancia relativa de las especies es mayor en comparación a los sitios A y B concentrándose en pocas especies, sin embargo, el sitio posee mayor cantidad de especies **B) Sitio moderadamente conservado:** La abundancia relativa de especies decrece

en comparación al sitio A y se observa un decremento en la abundancia de especies **C) sitio altamente perturbado:** La abundancia relativa de especies se concentra en una sola especie mientras que la abundancia de especies decrece de manera drástica.

### Índices de diversidad

En cuanto a los índices de diversidad el sitio moderadamente perturbado presentó la mayor diversidad ( $H' = 2.3$ ) y equidad ( $J' = 0.78$ ). A continuación le siguió el sitio conservado ( $H' = 1.7$ ) y ( $J' = 0.50$ ) y por último el sitio altamente perturbado con una menor diversidad ( $H' = 0.4$ ) y equidad ( $J' = 0.19$ ; Figura 10).



**Figura 10.** Índice de diversidad de Shannon y equidad de Pielou.

## 4 DISCUSIÓN

Las diferencias en el estado de conservación y las actividades realizadas en cada punto de muestreo a lo largo del arroyo no parecen influir sobre algunos parámetros fisicoquímicos como es el caso del pH, sin embargo, parámetros como la temperatura, la conductividad y los nutrimentos parecen responder a cambios que ocurren en cada sitio. La diferencia de temperatura ambiental se tuvo una variación de 3 y 8 grados mayor en los sitios carentes de vegetación, por lo que los niveles de humedad fueron más bajos en comparación a las zonas con vegetación, lo que provoca una disminución de la evapotranspiración (González, 2012) e incide en que los niveles de humedad no sean suficientes para enfriar el aire. Además, las hojas de los árboles al bloquear el paso del sol hacia el suelo o a los

ríos también modifican la temperatura. Esto puede explicar la baja conductividad registrada en el sitio conservado en comparación al sitio moderadamente perturbado y altamente perturbado debido a que cuando la temperatura incrementa también lo hace la conductividad debido a que disminuye la viscosidad del líquido y aumenta la movilidad de iones en solución (Barron & Ashton, 2013).

En cuanto a las diferencias en la concentración de los sólidos disueltos y el oxígeno disuelto entre los sitios pueden explicarse con la diferencia de la velocidad de corriente y la temperatura, ya que el porcentaje de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua depende primero de la temperatura y después del intercambio del agua con el oxígeno atmosférico (Gamón, 1998). En el sitio conservado se observó que el agua no estaba en constante movimiento lo que mantenía a los sólidos disueltos en el fondo del arroyo y podría explicar los bajos valores en cuanto a éste parámetro, mientras que la escasa vegetación y mayor altitud (2124 m.s.n.m.) a la cual se encuentra este sitio de muestreo, permitieron que agua del arroyo tuviera un mayor contacto e intercambio con el oxígeno atmosférico.

El sitio moderadamente perturbado y altamente perturbado se encontraban a una altitud menor (1879-1842 m.s.n.m.), mostraron mayor velocidad de corriente, sin embargo, ambos transportaban descargas de aguas tratadas y por lo tanto tuvieron mayor cantidad de sólidos disueltos en suspensión disminuyendo el contacto con el oxígeno atmosférico (Abarca, 2007). Las partículas en suspensión dispersan la luz, lo que provoca una disminución en la actividad fotosintética de las plantas y algas, lo que trae como consecuencia una baja concentración de oxígeno que puede provocar la disminución de oxígeno disuelto. De igual forma, el oxígeno disuelto pudo verse afectado por la temperatura, ya que a medida de que la temperatura aumenta la solubilidad del oxígeno disminuye (Chapman, 1992).

El pH fue un parámetro que se mantuvo similar entre los sitios con un valor que caracteriza al agua de los puntos de muestreo como alcalina, en sitios donde la geología es alcalina el agua del suelo puede tener deficiencia de iones de hidrogeno libres y rica en iones hidróxido (OH<sup>-</sup>). Como consecuencia el suelo y el agua pueden tener un pH alto como de 8 o 9 proporcionando condiciones alcalinas de vida para todos los organismos (Granados *et al.*, 2010). El que los sitios posean aguas alcalinas favorece la disponibilidad de silicatos (Weiner, 1977) lo que podría estar favoreciendo la alta riqueza de especies de diatomeas al ser el sílice el material indispensable para la formación de sus valvas (Round *et al.*, 1990). Patrick (1997) observó que el pH ácido no favorece la abundancia de diatomeas, mientras que aguas alcalinas con un pH mayor a 8 muestran alta densidad de diatomeas. Murulidhar y Yoganda (2014) encontraron una correlación positiva significativa entre densidad de diatomeas con altas concentraciones de silicatos.

La conductividad forma dos grupos que separan al sitio conservado del sitio moderadamente y altamente perturbado. La conductividad ha sido frecuentemente identificada como una variable asociada a las comunidades de diatomeas (Biggs, 1990, 1995, Pan *et al.*, 2002).

La relación entre riqueza y concentración de nutrientes registrada en el presente trabajo ha sido reportada para otros ambientes lóticos de México, como en el río La Laja y el río Querétaro y en ambientes lénticos como bordos en el estado de Guanajuato y cercanos al río Lerma (Cantoral-Uriza y Mora, 2013). Los sitios muestreados también se agrupan de acuerdo a la relación de la riqueza y diversidad con la carga de nutrientes, los sitios con menor riqueza y diversidad de especies forman un grupo: el sitio moderadamente perturbado y altamente perturbado, mientras que el sitio conservado tuvo una menor carga de nutrientes y mayor riqueza de especies en comparación a los otros sitios formó otro grupo (Segura *et al.*, 2012).

En cuanto al establecimiento de especies, algunas pueden verse desfavorecidas a causa del efecto de la competencia (López, 2010), los factores locales pueden ser un filtro ambiental que selecciona a las especies y les permite lidiar con las condiciones del sitio (Poff, 1997), asimismo la contaminación puede volver más homogéneos los sitios y la disminución de la heterogeneidad también disminuye la posibilidad de que se establezcan un mayor número de especies. La riqueza de diatomeas se relacionó positivamente con el oxígeno disuelto y de manera inversa con la temperatura a nivel general en los tres sitios. La temperatura osciló de los 17 a 20°C, similar a lo reportado en trabajos realizados en ambientes lóticos de la región, como por ejemplo en la cuenca alta del río la Laja (Mora, 2013) y en el río Lerma (Segura et al., 2012).

La temperatura puede tener tanto un efecto directo e indirecto en la tasa de reproducción de las diatomeas, debido a que algunas especies crecen dependiendo de su rango óptimo de temperatura (Round, 1968). La dominancia o desarrollo de algunas poblaciones de ciertas especies responden a la temperatura, debido a que algunas diatomeas crecen mejor en aguas heladas mientras que otras en aguas templadas. La diversidad general de diatomeas parece incrementar cuando se alcanza un rango óptimo de temperatura (Werner, 1977).

Las especies también responden a ciertas condiciones ambientales de manera distinta en los tres sitios. Al incrementar los nutrientes incrementa la abundancia de especies tolerantes mientras la abundancia de las especies sensibles decae.

En el sitio conservado, las especies tolerantes a altas concentraciones de nutrientes tuvieron una correlación positiva como fue el caso de *Gomphonema clavatum* y *Nitzschia frustulum* (Abarca et al., 2014; Segura et al., 2012; Novelo, 2012), sin embargo, ambas especies mostraban una relación negativa con el oxígeno disuelto y estas se vieron representadas con abundancias relativas bajas en comparación a especies como *Epithemia sorex* que mostró una abundancia relativa alta que además tuvo una relación positiva con la riqueza, ésta especie pertenece a condiciones beta mesosapróbicas, es

decir condiciones de poca a mediana contaminación (Blanco, 2015), condiciones se ven reflejadas en este sitio de referencia debido a que tiene poca carga de nutrientes y mayor cantidad de oxígeno disuelto. Es importante mencionar que aunque no aparecieron en la correlación de Spearman con las diferentes variables ambientales, se observó la presencia de *Epithemia adnata* y *Cymatopleura solea*, especies que son afines a condiciones de aguas limpias a medianamente limpias (Blanco, 2015).

En el sitio moderadamente perturbado también se observaron algunas relaciones entre las especies de diatomeas y las condiciones ambientales. *Gomphonema parvulum* se relacionó positivamente con una alta concentración de nutrientes, mientras que especies como *Achnanthydium exiguum*, *Nitzschia frustulum* y *Nitzschia linearis* se vieron afectadas por la riqueza y diversidad general en el sitio. Sin embargo *Nitzschia frustulum* tuvo la mayor abundancia relativa con respecto a las demás especies. Además se observó la presencia de *Sellaphora pupula* que de acuerdo con la bibliografía ha sido reportada en sitios con menor estrés ambiental (Segura *et al.*, 2012). *Gomphonema parvulum* ha sido descrita como un indicador de contaminación orgánica, concentraciones bajas de oxígeno disuelto y eutroficación (Lobo *et al.*, 2002; Van Dam *et al.*, 1999).

Por último, en el sitio altamente perturbado, la especie con mayor abundancia relativa fue *Gomphonema pupula* y se relacionó positivamente con el pH y el oxígeno disuelto los cuales favorecieron su presencia. *Eolimna subminuscula* también estuvo presente en el sitio con una abundancia relativa baja. De igual forma se observó la presencia de *Nitzschia palea*, que ha sido caracterizada como una especie tolerante a la contaminación orgánica desde ambientes mesosapróbicos a polisapróbicos con aguas altamente contaminadas (Krammer y Lange-Bertalot, 1988). En el río Lerma también se han encontrado diatomeas de pequeño tamaño como *Eolimna subminuscula* y *Nitzschia palea* en los sitios más contaminados Segura *et al.*, 2012).

## 5 CONCLUSIONES

El arroyo El Arenal es un ambiente lótico que tiene diversos grados de degradación a lo largo de su cauce y sus aguas se ven afectadas por efluentes externos ocasionando que los cambios en las características fisicoquímicas se vean reflejadas en la disminución de la riqueza de especies de diatomeas y en el establecimiento de especies que son tolerantes a diferentes grados de contaminación. El sitio de referencia (sitio conservado) permitió observar el establecimiento de especies que se ven favorecidas por las condiciones ambientales que caracterizan a los sitios con menor estrés ambiental, donde la riqueza y diversidad de especies es mayor.

Se confirmó que existe una relación entre la dominancia de especies que se desarrollan en relación a las condiciones ambientales del agua y que pueden reflejar la calidad ambiental de un ecosistema acuático, por lo que el uso de diatomeas como indicadores biológicos puede aportarnos información muy valiosa tanto de las especies como del estado del ecosistema.

Las condiciones ambientales del arroyo El Arenal dependen en gran medida de los procesos que lo rodean y considerando que prácticamente forma parte de la zona urbana ubicada al norte de la ciudad de Querétaro, se están llevando a cabo cambios de uso de suelo que impactan en este ecosistema constantemente, por lo que es importante seguir conociendo el estado ambiental de dicho ecosistema, lo que hace que el presente estudio sea un referente para proponer un monitoreo empleando a la comunidad de diatomeas dentro del arroyo, considerando que su uso es de bajo costo, que nos da una visión más integral del arroyo, ya que proporciona datos biológicos importantes que nos permiten conocer la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos así como estimar su riqueza y diversidad de especies.

En este trabajo se logró cumplir con los objetivos establecidos:

- Identificar las especies de diatomeas para cada sitio de muestreo.

- Se identificó cómo varió la estructura comunitaria de diatomeas a lo largo del arroyo.
- Se determinó la diversidad alfa para cada sitio.
- Se logró relacionar algunas variables fisicoquímicas de los sitios con la composición de especies.
- Por último, se logró observar la calidad ambiental de cada sitio en función de su composición específica de especies.

En cuanto a acciones que se pueden llevar a cabo para mejorar las condiciones del arroyo El Arenal se recomienda un monitoreo continuo de los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua y de las comunidades de diatomeas. Mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se encuentran cercanos al arroyo. Evitar las prácticas de pastoreo cerca de las orillas del arroyo. Mantener limpio los costados del arroyo debido a que hay mucha basura y mantener la vegetación riparia que es vital para mantener en buen estado las aguas del arroyo.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre-Díaz, G.J., Zúñiga-Dávila Madrid, F. R., Pacheco-Alvarado, F. J., Guzmán-Spezialle, M. y Nieto-Obregón, J. (2000). El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo. *Unión Geofísica Mexicana, Geos*, 20: 2-7.
2. Abarca, F. J. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Ó. Sánchez, M. Herzing, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (eds.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, INE, U.S. Fish&WildlifeService, Unidos para la Conservación A.C., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
3. Abarca N., Jahn R., Zimmermann J. y Enke N. (2014) Does the Cosmopolitan Diatom *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing Have a Biogeography? 2014DOI: 10.1371/journal.pone.0086885
4. Allan, J.D. y M.M. Castillo. (2007). *Stream ecology: structure and functioning of running waters*. Second edition. Springer. Dorcrecht. 436 pp.
5. Alatorre, N. (s.f.). La microcuenca como elemento de estudio de la vulnerabilidad ambiental. Centro de estudios en Geografía Humana, Colegio de Michoacán, A.C. Disponible en: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong\\_nal\\_06/tema\\_03/25\\_norberto\\_alatorre.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_03/25_norberto_alatorre.pdf).
6. Álvarez-Manilla, A., A., Itandehui Martínez Peña G. E., Pérez Salazar A. y Vázquez Paulino J.C. (2002). Caracterización de los suelos y control espacial por medio de los sistemas de información geográfica: caso Valle de Querétaro. *Publicación Técnica No. 23. SCT/MIT*. 57 p. Disponible en: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt203.pdf>.
7. Barron J. J. y Colin A. (2013). *The Effect of Temperature on Conductivity Measurement*. Technical Services Department, Reagecon Diagnostics Ltd, Shannon Free Zone, County Clare, Ireland.
8. Battarbee, R.W. (1984). Diatom analysis and acidification of lakes. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*. 305: 451–477.
9. Bere, T. y Tundisi J.G. (2010). Biological monitoring of lotic ecosystems: the role of diatoms. Instituto Internacional de Ecología Centro São Carlos. Brazil.

10. Biggs. B.J.F. (1990) Periphyton communities and their environments in New Zealand rivers. - N.Z.J. Mar. Freshw. Res. 24:367-386.
11. Biggs. B.J.F. (1995) The contribution of flood disturbance, catchment geology and land use to the habitat template of periphyton in streams ecosystems. *Freshwater Biol.* 33:419-438.  
Blanco Lanza S. (2015). Ficha de Taxón, Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España. Disponible en:  
[http://eportal.magrama.gob.es/id\\_tax/ficha/buscador/1/740](http://eportal.magrama.gob.es/id_tax/ficha/buscador/1/740)  
[http://eportal.magrama.gob.es/id\\_tax/ficha/buscador/1/21766](http://eportal.magrama.gob.es/id_tax/ficha/buscador/1/21766)  
[http://eportal.magrama.gob.es/id\\_tax/ficha/buscador/1/1917](http://eportal.magrama.gob.es/id_tax/ficha/buscador/1/1917)
12. Bojorge, M. G. y Cantoral E. A. (2007). Estructura comunitaria de diatomeas asociadas a talos de *Prasiolamexicana* (Chlorophyta) en el río Magdalena, D.F. *Hidrobiologica* 17 (1): 11-24.
13. Cairns, J. y Pratt, J.R. (1992). A history of biological monitoring using benthic macroinvertebrates. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. D.M. Rosenberg y V.H. Resh (eds.), pp. 10-27. Chapman y Hall, New York NY.
14. Calizaya-Anco J., Avedaño-Cáceres M. y Delgado Vargas Irma (2013). Evaluación de la calidad del agua fluvial con diatomeas (Bacillariophyceae), una experiencia en Tacna, Perú. *Rev Peru Med Exp Salud Publica* [online]. 2013, vol.30, n.1, pp.58-63.
15. Carrillo, C. Trina R. y Paolini J. (2000). Aportes de nutrientes y sedimentos al embalse La Mariposa a través de sus afluentes principales - identificación, cuantificación y acciones para la recuperación y conservación del embalse.
16. Chapman, D. (1992). *Water quality assessments*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization, United Nations Environment Programme, E & FN Spon, Londres.
17. Chepurnov, V.A., Mann D. G, Sabbe K. y Vyverman W. (2004). Experimental studies on sexual production in diatoms. *International Review of Cytology* 237: 91-154.
18. Chisti, Y. (2011). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology* 26(3): 126-131.  
<http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16909/produccion%20de%20biocombustibles.pdf?sequence=1>
19. CONCYTEQ. (2002). Reporte técnico 5. Uso actual y potencial del suelo en los municipios conurbados de Querétaro. Centro de Queretano de Recursos Naturales. Tomo 5. 68. Disponible en: <http://www.concyteq.edu.mx/Publicaciones/Tomo%20V.pdf>

20. Constitución de los Estados Unidos Mexicanos (1917) Disponible en: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1\\_240217.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_240217.pdf)
21. Coring, E. (1996). Use of diatoms for monitoring acidification in small mountain rivers in Germany with special emphasis on diatom assemblage type analysis. In: Whitton B.A. Rott E. y Friedrich G. (eds.) Use of algae for monitoring rivers. InstitutfürBotanik, Universität in Innsbruck. pp 7-16.
22. Curtis, H. y Schnek. (2006). Invitación a la biología. Ed. Médica Panamericana. 675 pp.
23. Directiva sobre el marco de agua (DMA) (2000 760/105 CE), 2013/39, UE y 2014/101/UE Disponible en: <https://www.daera-ni.gov.uk/articles/water-framework-directive>
24. Dixit, S.S., J.P. Smol, J.C. Kingston y D. F. Charles. (1992). Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environmental Science and Technology* 26 (1): 22-33.
25. Gammon R. J. (1988). The Wabash River. Indiana Univerty Prees. 278 pp.
26. Gómez Tagle Rojas, A. F. (2012). Sustentabilidad de las redes hidrológicas para mantener buena calidad de agua. En Revista Cuatrimestral de Difusión y Divulgación de la ciencia, tecnología, la innovación y las humanidades del Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán. Número 9, 23-27.
27. González Hernández, M.E., Hernández Sandoval L.G., Bustos Contreras D. E. y Terrones Rincón R. (2008). Establecimiento y crecimiento en sus primeras etapas de diez especies arbustivas nativas, en la microcuenca de Santa Rosa Jáuregui, Querétaro. Universidad Autónoma de Querétaro, INIFAP Celaya. Disponible en: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong\\_nal\\_06/tema\\_03/10\\_esther\\_gonzalez.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_03/10_esther_gonzalez.pdf)
28. González Medrano, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. INECC.194 pp.
29. D. Granados, G.F. López y M.A. Hernández (2010) La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente. Vol.16 (2).
30. H. Des Abbayes, M. Chadeffaud y J. Bueno Bitschin (1989). Botánica: vegetales interiores volumen 1. Editorial Reverte. 768 pp.
31. Hernández Sampieri, R., & Fernández Collado, C. (1998). Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill.
32. Johnson, C. A. y Harrison, C. G. A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Phys. Earth Planet. Int.*, v. 64, p. 187-210.

33. Johnson, R.K. Wiederholm y T. Rosenberg, D.M. (1993). Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations, and species assemblages of benthic macroinvertebrates. 40-125 p. In: Rosenberg D.M. y Resh, V.H. (Eds.). *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Chapman y Hall, London.
34. Kelly, M.G., C. Adams, A.C. Graves, J. Jamieson, J. Krokowski, E.B. Lycett, J. Murray-Bligh, S. Pritchard y C. Wilkins. (2001). Preparation of diatoms for microscopy. 17-24. En: *Trophic Diatom Index: a user's manual*. Revised Edition. Environment Agency. Bristol. 135 pp.
35. Köster, D. y T. Hübener. (2001). Application of Diatom Indices in a planted ditch constructed for tertiary sewage treatment in Schwaan, Germany. *Internationale Revue der Gesamten. Hydrobiology* 86: 241-252.
36. Krammer, K. y Lange-Bertalot, H. (1988). Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. En: Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. y Mollenhauer, D. (eds). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag. 610 p. (vol. 2/2).
37. La política de protección del medio ambiente en materia de calidad del agua (2015) Disponible en: [http://www.epa.sa.gov.au/data\\_and\\_publications/standards\\_and\\_laws/revision\\_of\\_national\\_guidelines](http://www.epa.sa.gov.au/data_and_publications/standards_and_laws/revision_of_national_guidelines)
38. La Sombra de Arteaga (2014). Acuerdo que autoriza el Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Querétaro, Qro., 16 de mayo del 2014. Recuperado en: [http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/ordenamiento/acuerdo\\_mpio\\_qro\\_140516po.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/ordenamiento/acuerdo_mpio_qro_140516po.pdf)
39. Leland, H. V. y S. D. Porter. (2000). Distribution of benthic algae in the upperIllinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology* 44: 279-301.
40. Ley de Agua Limpia 33 U.S.C. §1251 et seq. (1972) Disponible en: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>
41. Ley de Control de la Contaminación del Agua en Japón (1970) Disponible en: <http://www.wepa-db.net/policies/law/japan/wpctop.htm>
42. Ley General del equilibrio ecológico (2015) Disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
43. Ley General de Aguas de Honduras (2009) Disponible en: [http://www.gwp.org/Global/GWPCAm\\_Files/LEY%20GENERAL%20DE%20AGUAS%202009.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWPCAm_Files/LEY%20GENERAL%20DE%20AGUAS%202009.pdf)

44. La Ley de Gestión Ambiental del Agua 3579 Disponible en: <http://www2.cedom.gov.ar/es/legislacion/normas/leyes/ley3295.html>
45. La Ley de Aguas Nacionales de Nicaragua N°260 Disponible en: <http://www.ifrc.org/docs/IDRL/Nicaragua/LEY%20DE%20AGUA.pdf>
46. La Ley de Aguas de Venezuela N° 38.595 (2007) Disponible en: <http://www.juris-line.com.ve/data/files/1191.pdf>
47. La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, usos y aprovechamiento del agua (2014) Disponible en: <http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/LEYD-E-RECURSOS-HIDRICOS-II-SUPLEMENTO-RO-305-6-08-204.pdf>
48. Ley de Planificación de Agua No. 1606 de Dinamarca (2013) Disponible en: <http://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC129413/>
49. Ley de los Recursos Hídricos de Paraguay N° 3239 (2007) Disponible en: [http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/legislacion/ley\\_recursos\\_hidricos\\_paraguay\\_0.pdf](http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/legislacion/ley_recursos_hidricos_paraguay_0.pdf)
50. Lindegaard, C. (1995). Classification of water-bodies and pollution, 385-404 p. In: P.D. Armitage, P.S. Cranston and L.C.V. Pinder (Eds.), *The Chironomidae: Biology and ecology of nonbiting midges*. Chapman y Hall.
51. Lobo, EA., Callegaro, VL. and Bender, P. 2002. Utilização de algas diatomáceas epilíticas como indicadores da qualidade da água em rios e arroios da Região Hidrográfica do Guaíba, RS, Brasil. Santa Cruz do Sul: EDUNISC. 126 p.
52. Lobo, E. A., K. Katoh y Y. Aruga. (1995). Response of epilithic diatom assemblage to water pollution in rivers in the Tokyo Metropolitan area, Japan. *Freshwater Biology* 34: 191-204.
53. Lobo, E.A. (1995). Comparative study of the approaches for evaluation of river quality using epilithic diatom assemblages. Doctoral Course of Aquatic Biosciences, Tokyo University of Fisheries, Tokyo Japan. 239 p.
54. Loeb, S.L. (1994). An Ecological context for biological monitoring. Biological monitoring of aquatic ecosystems. Loeb S.L. and A. Spacie, A. Lewis Publishers, London: 3-10.
55. López Fuerte F. O. (2010). Diversidades alfa y beta de diatomeas epilíticas en oasis de Baja California Sur Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.
56. López Fuerte, F.O. y D.A. Siqueiros Beltrones. (2011). Diatomeas como indicadores de la calidad ecológica de los oasis de Baja California Sur, México. *CONABIO. Biodiversitas*, 99: 8-11.

57. Lowe, R. L. y Pan Y. (1996). Benthic algal communities as biological indicators. In: *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*, R.J. Stevenson, M.L. Bothwell, y R.L. Lowe (eds.). Academic Press. Prescott, G.W. 1978. How to know the freshwater algae. WCB/McGraw-Hill. 293 pp.
58. Mata Franklin Quevedo, A. (2005). *Diccionario Didáctico de Ecología*. Editorial Universidad de Costa Rica, 556 pp.
59. Raven H.P. y Johnson B.G. (2002). *Biology*. McGraw Hill ed., 872 pp.
60. Menéndez Velázquez A. (2011). Una revolución miniatura: Nanotecnología al servicio de la Humanidad. Universidad de Valencia. 176 pp.
61. Miranda Luna, M. E. (2007). Evaluación de planes de desarrollo urbano: una alternativa de planeación en microcuencas "Santa Rosa Jáuregui". Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
62. Mora Hernández, L. D. (2013). Diatomeas epilíticas como indicadores biológicos de la calidad del agua en la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. Tesis Profesional UNAM. México, D.F.
63. Munn, M.D., Black R.W. and Gruber, S.J. (2002) Response of benthic algae to environmental gradients in an agriculturally dominated landscape-J.N. Am. Benthol. Soc. 21:221-237.
64. Murulidhar V.N. y Yogananda V.N. Murthy (2014). Distribution and ecology of diatom communities in four lakes using Lange-Bertalot method. *International journal of current microbiology and applied sciences*, 3(4): 539-548 pp.
65. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
66. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
67. Novelo Eberto (2012). Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán Fascículo 102. BACILLARIOPHYTA Hustedt. Instituto Nacional de Biología UNAM, Departamento de Botánica, UNAM. CONABIO.
68. Palmer Mervin, C. (1969). A composite rating of algae tolerating organic pollution *Journal of Phycology*. 1(1): 78-82.
69. Pan, Y. et. al. (1999) Spatial patterns and ecological determinants of benthic algal assemblages in Mid- Atlantic streams, USA. *J. Phycol.* 35:460-468.

70. Patrick, R. (1977). Ecology of fresh water diatoms and diatom communities. The Biology of Diatoms (ed. by D. Werner) Bot. Monogr., Vol.13. Blackwell Sci. Publ., Oxford, London, Edin. Melbourne. 284- 332 pp.
71. Perspectivas del medio ambiente urbano:GEO Zona Metropolitana Querétaro (2008) PNUMA,SEDESU, CONCYTEQ
72. Peña Salamanca, E. J., Palacios Peñaranda, Matha L. y Ospina Alvarez (2005). Universidad Del Valle. 164 pp.
73. Plan Maestro Pluvial (2008-2025). Gobierno Municipal, Secretaria General Oficio 134/09.
74. Poff, N.L. (1997) Landscape filters and species traits: towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology. J.N.Am. Benthol. Soc. 16:391-404.
75. Políticas públicas del Agua en Francia (2007) Disponible en: [http://www.epd.gov.hk/epd/SEA/eng/file/water\\_index/france.pdf](http://www.epd.gov.hk/epd/SEA/eng/file/water_index/france.pdf)
76. Programa Nacional de Microcuencas (2007). Publicado por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO).
77. Prygiel, J. y M. Coste. (1993). Utilization des indices diatomiques pour la mesure de la qualité des eaux du bassin Artois-Picarde: bilan et perspectives. *Annls Limnol.* 29 (3-4): 255-267.
78. Quiroz Martínez, H. y Rodríguez Castro V. A. (2006). Bioindicadores de contaminación en sistemas acuáticos (insectos acuáticos). Universidad Autónoma de Nuevo León.
79. Raven, P. H., R. F. Evert y S. E. Eichhorn. (1992). Biología de las plantas Volumen 2. Reverte. 402 pp.
80. Regulación sobre el medio ambiente en materia de agua (Irlanda del Norte) (2011). Disponible en <http://www.sepa.org.uk/regulations/water/pollution-control/ciones>
81. Round, F.E., R.M. Crawford y D.G. Mann. (1990). The diatoms: Biology and morphology of the genera. Cambridge University Press.
82. Round, F. E. (1968). Light and temperature. In: D. F. Jackson [ed.], *Algae, man and the environment*. Syracuse Univ. Press. 554 pp.
83. Round, F. E. (1991). Use of diatoms for monitoring rivers. In: Whitton BA, Rott E. y Friedrich G (eds.) *Use of algae monitoring rivers I*.STUDIA Studentenförderung-Ges.m.b.H., Innsbruck. 25-32 pp.
84. Sánchez, A. García, R. y Palma, A. (2003). La Cuenca Hidrográfica: Unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Secretaria de Medio Ambiente

- y Recursos Naturales. México. 47 pp.
85. Sczepocka, E. y B. Szulc. (2006). Benthic diatoms in the central section of the Pilica river and Sulejów reservoir. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology* 35 (2): 171-178.
  86. Segura García, V., Cantoral Uriza, E. A., Israde I. y Maidana, N. (2012). Diatomeas Epilíticas como indicadores de la calidad del agua en la cuenca alta del río Lerma, México. *Hidrobiológica* 22 (1): 16-27.
  87. Siqueiros Beltrones, D. A., Argumendo Hernandez U. y Hernández Almeida (2013). A prospective diagnosis of epilithic diatom diversity in Bacalar Lagoon, Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 84: 865-875.
  88. Southwood, TRE. (1978). *Ecological Methods*. Chapman and Hall. Londres.
  89. Sterrenburg, F.A.S. (2011). Cleaning diatom samples. Consultado en: <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artaug06/fs-diatoms.html>
  90. Stevenson, R. J. (1997). Scale-dependent determinants and consequences of benthic algal heterogeneity. *Journal North American Benthological Society* 16: 248-262.
  91. Takeuchi Naboru. (2010). *Nanociencia y nanotecnología: La construcción de un nuevomundoátomoporátomo*. USA: Fondo de Cultura Económica.
  92. UK Environmental standards and conditions (phase 1) Final Report (2008). SR1-2006. UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive. Disponible en: [www.wfduk.org](http://www.wfduk.org).
  93. Universidad Autónoma de Querétaro. (2004). Plan Rector de Producción y de Conservación de la Microcuenca Santa Rosa Jáuregui, Querétaro.
  94. Van Dam, H., A. Mertens y J. Sinkeldam. (1994). A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands *Aquatic Ecology*. 28: 117-133
  95. Van den Hoek, C. V, Mann D. G. y Jahns H.M. (1995). *Algae an introduction to phycology*. Cambridge: Cambridge University Press. 627 pp.
  96. Van Wambeke, J. (2003). La microcuenca hidrográfica como ámbito de planificación del uso y manejo de los recursos naturales, enfoque Socio Territorial. FAORLC.
  97. Velázquez Bucio M., Israde Alcántara I. y Mendoza Cantú M. (2007) Uso de diatomeas para la evaluación del agua del río Turbio, afluente del río Lerma, México. Tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

98. Weber Walter, J. (1979). Control de la calidad del agua. Reverte. 680 pp.
99. Werner Dietrich (1997). The biology of diatoms. University of California Press, 498 pp.101.
100. Wetzell, R.G. (1983). Limnology. 2 Ed. New York: Saunders College Publishing.
101. Zampella, R. A., K. J. Laidig y R. L. Lowe. (2007). Distribution of diatoms in relation to land use and pH in blackwater coastal plain streams. *Environmental Management* 39: 369-384.

## 7 ANEXOS

### Listado de figuras

**Figura 1.** Red de drenaje pluvial existente hasta el año 2008 (Fuente: plan maestro pluvial de la zona metropolitana de Querétaro).

**Figura 2.** Estructura de la Frústrula (Fuente: Graham y Wilcox, 2000). Recuperado de:  
[http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=150&Itemid=438](http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=150&Itemid=438)

**Figura 3.** *Diatomea Luticola ventricosa* (Fuente: The Academy of Natural Sciences in Philadelphia).

**Figura 4.** *Stephanodiscus minutulus*. Júcar, CH y Alcober Bosch. Recuperado de:  
[http://eportal.magrama.gob.es/id\\_tax/ficha/buscador/1/30655](http://eportal.magrama.gob.es/id_tax/ficha/buscador/1/30655)

**Figura 5.** *Brachysira vitrea*. Alcober Bosch. Recuperado de  
[http://eportal.magrama.gob.es/id\\_tax/ficha/nodo/1/440/5975](http://eportal.magrama.gob.es/id_tax/ficha/nodo/1/440/5975)

**Figura 6.** Zona de estudio. Fuente: Google maps, 2014.

**Figura 7.** Diagrama ombrotérmico (2014-2015) elaborado a partir de datos disponibles en:  
<http://smn.cna.gob.mx/climatologia/TempsyPrecip/Mensuales/2014Prec.pdf>  
[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=177:queretaroycatid=14:normales-por-estacion](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:queretaroycatid=14:normales-por-estacion)

**Figura 8.** Sitios de muestreo.

**Figura 9.** Curvas dominancia-diversidad

**Figura 10.** Índice de diversidad de Shannon y equidad de Pielou.

## Listado de tablas

**Tabla 1.** Microcuencas en el municipio de Querétaro (FIRCO, 2007).

**Tabla 2.** Resumen de estudios relacionados con diatomeas en México.

**Tabla 3.** Interpretación de valores de correlación de Spearman propuesta por Hernández Sampieri y Fernández Collado (1998).

**Tabla 4.** Prueba de Mann-Whitney para la comparación entre sitios de muestreo con las variables físico-químicas.  $K_{25}$ = conductividad específica a 25°C. \*Indica diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 5.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre las variables. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura;  $K_{25}$ = conductividad específica a 25 °C; OD= oxígeno disuelto, SO= porcentaje de saturación de oxígeno;  $NO_3$ = Nitratos,  $PO_4$  Fosfatos; S= riqueza;  $H'$ = índice de diversidad de Shannon-Wiener.

**Tabla 6.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre especies y las variables no biológicas del sitio 1. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura;  $K_{25}$ = conductividad específica a 25 °C; OD= oxígeno disuelto, SO= porcentaje de saturación de oxígeno;  $NO_3$ = Nitratos,  $PO_4$  Fosfatos; S= riqueza;  $H'$ = índice de diversidad de Shannon-Wiener.

**Tabla 7.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre especies y las variables no biológicas del sitio 2. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura;  $K_{25}$ = conductividad específica a 25 °C; OD= oxígeno disuelto, SO= porcentaje de saturación de oxígeno;  $NO_3$ = Nitratos,  $PO_4$  Fosfatos; S= riqueza;  $H'$ = índice de diversidad de Shannon-Wiener.

**Tabla 8.** Coeficientes de correlación de rangos de Spearman entre especies y las variables biológicas del sitio 3. \*Indica significancia estadística ( $p < 0.05$ ). °C= Temperatura; K25= conductividad específica a 25 °C; OD= oxígeno disuelto, SO= porcentaje de saturación de oxígeno; NO-3= Nitratos, PO3-4 Fosfatos; S= riqueza; H'= índice de diversidad de Shannon-Wiener.

### Anexo: tabla de datos de los parámetros fisicoquímicos

Sitio y punto	pH	K25	C°	Sólidos disueltos	Oxígeno disuelto	NO-3 mg/l	PO3-4 mg/l
S1 P1	8.3	180	16.6	90.0	99.7	0.3	0.4
S1 P2	8.0	180	16.6	90.0	94.8	2.1	1.0
S1 P3	7.7	180	16.7	90.0	94.8	5.5	2.3
S1 P4	7.7	180	16.6	90.0	95.8	2.6	1.2
S1 P5	7.7	180	16.7	80.0	94.9	0.0	0.0
S2 P1	8.1	700	18.4	350.0	80.0	7.5	5.2
S2 P2	8.1	720	18.4	360.0	82.0	7.7	6.5
S2 P3	8.1	730	18.5	370.0	82.1	15.0	9.2
S2 P4	8.1	740	18.9	370.0	82.7	10.1	7.0
S2 P5	8.1	740	19.6	370.0	87.7	0.0	0.0
S3 P1	7.7	700	19.3	350.0	31.1	9.8	5.8
S3 P2	7.7	700	19.4	350.0	31.4	10.4	6.2
S3 P3	7.9	700	19.4	350.0	31.6	14.8	6.3
S3 P4	7.9	700	19.4	350.0	32.0	11.7	6.1
S3 P5	8.1	710	19.5	350.0	32.1	0.0	0.0

### Anexo: Lista de acrónimos de especies

ESPECIE	Acrónimo	ESPECIE	Acrónimo
<i>Achnanthes exiguum</i>	Aex	<i>Gomphonema lagenula</i>	Gla
<i>Aulacoseira granulata</i>	Agr	<i>Gomphonema pupillum</i>	Gpu
<i>Navicula Libonensis Shoeman</i>	Nls	<i>Luticola mutica</i>	Lmu
<i>Gomphonema parvulum</i>	Als	<i>Nitzschia capitellata</i>	Nca
<i>Craticula accommodata</i>	Cac	<i>Navicula cuspidata</i>	Ncu
<i>Caloneis</i>	Cal	<i>Navicula enfuga</i>	Nen
<i>Craticula ambigua</i>	Cam	<i>Nitzschia frustulum</i>	Nfr
<i>Cymatopleura elliptica</i>	Cel	<i>Nitzschia hantzschiana Rabenhorst</i>	Nha
<i>Stephanocyclus meneghiniana</i>	Sme	<i>Nitzschia intermedia</i>	Nin
<i>Cymbella mexicana</i>	Cme	<i>Nitzschia sigma</i>	Nis
<i>Coconeis placentula var. Lineat</i>	Cpl	<i>Nitzschia linearis</i>	Nli
<i>Coconeis placentula var. Placentula</i>	Cpp	<i>Navicula libonensis</i>	Nlb
<i>Cymatopleura solea</i>	Cso	<i>Nitzschia palea</i>	Npa
<i>Diploneis elliptica</i>	Del	<i>Nitzschia solita</i>	Nso
<i>Denticula Kuetzingi</i>	Dku	<i>Placoneis sp.</i>	Psp
<i>Epithemia andata</i>	Ean	<i>Pinularia sp 1</i>	Psp1
<i>Epithemia sorex</i>	Eso	<i>Pinularia sp 2</i>	Psp2
<i>Ecyonema sp.</i>	Esp	<i>Rhopalodia</i>	Rho
<i>Eolimna subminuscula</i>	Esu	<i>Surirella angusta</i>	San
<i>Encyonema triangulum</i>	Etr	<i>Sellaphora laevisima</i>	Sla
<i>Fallacia monoculata</i>	Fmo	<i>Surirella ovalis</i>	Sov
<i>Gomphonema acuminatum</i>	Gac	<i>Sellaphora pupula</i>	Spu
<i>Gomphonema clavatum</i>	Gcl	<i>Stauroneis sp</i>	Ssp
<i>Gomphonema gracile</i>	Ggr	<i>Ulnaria gouldardi</i>	Ugo
<i>Gomphonema laticulum</i>	Gla	<i>Ulnaria ulna</i>	Uul

## Descripción de diatomeas más abundantes (distribución y hábitat)

### Sitio 1

#### *Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson

Lámina 7 Fig. 41

**No. de individuos medidos:** 7

Valvas de 35 a 42.3  $\mu\text{m}$  de largo, 6.19 a 7.09  $\mu\text{m}$  de ancho, costillas de 3 a 6 en 10  $\mu\text{m}$  y de 14 a 18 estrías en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en el Distrito Federal, Baja California Sur, Michoacán, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí y Veracruz.

**Hábitat.** Agua estancada, alcalífila. En el Valle de Tehuacán crece como planctónica, epífita y epilítica formando parte de natas, perifiton y céspedes filamentosos en lagos (Novelo, 2012).

#### *Epithemia sorex* (Kützing)

Lámina 9 Fig. 47

**No. de individuos medidos:** 10

Valvas de 22.7 a 26.4  $\mu\text{m}$  de largo, 5.6 a 6.7  $\mu\text{m}$  de ancho y estrías de 14 a 18 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en el Estado de México, Guanajuato, Michoacán, Oaxaca, Puebla y Quintana Roo.

**Hábitat.** Agua corriente y estancada, alcalífila, eurihalobia. En el Valle de Tehuacán crece como epífita, edáfica, planctónica, epilítica y epipélica formando parte de natas, películas filamentosas, perifiton, céspedes filamentosos y crecimientos hemisféricos en charcos, ríos, lagos y arroyos (Novelo, 2012).

#### *Cymatopleura solea* (Brébisson) W. Smith

Lámina 8 Fig. 42

**No. de individuos medidos:** 7

Valvas de 51 a 81  $\mu\text{m}$ , ancho de 14 a 16  $\mu\text{m}$ , de 12 a 10 estrías en 10  $\mu\text{m}$ , con 2 crestas y 1 valle en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en Estado de México, Michoacán, Morelos, Puebla y Veracruz.

**Hábitat.** Agua corriente y estancada, alcalífila, oligohalobia. En el Valle de Tehuacán crece como planctónica en charcos (Novelo, 2012).

## Sitio 2

### *Stephanocyclus meneghiniana* (Kützing) Skabitschevsky

Lámina 1 Fig. 3(2), 4 y 5

**No. de individuos medidos:** 12

Valvas de 12.1 a 16.9  $\mu\text{m}$  de diámetro, 4.7 a 5.6  $\mu\text{m}$  de ancho y estrías de 22 a 24 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en el Distrito Federal, Baja California Sur, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Veracruz y Yucatán.

**Hábitat.** Agua corriente y estancada, planctónica, alcalífila, oligohalobia. En el valle de Tehuacán crece como epífita, epipsámica, epilítica, epipélica, planctónica y edáfica formando parte de natas, espumas, céspedes filamentosos, películas filamentosas, tapetes, perifiton, crecimientos hemisféricos y céspedes mucilaginosos en charcos, ríos, canales, arroyos, lagos, represas y estanques artificiales (Novelo, 2012).

### *Nitzschiafrustulum* (Kützing) Grunow

Lámina 7 Fig. 38

**No. de individuos medidos:** 31

Valvas de 11-23  $\mu\text{m}$  de largo, 3-4  $\mu\text{m}$  de ancho y estrías 8-12 en 10  $\mu\text{m}$  y fíbulas de 8-12 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en el Distrito Federal, Baja California Sur, Guanajuato, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz, Tlaxcala y Michoacán.

**Hábitat.** Agua corriente y estancada, alcalífila, eurihalobia. En el valle de Tehuacán crece como edáfica, planctónica, epífita, epipsámica, epilítica, epipélica formando natas, céspedes filamentosos, tapetes, películas compactas, crecimientos hemisféricos, macrofitas, perifiton, plancton, costras, céspedes mucilaginosos y películas filamentosas en charcos, canales, lagos, arroyos, ríos, represas, ambientes mixtos y estanques artificiales (Novelo, 2012).

***Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkovsky**

Lámina 5 Fig. 22

**No. de individuos medidos:** 23

Valvas de 11 a 24  $\mu\text{m}$  de largo, 5 a 6  $\mu\text{m}$  de ancho y estrías de 22 a 27 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en Baja California Sur, Guanajuato, México, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tlaxcala y Veracruz.

**Hábitat.** Agua corriente y estancada, con pH neutro, indiferente a la salinidad. En el Valle de Tehuacán crece como edáfica, epilítica, epipélica y plactónica formando parte de películas filamentosas, crecimientos hemisféricos, macrofitas, céspedes filamentosos, natas y plancton en ríos, arroyos, canales, charcos y represas (Novelo, 2012).

**Sitio 3**

***Eolimna subminuscula* (Manguin) Moser, Lange-BertalotyMetzeltin**

Lámina 2 Fig. 12, 12(2) y 12(3)

**No. de individuos medidos:** 16

Valvas de 7.88  $\mu\text{m}$  de largo en promedio, 3.37 a 4.20  $\mu\text{m}$  de ancho y estrías 18-19 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita. En México se ha registrado en Baja California Sur, Guanajuato, México, Michoacán, Puebla y Quintana Roo.

**Hábitat.** Agua estancada y corriente, alcalífila. En el valle de Tehuacán crece como epipélica y epilítica formando parte de céspedes filamentosos en los ríos y canales (Novelo, 2012).

***Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing**

Lámina 3 Fig. 13 y 14

**No. de individuos medidos:** 29

Valvas de 10 a 31  $\mu\text{m}$  de largo, 5 a 9  $\mu\text{m}$  de ancho y estrías de 11 a 21 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** Cosmopolita, En México se ha registrado en el Distrito Federal, Baja California Sur, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tlaxcala, Veracruz y Yucatán.

**Hábitat.** Todo tipo de ambiente, en el Valle de Tehuacán crece de manera epífita, epipsámica, epilítica, epipélica, edáfica y plactónica formando parte de natas, tapetes, espumas, céspedes filamentosos, películas filamentosas, crecimientos hemisféricos, macrofitas, perifiton, plancton, costras, céspedes mucilaginosos y películas compactas en ambientes mixtos, charcos, ríos, canales, lagos, arroyos, represas y estanques artificiales (Novelo, 2012).

***Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith**

Lámina 7 Fig. 35

**No. de individuos medidos:** 22

Valvas de 14 a 21  $\mu\text{m}$  de largo; 3 a 3.6  $\mu\text{m}$  de ancho; fíbulas 13 a 18 en 10  $\mu\text{m}$ .

**Distribución.** En América y Europa. En México se ha registrado en Oaxaca, Puebla y Tabasco.

**Hábitat.** Agua corriente. En el Valle de Tehuacán crece como epipélica, planctónica, epífita, epipsámica y epilítica formando parte de natas, céspedes filamentosos y películas filamentosas en canales, arroyos y ríos (Novelo, 2012).

**Láminas de diatomeas**

**Lámina 1**

1- *Ulnariaulna* (Nitzsch) Compère

2- *Ulnariagoulardii* (Brébisson) Lange-Bertalot

3, 3(2), 4, 5- *Stephanocyclus meneghiniana* (Kützing) Skabitshevsky

6- *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen

**Lámina 2**

7, 7(2)-*Encyonema triangulum* (Ehrenberg) Kützing

8, 8 (2)-*Encyonema* sp.

9- *Achnanthisdium exiguum* (Grunow) Czarnecki

10- *Gomphonema* aff. *clevei* (Fricke) Gil

11- *Cymbella mexicana* (Ehrenberg) Cleve

12, 12(2), 12(3) – *Eolimna subminuscula* (Manguin) Moser, Lange-Bertalot & Metzeltin

### Lámina 3

12- *Placoneis* sp.

13, 14- *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing

### Lámina 4

15- *Gomphonema laticollum* Reichardt

16- *Gomphonema acuminatum* Ehrenberg

17- *Gomphonema gracile* Ehrenberg

18- *Gomphonema clavatum* Ehrenberg

19- *Gomphonema lagenula* Kützing

20- (Valva con rafe), 20(2) (Valva sin rafe)- *Cocconeis placentula* var. *lineata* (Ehrenberg) van Heurck

21- (Valva sin rafe), 21(2) (Valva con rafe)- *Cocconeis placentula* Ehrenberg var. *placentula*

### Lámina 5

22- *Sellaphora pupula* (Kützing) Mereschkowsky

23, 23(2)- *Sellaphora laevis* (Kützing) D.G. Mann

24- *Navicula erifuga* Lange-Bertalot

24(2)- *Navicula libonensis* Schoeman

25- *Caloneis* sp.

### Lámina 6

26- *Craticula accomoda* (Hustedt) D.G. Mann

27- *Pinnularia* sp. 2 Mora

28- *Pinnularia* sp. 1 Mora

29- *Craticula ambigua* (Ehrenberg) D.G. Mann

30- *Craticula cuspidata* (Kützing) D.G. Mann

31- *Stauroneis* sp.

### Lámina 7

32- *Nitzschia intermedia* Hantzsch

33- *Nitzschia hantzschiana* Rabenhorst

- 34, 34(2) – *Nitzschia solita* Hustedt  
35- *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith  
36, 36(2) – *Nitzschia capitellata* Hustedt  
37- *Nitzschia linearis* (Agardh) W. Smith  
38- *Nitzschia frustulum* (Kützing) Grunow  
39- *Surirella angusta* Kützing  
40- *Surirella ovalis* Brébisson  
41-*Epithemia adnata* (Kützing) Brébisson

#### **Lámina 8**

- 42- *Cymatopleura solea* (Brébisson) W. Smith  
43-*Cymatopleura elliptica* (Brébisson) W. Smith  
44- *Surirellarobusta* Ehrenberg

#### **Lámina 9**

- 45- *Rhopalodia gibba* (Ehrenberg) O. Müller  
46- *Nitzschia umbonata* (Ehrenberg) Lange-Bertalot  
47-*Epithemia sorex* Kützing  
48- *Luticola mutica* (Kützing) D.G. Mann  
49- *Craticula accomoda* (Hustedt) D.G. Mann  
50- *Navicula* aff. *rostellata* Kützing  
51-*Fallacia monoculata* (Hustedt) D.G. Mann  
52- *Denticula kuetzingii* Grunow

Lámina 1

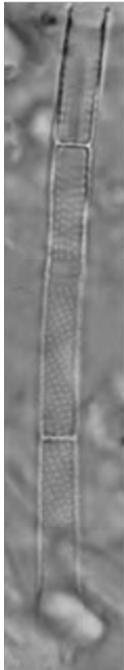
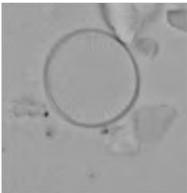
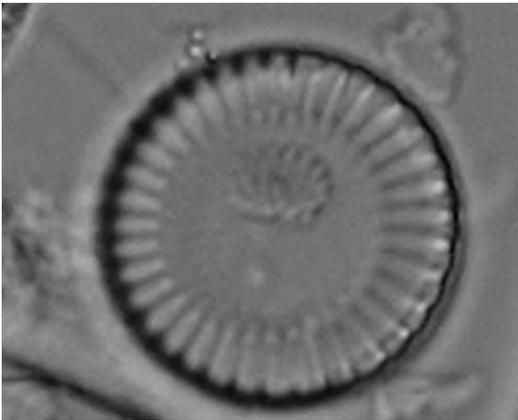
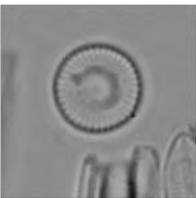
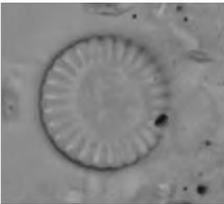
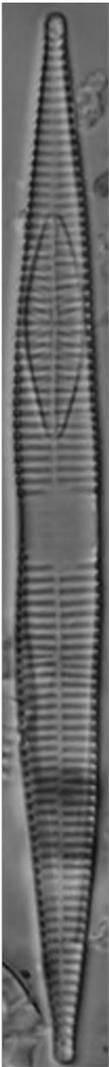
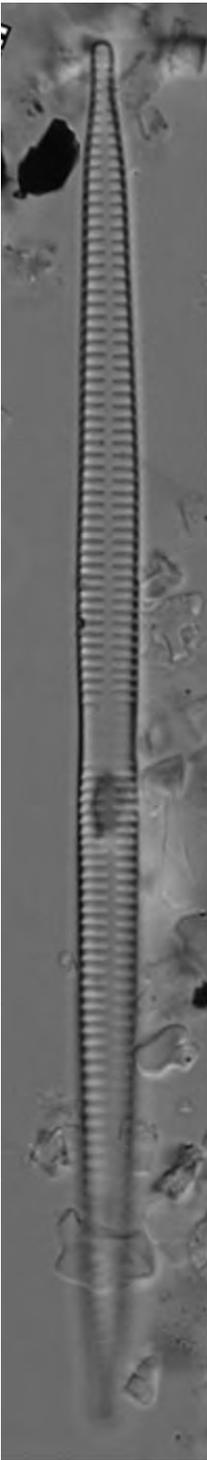
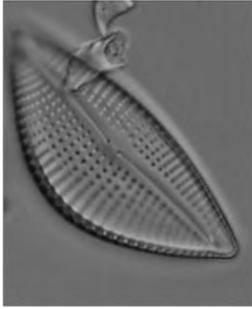
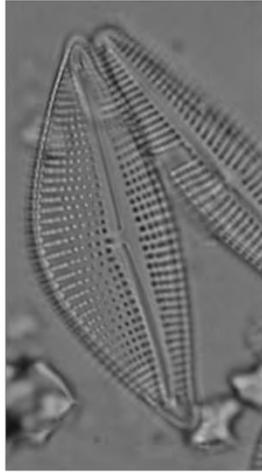


Lámina 2



7



7 (2)



8



8 (2)



9



10



12



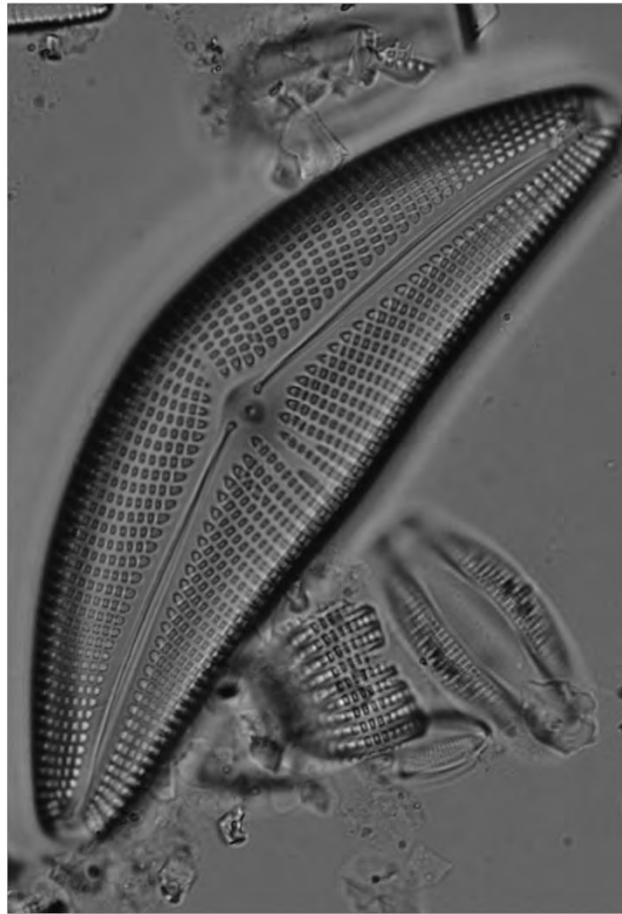
12 (2)



12 (3)

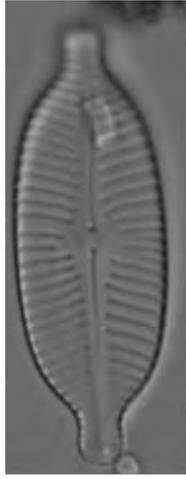


10  $\mu\text{m}$

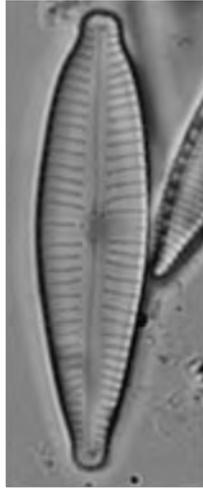


11

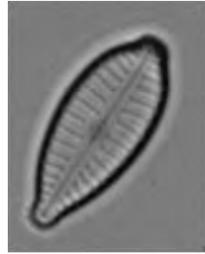
Lámina 3



12



13

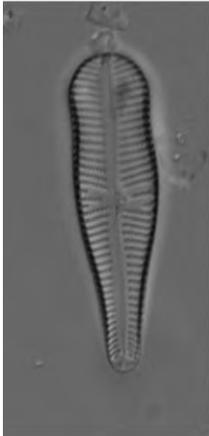


14



10  $\mu$ m

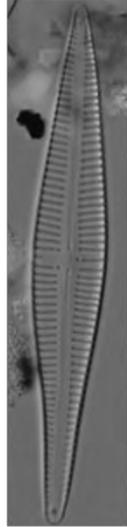
Lámina 4



15



16



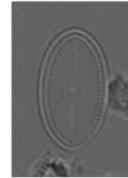
17



18



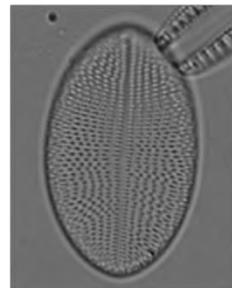
19



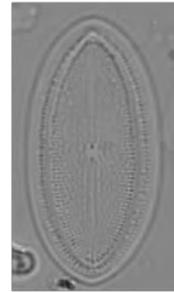
20



20 (2)



21

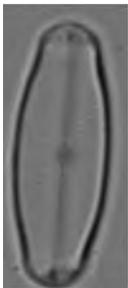


21 (2)

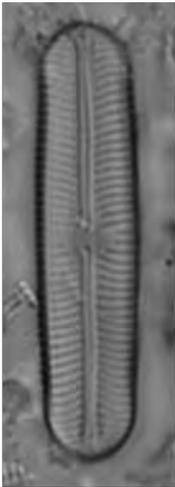


10  $\mu$ m

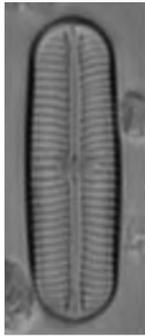
Lámina 5



22



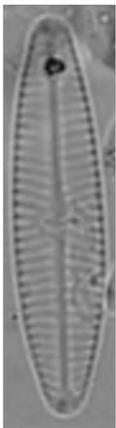
23



23 (2)



25



24



24 (2)

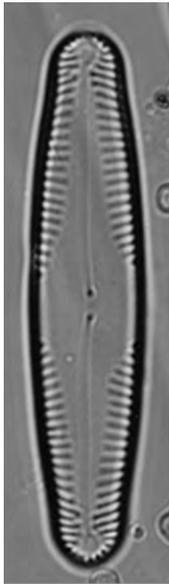


10  $\mu\text{m}$

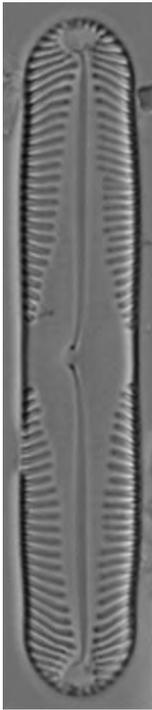
Lámina 6



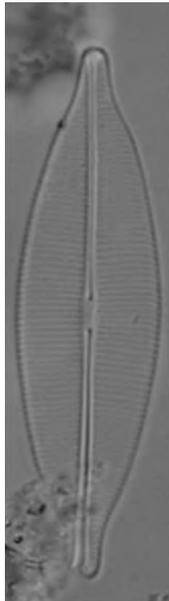
26



27



28



29



30



31



10  $\mu$ m

Lámina 7

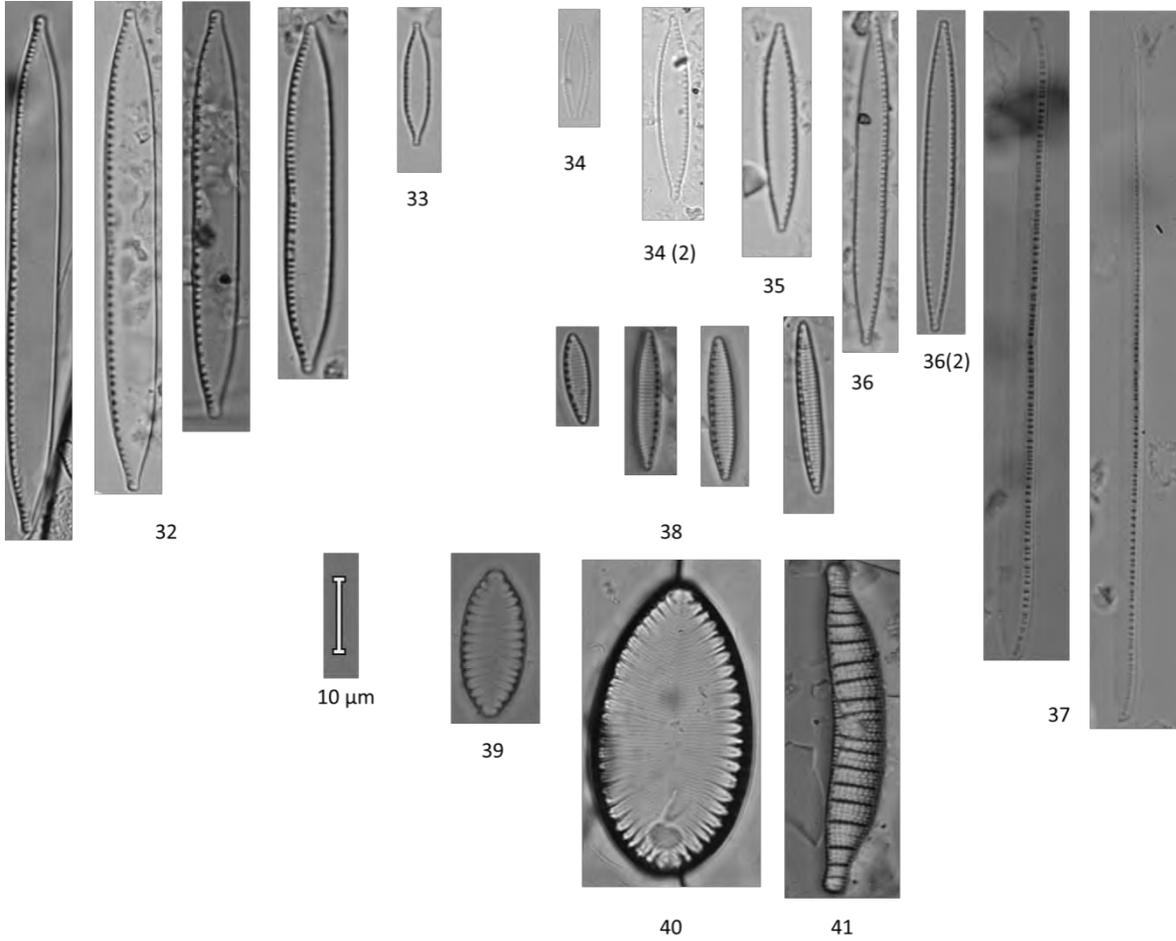
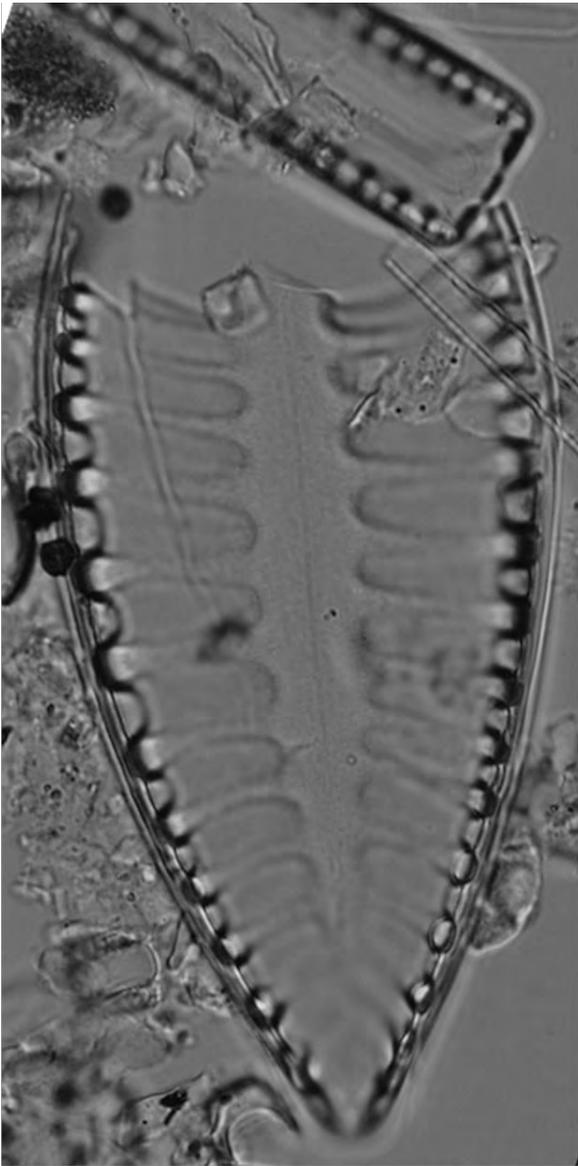


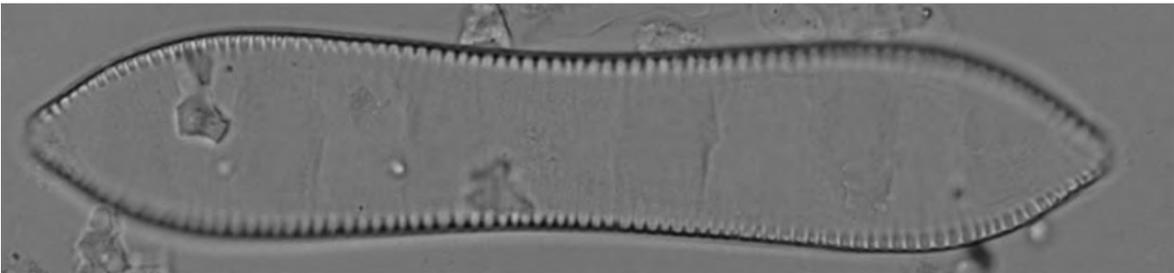
Lámina 8



43

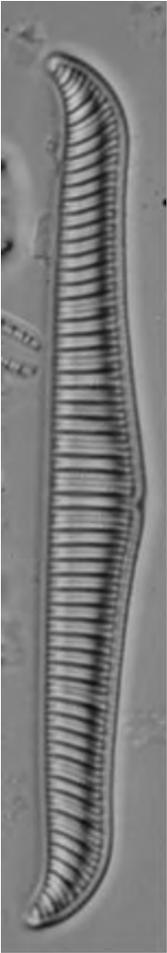


44

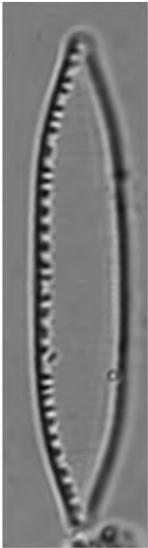


42

Lámina 9



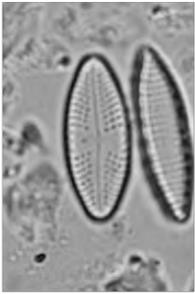
45



46



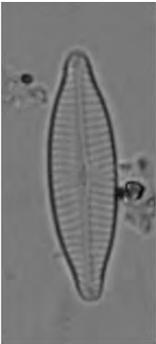
47



48



49



50



51



52



10  $\mu\text{m}$