
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**USO DE LAS DIATOMEAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL
AGUA DEL RÍO TURBIO, AFLUENTE DEL RÍO LERMA, MÉXICO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN GEOCIENCIAS

PRESENTA

MARÍA MAGDALENA VELÁZQUEZ BUCIO

**ASESORA
DRA. ISABEL ISRADE ACÁNTARA**

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO 2007

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Antecedentes	6
3. Justificación	15
4. Objetivos	17
4.1. Objetivo general	17
4.2. Objetivos particulares	17
5. Preguntas de investigación	18
6. Marco teórico	19
6.1. Ríos	19
6.2. Bioindicadores	21
6.3. Diatomeas	24
7. Área de estudio	28
8. Metodología	34
8.1. Trabajo de campo	35
8.2. Trabajo de laboratorio	38
8.3. Trabajo de gabinete	40
9. Resultados y discusión	43
9.1. Análisis espacial	
9.2. Análisis de roca por medio de láminas delgadas	43
9.3. Calidad de aguas	49
9.4. Diatomeas	59
9.4.1. Ubicación taxonómica de las diatomeas	60
9.4.2. Descripción de especies	68
10. Análisis estadístico	93
10.1 Análisis estadístico del periodo de secas	93
10.2. Análisis estadístico del periodo de lluvias	100
11. Conclusiones	107
12. Bibliografía	109

1. INTRODUCCIÓN

El agua, componente vital de los organismos, es también uno de los principales recursos de nuestro planeta ya que juega un papel clave en el desarrollo y la evolución de todo lo existente sobre la Tierra. Sin embargo, a causa de las distintas actividades realizadas por el hombre, gran parte del agua disponible presenta distintos grados de contaminación debido a la introducción de elementos ajenos al agua, lo que deteriora la calidad de la misma. En la constante y dinámica modificación del paisaje continental, los ríos y sus llanuras de inundación han sido fundamentales en la historia de la vida, han influido en las diferentes etapas de la evolución de las especies y propiciado los asentamientos humanos con su consecuente actividad agrícola, industrial, de transporte, etcétera, lo cual ha modificado en gran medida al ecosistema.

Particularmente en la República mexicana se ha registrado un desproporcionado aporte de materiales contaminantes a los cauces de los ríos y cuencas de agua dulce. La subcuenca Lerma-Chapala es una de ellas; debido al gran valor económico relacionado con la producción agrícola e industrial a nivel nacional, la subcuenca Lerma-Chapala es una de las más importantes en México (Aparicio, 2001). El río Lerma Presenta un alto grado de contaminación, por lo que es uno de los más estudiados y monitoreados.

La vertiente Lerma-Chapala es una subcuenca de la cuenca Lerma-Santiago. La cuenca del río Lerma incluye parte de los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro. La superficie de la cuenca representa aproximadamente 3% del territorio nacional de México y tiene cerca de 52,545 km² (Aparicio, 2001). Desde la perspectiva de infraestructura hidráulica, la vertiente Lerma-Chapala es una de las más desarrolladas de México. Tiene más de 12 presas, con capacidad de almacenamiento igual o mayor a 10 Mm³ y miles de pequeñas a grandes reservas (Aparicio, 2001). Sin embargo, al ser una de las regiones más activas en el país, desde el punto de vista socioeconómico, su población se multiplica

rápidamente y por consiguiente, la contaminación de las aguas se incrementa con el tiempo, agravando los problemas sobre uso y disponibilidad (SEMARNAT, 2003).

El río Lerma cuenta con más de 700 km de longitud y recibe agua de varios tributarios siendo los más importantes los ríos Laja, Turbio, Angulo y Duero. El río Turbio objeto de este estudio, tiene gran influencia en este curso de agua en cuanto al ingreso de organismos, nutrientes y grado de contaminación, lo cual se ve reflejado en la calidad del agua del río Lerma. Este río transporta las aguas residuales para irrigación de numerosos y variados cultivos, además de que su cauce pasa por el mayor polo de desarrollo económico de la región que es la ciudad de León Guanajuato. La intensa actividad industrial con numerosos procesos que involucran un variado tipo de sustancias químicas tóxicas cuyos residuos son descargados en el alcantarillado sin algún tratamiento previo, lo cual provoca un extremo empobrecimiento de la calidad del agua. Se suman además, las descargas de San Francisco del Rincón y de la industria local; en particular resaltan las actividades de curtiduría, del calzado y agrícola (Presa de Silva). Este escenario ha dado como resultado una intensa eutrofización, particularmente con el asentamiento de nutrientes, que es el mayor problema en la calidad del agua a nivel regional.

La influencia de la contaminación orgánica en comunidades fotosintéticas en ríos ha sido reconocida por un largo tiempo (en Kelly, 1995), ya que el estado trófico de un cuerpo de agua es el reflejo de la respuesta de la biota a condiciones físicas y químicas (Rosas *et al.*, 1993). De este modo los indicadores ambientales de mayor precisión son los de carácter biológico, donde las variaciones en las asociaciones definen cambios de salinidad, pH, alcalinidad del medio y profundidad (Israde, 1999). Los peces, los invertebrados bentónicos y las comunidades de algas son estudiados para ayudar a evaluar la calidad del agua además de las condiciones ecológicas. En México, las diatomeas han sido motivo

de distintas investigaciones tanto de taxonomía como de trabajos de tipo ambiental (Oliva *et al.*, 2005).

Las diatomeas son algas microscópicas unicelulares de la división Chrysophyta y pertenecen a la clase *Bacillariophyceae*. Las relaciones entre las especies de diatomeas y nutrientes son influenciadas por gradientes ecológicos complejos, el efecto de la química del agua, especialmente salinidad y pH, en las especies de asociaciones de diatomeas ha sido reconocido desde el principio de los estudios ecológicos de este grupo algal (Potapova y Charles, 2002). La velocidad de la corriente, la iluminación y el tipo de sustrato juegan un papel importante para el establecimiento de comunidades de algas (en Cantoral *et al.*, 1997). Estos organismos colonizan todo tipo de ambientes húmedos, en aguas dulces, salobres y marinas, gran parte de ellas son especializadas en un tipo de hábitat determinado con propiedades fisicoquímicas específicas como la salinidad, temperatura, pH, nutrientes, luz, contenido de materia orgánica, etc. Por estas razones pueden usarse como indicadoras de cambios en un cuerpo de agua (Velázquez, 2004).

Los crecimientos algales en los que se integran las diatomeas son de gran importancia porque regulan el paso de nutrientes entre el sustrato, los sedimentos y el agua, de tal manera que otros organismos dependen de las algas para la obtención de nutrimentos (en Oliva *et al.*, 2005). Las diatomeas poseen características morfológicas y estructurales que les permiten ser identificadas a nivel especie y atribuirles una utilidad como indicadoras ecológicas, previa consulta cuidadosa de bases de datos registrados en contextos ambientales específicos.

Las diatomeas comprenden mas de 20 000 taxas, aunque cada día se redescubren y reevalúan especies de colecciones antiguas, así como nuevos taxas son asociados al impacto antrópico. Las diatomeas presentan elementos constitutivos útiles para definir ámbitos ecológicos. Así por ejemplo, su frústula

(valva) se usa como indicador en estudios de cambio climático, lluvia ácida y calidad del agua (en Potapova y Charles, 2002). Actualmente se utilizan las frústulas de las diatomeas para análisis isotópicos para identificar los cambios en la precipitación y evaporación de agua en un ambiente determinado a nivel regional (Aston, 2006). A diferencia de la evaluación química, la cual refleja las condiciones puntuales del cuerpo de agua en donde fue tomada la muestra, un biomonitoreo informa además la situación pasada; los índices biológicos dan información tanto momentánea como de acontecimientos previos a la toma de muestras (Del Toro *et al*, 2003).

El desarrollo de índices de bases de invertebrados indicadores para identificar el grado de la contaminación orgánica, refleja el impacto abrumador que esta forma de contaminación tiene en las comunidades de invertebrados en los ríos (en Kelly, 1998). La existencia de especies que presentan diferentes grados de sensibilidad a la contaminación y el uso de índices basados en resultados cuantitativos de diatomeas tienen la ventaja de mostrar las modificaciones progresivas de la estructura en una comunidad (Kelly, 1995).

Los índices para diatomeas han sido desarrollados en distintos países, pero los mas avanzados son los Estados Unidos de Norteamérica, en Europa (Francia, Inglaterra y los países bajos) y actualmente desarrollan investigaciones similares Italia y España. En el continente americano Norteamérica está a la vanguardia, seguida por Brasil, Chile y Argentina. En México las investigaciones ambientales y paleoambientales en medios de flujo continuo de agua recién han iniciado y son los primeros casos la región de la Huasteca Potosina; el río Magdalena en México, Distrito Federal y la cuenca Lerma Chapala, una de las más grandes e importantes de México. Es por esta razón que el río Turbio representa un caso de estudio, donde pueden ser aplicadas las diatomeas como índices de contaminación y posteriormente aplicarse en otras regiones con características ambientales semejantes.

Cabe destacar que la presente investigación es parte del proyecto “Uso de las diatomeas y los macroinvertebrados para la evaluación y el monitoreo de la calidad biológica del río Lerma” dirigido por la Dra. Isabel Israde Alcántara, apoyado por CONACYT con clave SEP2003-CO244693.

2. ANTECEDENTES

Los estudios realizados en base a las diatomeas para evaluar la calidad de ambientes acuáticos son numerosos, así mismo, el uso de índices biológicos para monitorear la eutrofización en ríos no es nuevo. A partir de los trabajos de Patrick (1949, 1957, 1964), numerosos estudios se han dedicado a identificar caracteres morfométricos que han permitido reconocer el potencial de las diatomeas bentónicas como indicadores de la calidad del agua (Kelly, 1995).

En sus estudios paleoecológicos del Lago de Pátzcuaro, Bradbury (1982) analiza las variaciones estacionales en comunidades de algas, la química y la hidrología del lago para categorizar las condiciones tróficas de dicho lago. El autor encuentra que el número total de células, en lo referente a las comunidades de algas se incrementa de febrero a agosto. La comunidad de fitoplancton se caracteriza por una composición heterogénea de especies y abundancia alrededor del lago. Las distribuciones y número de especies cambian con el tiempo y con el espacio, de tal forma que los niveles taxonómicos registrados parecen relacionarse con algunos fenómenos ambientales ocurridos durante el tiempo de muestreo. En general, este autor encuentra que los grupos de algas muestran una correlación estrecha con la temperatura.

En el mismo marco, se han desarrollado varios índices y modelos para monitorear el estado trófico de los cuerpos de agua, entre ellos se encuentra el de Kelly y Whitton (1995), en el cual los autores mencionan que los valores del Índice Trófico de Diatomeas (TDI) indican que el efecto de los nutrientes incrementa la proporción de los taxa tolerantes a la contaminación orgánica.

En el caso de estudio en el que R. Browney (en Kelly y Whitton, 1995) provee un ejemplo donde el TDI puede emplearse para monitorear recursos de nutrientes, las especies dominantes son *Cocconeis placentula* y *Amphora pediculus*, junto con otras especies típicas de aguas eutróficas. La diversidad de especies en esas

muestras es relativamente alta, con más de 25 especies típicas por muestra. La proporción de géneros móviles (*Navicula*, *Nitzschia*) es usualmente menor de 15%. Sin embargo, durante el periodo de no dilución en el río la proporción es alta (28-35%), con *Navicula tripunctata* y *Nitzschia dissipata* especialmente abundante; éstas son especies tolerantes a la eutrofización, pero relativamente intolerantes a la contaminación orgánica. Bajo las descargas artificiales, la flora es dominada por especies tolerantes a la contaminación orgánica, particularmente las pequeñas como *Navicula* sp. (*N. atomus*, *N. saprophila*, *N. subminuscula*, etc), *Gomphonema parvulum* y *Achnanthes lanceolata*, donde hubo relativamente poco cambio luego de suspender la introducción de agua mineral. Los valores registrados del Índice Específico de la Sensibilidad de Contaminación (SPI) y el Índice Genérico de Diatomeas (GDI) sugieren una contaminación suave orgánica en la zona de la descarga. Tanto la química de agua como el TDI indicaron que el río era más eutrófico en la zona de la descarga, y el mínimo incremento aguas abajo fue acompañado por un aumento mayor en la proporción de taxa tolerantes a la contaminación, lo cual sugiere que el efecto de nutrientes *per se* es bajo.

Otras índices biológicas de diatomeas indicadoras se han creado a partir de la ecuación de Zelinka y Marvan (1961, en Nelly, 1995), y son en general índices de contaminación:

$$\text{Índice} = \sum a_i s_i / \sum a_i$$

Donde

a_i = abundancia del taxón en una muestra y

s_i = sensibilidad del taxón a la variable de interés.

En el Reino Unido una nueva legislación se ha encargado de la regulación de la biota para examinar los impactos de eutrofización en ríos durante un tiempo determinado. La principal herramienta de juicio son los nuevos índices de comunidades de macrofitas y de diatomeas (Kelly, 1995). Así mismo, el "Biological

Monitoring Working Party (BMWP) es un programa aplicado comúnmente en el Reino Unido para el manejo de la contaminación orgánica y se basa en la presencia de macroinvertebrados (en Whitton y Kelly, 1995).

Otros índices con bases en diatomeas de eutrofización en ríos han sido propuestos por Schiefele y Kohmann en Alemania y por Dell'Uomo en Italia. En Alemania se ha trabajado para refinar el índice de eutrofización creado por Hofmann (1996; en Kelly 1995). Las medidas de eutrofización basadas en macrofitas están aún en desarrollo en Francia (en Kelly, 1995). El monitoreo biológico de ríos en este país es realizado al utilizar técnicas estandarizadas basadas en macroinvertebrados. Como en la región de l'Eau Artois-Picardie no se posee información de la calidad del agua de la superficie biológica, ellos han desarrollado un método particular en 1991, basado en el estudio de diatomeas bentónicas (Prygiel, 1991). Este método no sólo concede cantidades de poblaciones orgánicas, sino también otros tipos de población como eutrofización y salinidad. Esta metodología se basa en la examinación de especies y en tres índices de diatomeas (Prygiel, 1991).

En Alemania el sistema de división por zonas saprobias de Lange-Bertalot (1979) ha sido adoptado para incluir los efectos de los nutrientes orgánicos en ausencia de contaminación orgánica significativa (en Kelly y Whitton, 1995) y subsecuentemente esto ha sido desarrollado dentro de los índices cuantitativos para monitorear fósforo (P) y relación entre nitrógeno (N) + fósforo (P), respectivamente por Shiefele y Kohmann (1993 en Kelly y Whitton, 1995). Sin embargo, es difícil con dicho índice separar las respuestas directas de otras variables correlacionadas con P en pruebas que incluyen una gran variedad de tipos de ríos y calidad de agua. El objetivo del trabajo llevado a cabo por Kelly y Whitton (1995) fue desarrollar un índice práctico para monitorear el estado trófico de ríos bentónicos. Los autores afirman que como las variables son a menudo altamente correlacionadas, es mejor ajustar para un amplio número de respuestas a "nutrientes" o a la "eutrofización" usando sólo una variable como aproximación.

Los diversos estudios realizados durante los 1970s se orientaron a la clasificación de numerosos taxa de acuerdo a su sensibilidad o también a la tolerancia a la contaminación, de tal modo que varios índices de diatomeas han sido desarrollados y aplicados a importantes organizaciones (redes) hidrográficas (Prygiel, 1991). Entre los diferentes índices reconocidos y probados se encuentran:

- Índice Específico de la Sensibilidad a la contaminación (SPI) (Prygiel, 1991).
- Índice de Diatomeas de DESI y Coste (CEC), (en Prygiel, 1991).
- Índice genérico de diatomeas (GDI), (en Prygiel, 1991).

El primer índice ha tenido la ventaja tomar en cuenta el *quasi*-total de especies presentes en las muestras. El índice CEC se ha manejado para compensar su desarrollo, ya que el objetivo de un trabajo de observación es aparte de todo ser capaz de apreciar la evolución de la calidad hidrobiológica de un año al siguiente. El uso de esos dos índices permite por un lado, aumentar y fundamentar la información recién adquirida y por otro, hacer comparaciones de diferentes tiempos con resultados previos. Los resultados obtenidos por esos índices son muy similares (Prygiel, 1991).

DeNicola (1996, en Potapova, 2002) revisa estudios autoecológicos y de campo de los efectos de la temperatura en diatomeas de agua dulce. Él concluyó que la “relativa importancia de dicho parámetro en la distribución geográfica es desconocida”, a pesar de la relativamente abundante información existente sobre los requerimientos de muchas especies de diatomeas, así como de los patrones temporales y de distribución espacial de especies dentro de ríos individuales o líneas divisorias de aguas. Aunque Pienitz *et al.* (1995), Weckström *et al.* (1997), y Rosén *et al.* (2000), (en Potapova, 2002) sucesivamente usan asociaciones de diatomeas para inferir la temperatura del agua en lagos, ésta es raramente tomada como una variable ambiental importante en una base de datos regional debido a que es raro que varíe en una región más que algún otro factor, o se correlaciona

con otros factores ambientales y sus efectos son difíciles de separar (en Potapova, 2002). De la amplia escala geográfica, un pronunciado efecto de la temperatura puede ser especulado por la variación del clima.

Se ha acumulado Información substancial de diatomeas bentónicas de los ríos de Estados Unidos de América desde los últimos años del siglo XX. En 1950-1970, (Potapova *et al.*, 2002). Los mismos autores realizan una investigación en la que el objetivo fue proveer una base para desarrollar bases métricas de diatomeas a fin de evaluar calidad de agua y en particular la eutrofización, y se afirma que el moderno uso de diatomeas como indicadores de condiciones ambientales es basado en el desarrollo de traslado de funciones, usando una variedad de procedimientos numéricos. Ellos analizan los datos para USGS, National Water Quality Assessment (NAWQA) Programe, examinan a escala nacional y regional grupos de diatomeas bentónicas a través de ríos en Estados Unidos de América y la relativa importancia del cambio ambiental y los factores geográficos que afectan su composición. También discuten las implicaciones de los modelos para el uso de las diatomeas como indicadores de la calidad del agua, en particular por el enriquecimiento de nutrientes. Asimismo, suponen que la ocurrencia de las diatomeas es limitada principalmente por características ambientales como el clima, la temperatura o la alcalinidad y no por factores geográficos que limitan o dirigen la dispersión. Utilizan datos para 2735 ejemplares bentónicos colectados de 1993 a 1998 de 897 sitios muestreados. Los datos incluyen hidrología, química del agua, características físicas del agua y uso del suelo. Del total de los taxa, 87 se muestran como preferentes del hábitat planctónico y son excluidas de análisis adicionales. Los resultados de los 2735 ejemplares registrados manifiestan gran heterogeneidad. Los diagramas del análisis de correspondencia (DCA) muestran centros de ecoregiones y especies en el espacio ordinario del primero y segundo ejes. Las especies de diatomeas expresaron máxima abundancia en las muestras de ecoregiones en el lado derecho del diagrama del análisis de correspondencia, y muestran preferencia por sedimentos cenagosos y alta alcalinidad del agua. Los ejemplos incluyen *Nitzschia reversa*, *N. Capitellata*, *N. Agnita*, *Craticula accomoda*,

Pleurosigma salinarum y *Tryblionella levidensis* entre otras. La separación de ecoregiones y especies a lo largo del primer eje indica que esto es más probable que se asocie con el gradiente subyacente de pendiente, la velocidad de la corriente y la temperatura del agua. Sus análisis muestran que en cualquier escala espacial había especies con distribuciones desiguales, no fácilmente explicadas por factores ambientales. Otra parte de ello es debido a la autocorrelación espacial, o la influencia de sitios geográficamente cercanos para tener la flora similar (en Potapova y Charles, 2002).

De esta última investigación, los autores indican que las diferencias en la composición de especies entre las áreas geográficas son causadas no sólo por variación ambiental, sino que también por procesos históricos de dispersión y colonización de especies, además de las dificultades en la aplicación uniforme de métodos para evaluar la calidad del agua. Las diatomeas que son identificadas como especies de las floras más comunes, pueden separarse realmente de especies biológicas con diferentes requerimientos fisiológicos. Las posibilidades de que esas especies “crípticas” habiten diferentes áreas geográficas son elevadas porque es más alta la frecuencia de especiación alopátrica, comparada con la especiación simpátrica. Tomando en cuenta esta consideración, se recomienda que las bases métricas de diatomeas sean desarrolladas primero para áreas geográficas limitadas; con las características ambientales más uniformes posibles. Finalmente se concluye que la relativa contribución espacial contra factores ambientales decrece con la extensión geográfica de los datos tomados. El efecto de los factores individuales que constituyen gradientes ecológicos complejos pueden ser una dificultad para interpretar. Se sugiere el desarrollo de bases métricas de diatomeas para estimación de nutrientes en áreas geográficas limitadas.

En un trabajo desarrollado en el Caribe, Moreira *et al* (2005) presentan resultados en el documento titulado “Composición y abundancia del fitoplancton de la Bahía de Cienfuegos, Cuba” en el que estudian el fitoplancton durante el periodo de

octubre de 2003 a diciembre del 2004 en diez estaciones representativas, se registró también en cada una de esas la temperatura, la salinidad y algunos nutrientes. Se encontró que los grupos más diversos son las diatomeas y los dinoflagelados. De las diatomeas, las especies más abundantes son *Thalassiosira* sp., *Cyclotella* sp., y *Thalassionema nitzschioides* con los más altos valores de abundancia fitoplanctónica al final del periodo lluvioso en las áreas cercanas a las descargas de aguas residuales domésticas y en áreas próximas a desembocaduras de ríos, lo que según los autores, demuestra la importancia de estas dos vías en la entrada de nutrientes y materia orgánica al ecosistema.

Un aporte en el estudio del fitoplancton utilizado como indicador de contaminación es llevado a cabo por Veitia *et al.* (2005). En ese se realizó una caracterización tanto cualitativa como cuantitativa del fitoplancton de un muestreo en diciembre del 2003 y junio del 2004 en tres estaciones del río San Juan, Cuba. Se encontró que la mayor diversidad de especies corresponden a las diatomeas y algas verdes, por lo que se clasificó el tramo del cauce como zona de mediana contaminación por la carga de nutrientes orgánicos recibidos.

Otro trabajo en la Bahía de Cienfuegos, Cuba, fue realizado por Seisdedo y Moreira (2005). En ese se monitoreo la calidad del agua a partir de parámetros como salinidad, pH, temperatura, oxígeno disuelto, N – NO₂, N – NH₄, P – PO₄, Si – SiO₄ y abundancia del fitoplancton. El objetivo en ese estudio fue analizar el comportamiento de las características físico-químicas de las aguas y del fitoplancton del lugar para evaluar el estado ecológico de un sistema acuático y encontrar diferencias en abundancia de fitoplancton entre dos periodos climáticos.

La contaminación por metales pesados también ha motivado numerosos estudios de monitoreo que intentan establecer relaciones entre composición de especies de diatomeas y el nivel de contaminación del metal. La mayoría de esos estudios, se basan en la comparación del crecimiento de comunidades en diferentes sitios a lo

largo de fuertes gradientes de contaminación, que permiten la evaluación de los metales en los sitios contaminados (Gold *et al.*, 2002).

En México son escasas las investigaciones en el ámbito de las diatomeas de ambientes lóticos y su influencia en el impacto ambiental. Sin embargo, ya existen los primeros estudios y el presente es parte de éstos. En un primer ejercicio Cantoral *et al.* (1997), llevaron a cabo una investigación en la que el objetivo fue comparar las condiciones ambientales de las diatomeas encontradas en la región fisiográfica de la Huasteca Potosina con estudios previos para un mejor entendimiento del rango de los requerimientos ecológicos de cada especie y evaluar su potencial como indicador ecológico. Como resultado de la comparación de condiciones ambientales entre las especies encontradas en los manantiales estudiados y los reportados en la literatura, integraron un grupo de 39 especies como indicador potencial de uno o más de los parámetros considerados (saprobieidad, temperatura, pH, salinidad). Algunas de esas especies fueron tipificadas como indicadores ecológicos, tales son los casos: *Amphipleura pellucida*, *Cocconeis pediculus*, *C. Placentula*, *Cymbella mexicana*, *C. Muellert*, *Denticula elegans*, *Gomphonema truncatum*, *Gyrosigma acuminatum* y *Nitzschia sinuata*, consideradas como indicadoras de altas concentraciones de carbonato, mientras *Achnantes inflata*, *Cocconeis placentula*, *Cymbella cymbiformis*, *C. Tumida*, *Diplones elliptica* y *Terpsinoe musica*, como indicadoras de bajo contenido de materia orgánica (en Cantoral, 1997). De esas especies, las siguientes han sido reportadas como indicadoras de agua con alta conductividad: *Amphora copulata*, *Cymbella muelleri*, *C. tumida*, *Diploneis ovalis*, *Pinularia viridis* y *Surirella linearis* var. *helvetica* son ejemplos (en Cantoral, 1997), mientras que *Amphipleura pellucida*, *Cymbella cymbiformis* y *Rhopalodia gibba* corresponden a aguas no contaminadas (Aboal 1989^a, 1989b, en Cantoral, 1997).

Particularmente en la parte central de la República Mexicana, donde los índices de contaminación urbana son elevados, Bojorge y Cantoral (2005), realizaron una investigación de diatomeas elípticas como indicadoras de la calidad del agua en el

río Magdalena en México, Distrito Federal, en el que se evaluaron dos estaciones en suelo conservado y dos en una zona urbana. Se utilizaron como parámetros el número de especies y la abundancia de diatomeas, además de factores físico-químicos. Al aplicar el análisis de correspondencia canónica, éste revela que la concentración de nutrientes se relaciona con la abundancia de especies y da lugar a la formación de dos grupos: 1) uno compuesto por *C. silesiaca*, *R. abbreviata*, *F. capucina*, *N. cryptocephala*, *N. subryncocephala*, *G. parvulum*, *C. placentula*, *R. sinuata*, todas éstas, características de aguas con baja concentración de nutrientes. 2) Al segundo grupo lo representan las especies de *N. inconspicua*, *N. palea*, *A. lanceolata* y *A. minutissima*; que son tolerantes a concentraciones elevadas de nutrientes.

Particularmente en Michoacán, Gajón (2005) llevó a cabo una investigación en el Río Chiquito, el cual atraviesa la ciudad de Morelia. En ese se tomaron muestras de 15 estaciones a lo largo del cauce, con el objetivo de describir la taxonomía y distribución de las diatomeas presentes en el río. En ese trabajo Gajón elaboró una relación de las especies y su hábitat preferente tomando en cuenta distintos parámetros como acidez, cloruros, dureza total, sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), fósforo reactivo, fósforo total y nitritos. Se concluyó que existe una relación directa entre los parámetros químicos y las especies encontradas, de las cuales las más características son *Nitzschia amphibia*, *N. supralitoreia* y *Achnanthes minutissima*, además de que la mayor diversidad se registra en la zona con niveles medios de eutrofización y la más baja en las zonas con elevada concentración de nutrientes; el mayor problema lo constituye la cantidad de aguas residuales que recibe este río.

3. JUSTIFICACIÓN

En diversas partes del mundo se han aplicado una gran variedad de análisis, técnicas y recursos para la evaluación de la calidad del agua. El río Lerma no es la excepción, como se mencionó anteriormente; al ser uno de los ríos más importantes de la República es también uno de los más estudiados y monitoreados, sin embargo, existe una necesidad continua de implementar nuevos y mejores métodos para monitorear el estado del ambiente acuático (Kelly y Whitton, 1995). Algunos de esos métodos ya están en uso y otros requieren de más desarrollo para poder utilizarlos confiablemente. No obstante, de acuerdo con Israde (1999), los indicadores de mayor precisión son aquellos de carácter biológico debido a que éstos reflejan el estado del ambiente en que se encuentran.

La calidad de un sistema acuático no siempre es evaluada con certeza a través de análisis químicos, debido a que los trabajos llevados a cabo sobre cuerpos de agua se centran en estudios de animales como aves, peces o mamíferos y se deja en segundo plano a las plantas y algas (Cantoral y Aboal, 2001). El biomonitoreo refleja condiciones puntuales del sitio en el que es tomada la muestra, al igual que la evaluación química, pero además los organismos dan información de la situación pasada (Del Toro *et al.*, 2003).

Las diatomeas son consideradas indicadoras ecológicas gracias a las propiedades descritas; ellas responden sensiblemente a los cambios del ambiente y reflejan el estado en que se encuentra el cuerpo de agua. Otros factores importantes para establecer indicadores de calidad del agua a partir de la distribución de las diatomeas, son la geografía y el medio ambiente local (Potapova y Charles, 2002). Un elemento atractivo en el estudio de las diatomeas con fines ambientales es su resistencia a la abrasión o desintegración. Las diatomeas son particularmente manejables debido a sus paredes celulares de sílice, por lo que raramente son dañadas. De acuerdo con Del Toro *et al.*, (2003) usar diatomeas como indicadoras de calidad del agua, tiene algunas ventajas específicas como:

- a) son cosmopolitas,
- b) algunas de las especies son altamente sensibles a cambios ambientales y otras son tolerantes,
- c) son sensibles a los cambios ambientales en periodos de tiempo largos o cortos,
- d) el muestreo es fácil, rápido y en grandes cantidades sobre pequeñas superficies,
- e) el material usado para el muestreo puede ser reutilizado (Del Toro, *et al.*, 2003).

Por esta razón se analizan en este trabajo las características morfológicas de especies diatomáceas colectadas en diferentes puntos del río Turbio, para su clasificación y comparación con especies identificadas en diferentes ambientes de otras partes del mundo. Con ello se pretende evaluar la calidad del agua del río Lerma y dar la posibilidad de proponer otras formas de tratamiento y manejo de este vital recurso.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Relacionar los factores geográficos, geológicos y ambientales en la distribución de las diatomeas como indicadoras de la calidad del agua del río Turbio.

4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Obtener un inventario taxonómico de las diatomeas a lo largo del río Turbio.
- ❖ Establecer variaciones espaciales y temporales de las comunidades de diatomeas con parámetros físico-químicos.
- ❖ Comparar las condiciones ambientales (rango de requerimientos ecológicos) de las diatomeas encontradas en estudios previos de otras regiones.

5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ❖ ¿Existen cambios en la composición de especies a lo largo del río Turbio?
- ❖ ¿Se observan asociaciones de especies de diatomeas con contaminantes específicos en el río?
- ❖ ¿Hay variación de taxa tolerantes a distintos grados de contaminación?
- ❖ ¿El inventario proyectará las relaciones entre parámetros físico-químicos y especies de diatomeas para poder aplicarlo en otras zonas?
- ❖ ¿Se encontrarán especies endémicas y nuevos taxa?

6. MARCO TEÓRICO

6.1. RÍOS

Al tener una gran diversidad de valores naturales, los ríos constituyen uno de los ecosistemas más valiosos del planeta, además de ser un recurso natural imprescindible para la humanidad, ya que permiten la supervivencia de innumerables seres vivos y también forman parte de la circulación general del agua o ciclo hidrológico. A pesar de que el agua de los ríos es tan sólo un 0.006% del agua dulce total de la Tierra, tiene una relevancia que compensa este volumen. Entre las variadas funciones que cumplen, los ríos erosionan y modelan el paisaje al transportar rocas y sedimentos, los cuales sostienen diversos ecosistemas, sin embargo, su existencia básicamente depende de su propio régimen. El papel principal de los ríos es el modelado del relieve, esto se lleva a cabo mediante tres acciones:

- 1) con una acción erosiva aguas arriba,
- 2) con transporte de materiales arrancados de la cabecera en el curso medio y
- 3) depositando los sedimentos y ganando nuevas tierras aguas abajo.

En la cabecera los ríos labran valles escalonados en forma de “V”, en la cuenca media los procesos de formación de paisajes son el transporte y la criba de los sedimentos principalmente, y en el curso bajo el gradiente disminuye y la sedimentación es el proceso de modelado del paisaje predominante, además de aumentar la cantidad de meandros y formar un delta al llegar a su desembocadura o punto de confluencia.

La corriente de agua, así como las áreas aledañas conforman un ecosistema. El flujo de la energía en estos ecosistemas parte de la energía solar; la fotosíntesis la realiza el plancton microscópico, plantas y algas. La producción primaria la realizan los organismos autótrofos, sin embargo, existen algunos factores que limitan dicha producción, entre éstos se encuentran la disponibilidad de luz, la

temperatura, la intensidad de corriente y de los nutrientes. De éstos últimos el fósforo y el nitrógeno son los más limitantes. Como es de esperar, la producción secundaria en los ríos depende de la producción primaria e influyen además factores como los elementos químicos en el agua y las condiciones ambientales. Cada río tiene la capacidad para regenerarse por sí mismo, sin embargo, éstos han sido utilizados como sumideros de los desechos de la agricultura y de la industria. En las últimas décadas los ríos han sufrido una gran degradación debido a la contaminación industrial, urbana y agrícola, sumada a la demanda del recurso físico por parte de los cultivos, la urbanización y la ejecución de obras de ingeniería en presas, canalizaciones y dragados. Por otro lado cada río tiene también un límite para asimilar todos los elementos provenientes del exterior, al superar este límite, la proliferación de bacterias, algas y vegetales consume el oxígeno disuelto del agua y se destruye todo el ecosistema al interrumpirse las cadenas tróficas.

Entre los diversos usos que el hombre le da a los sistemas lóticos, los principales son la pesca, agricultura, ganadería, turismo e industria, entre otros. De esta manera, la introducción de sustancias ajenas al sistema puede tener graves consecuencias, ya que los ríos presentan alta vulnerabilidad a envenenamiento por productos tóxicos generados por las distintas actividades antrópicas; tales sustancias no sólo destruyen la vida en el momento de la introducción al agua, sino que se acumulan en los sedimentos y suelos de la llanura de inundación.

De acuerdo con todo lo anterior, cualquier proyecto de protección o de restauración en estos sistemas requiere del conocimiento de las interrelaciones principales de todos los componentes que los integran, ya que el objetivo principal debe ser el promover la recuperación o restauración del sistema natural.

6.2. BIOINDICADORES

Tradicionalmente la calidad del agua se mide a través de parámetros fisicoquímicos, éstos nos dan información de las características del ecosistema en el momento en que se toman y no dan una visión de las variaciones del sistema en el tiempo.

Una alternativa para remediar esta limitante y tener una caracterización más apropiada de las condiciones en que se encuentra el sistema son los indicadores biológicos o “bioindicadores”, los cuales presentan ventajas a través del tiempo, además de mostrar las cualidades del medio como tipo de substrato, temperatura, oxígeno disuelto, pH, etcétera. Éstos nos permiten estudiar cambios causados por las perturbaciones ya que los cambios en la estructura comunitaria expresan un efecto actual o pasado sobre el sistema. En un amplio sentido los indicadores de contaminación evalúan la calidad del ecosistema o la condición del ambiente natural a través de información que es monitoreada ya sea en cuerpos de agua, en cuencas atmosféricas o en suelo y permiten identificar dentro de un marco de calidad el nivel de deterioro ambiental (en Garza *et al.*). Es decir, los bioindicadores son especies que presentan sensibilidad o tolerancia a varios parámetros. Odum (1972), define a los organismos indicadores como la presencia de una especie en particular que demuestra la existencia de ciertas condiciones en el medio, mientras que su ausencia es la consecuencia de la alteración de tales condiciones (Vázquez *et al.*, 2006).

Al inicio del siglo pasado, los métodos biológicos para determinar la calidad del agua se desarrollaron en Europa. En los años 50 se aceleró el avance de estos estudios debido a los resultados ofrecidos por plantas y animales como evidencia directa de la contaminación (en Vázquez *et al.*, 2006). De esta manera se encontró que los organismos indicadores de la calidad del agua determinan los efectos de los impactos en el ecosistema acuático a través de un tiempo más prolongado.

El concepto de bioindicador, en la calidad del agua se define como: "especie (o ensamble de especies) que posee requerimientos particulares con relación a uno o un conjunto de variables físicas o químicas, tal que los cambios de presencia/ausencia, número, morfología o de conducta de esa especie en particular, indique que las variables físicas o químicas consideradas se encuentran cerca de sus límites de tolerancia" (Rosenberg y Resh 1993). Los bioindicadores pueden tener un rango de respuesta desde el nivel biomolecular, poblacional y de comunidad.

Según la literatura los bioindicadores deben presentar las siguientes características (Vázquez *et al.*, 2006):

- Encontrarse prácticamente en todos los sistemas acuáticos con los que se podrán hacer estudios comparativos.
- Naturaleza sedentaria, esto permite el análisis de los efectos de perturbaciones.
- Largo periodo de permanencia en el agua para estudiar cambios temporales.
- Sensibilidad a las perturbaciones, lo que los hace responder a ellas de manera rápida.

El uso de bioindicadores ofrece ventajas tales como el bajo costo, resultados rápidos y sobre todo, la posibilidad de proporcionar información acumulativa, integrada y discriminada debido a su capacidad de respuesta frente a las alteraciones del medio, la cual nunca puede ser detectada a través de mediciones física-químicas. Los resultados biológicos generados a partir de los bioindicadores no reemplazan los análisis fisicoquímicos, sino que reduce costos, por lo que estos estudios son importantes en el monitoreo de la calidad del agua (en Vázquez *et al.*, 2006).

Es amplio el conjunto de bioindicadores; sin embargo, la gran mayoría de éstos pertenecen a los niveles más bajos de la cadena trófica, de los cuales depende la continuidad de los demás organismos. Algunos de los organismos empleados

como bioindicadores son: bacterias, fitoplancton, macroinvertebrados bentónicos y peces entre otros. Especialmente importantes son los cambios en la estructura de las comunidades fitoplanctónicas, lo que repercute en el interés socioeconómico del sistema acuático debido a que son productores primarios. Por su sensibilidad a los cambios del ambiente las algas pueden ser un referente del estado ecológico del medio acuático al modificar la estructura de sus poblaciones y al asociarse a determinados aportes. De este grupo las preferidas son las diatomeas ya que son las más dominantes y su identificación resulta relativamente “simple” (Vázquez *et al.*, 2006). En consecuencia, éstas son las más empleadas para el biomonitoreo de ambientes actuales y fósiles.

En sitios en los que ya se emplean bioindicadores en la evaluación de la calidad del agua, comúnmente se utilizan macroinvertebrados como peces, bosques de ribera y los análisis fisicoquímicos. En el ámbito europeo, las diatomeas ya son utilizadas habitualmente como bioindicadores de la calidad del agua de los ríos. Actualmente, la normativa europea exige el empleo de todos los indicadores biológicos (macroinvertebrados, fitobentos, peces, etc) en estudios de calidad medioambiental de sistemas fluviales, y obliga a establecer medidas de restauración del punto estudiado si alguno de los indicadores no se ajusta a los niveles adecuados (Crónica universia).

6.3. DIATOMEAS

De los cinco reinos existentes en la naturaleza las diatomeas pertenecen al protista, éstas son algas pardas, eucariotas, unicelulares, diplontes y autótrofas. Se encuentran en todo ambiente acuático como planctónicas o como bentónicas y tanto en agua dulce como marina, siendo ya algunos géneros solamente fósiles.

Las diatomeas poseen cloroplastos y pigmentos como clorofila a y c, beta caroteno y fucoxantina principalmente. Su tamaño se encuentra entre 2 micrómetros y 0,4 mm. Normalmente la mayoría de ellas son tolerantes a cambios ambientales y a la acción de algunos elementos; sin embargo son muy sensibles a la polución, especialmente al nitrógeno y fósforo. A través de la fotosíntesis incorporan oxígeno, por lo que son consideradas como depuradoras del medio. Las especies centrales forman parte del plancton y las pennales del perifiton. Son varios los factores que influyen en ellas, entre éstos se encuentran la temperatura, pH, nutrientes, velocidad de corriente, disponibilidad de sílice, profundidad y salinidad. Al morir la célula, todo el contenido orgánico se destruye con excepción de las valvas, las cuales perduran gracias a su estructura silíceo y se depositan al fondo del cuerpo de agua, formando depósitos de diatomita. Constituyen el grupo más importante del fitoplancton debido a que contribuyen con cerca del 90% de la productividad de los sistemas.

La membrana celular de las diatomeas se compone principalmente pectina fuertemente impregnada en sílice. El caparazón silíceo en forma de caja de petri (Figura 1) cuenta con dos valvas y se denomina frústulo el cual puede constituir hasta el 95% del total de su peso. Cada parte o teca encajan una en la otra como la tapa y el fondo de la caja. En cada teca se distingue una parte plana o valva y una pieza lateral pleura o banda conectiva que, en la zona de yuxtaposición con la correspondiente a la otra teca, forma el cingulo.

A la teca superior se le denomina hepiteca y a la inferior hipoteca, a cada borde de las semitecas (pleuras) se denominarán respectivamente epipleura y hipopleura.

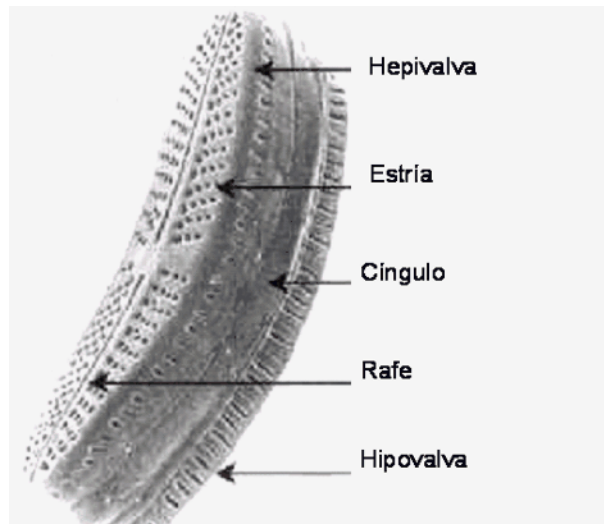


Figura 1.- Partes de una diatomea

En los frústulos de las diatomeas es común la presencia de ornamentaciones (areolas, poros, estrías paralelas o entrecruzadas, bandas y estructuras accesorias o externas como membranas, setas, espinas, que sirven para la unión en cadena), los poros alineados en filas radiales permiten la comunicación con el exterior para tomar las sustancias que necesita para su alimento o para su respiración.

Existen dos grupos de diatomeas de acuerdo a su simetría:

- Simetría radial: **Orden Centrales**. Simetría más o menos radiada, circulares vistas de frente, poseen una ornamentación radial o dispuesta concéntricamente (simetría axial) y carecen de rafe o pseudorafe, consecuentemente son inmóviles. También existen espinas y apéndices externos, así como bandas intercalares en la región del cíngulo.

- Simetría bilateral: **Orden Pennales.**

Son de valvas alargadas en forma de huso, con simetría bilateral y la mayoría son móviles gracias la presencia de un rafe.

El rafe es un órgano no silisificado que puede ser recto, ondulado o sigmoide, a través del cual el movimiento ondulatorio del plasma en el interior de la célula se transmite al exterior reaccionando sobre un soporte que mueve a la diatomea. En algunas especies el rafe se encuentra dentro de un canal denominado quilla. Generalmente, el rafe se encuentra en ambas valvas (diatomeas birráfidas), pero puede estar solamente en una de ellas (diatomeas monorráfidas) o faltar del todo (diatomeas arráfidas). En las diatomeas pennales que no tienen rafe existe un área clara entre las series de estrías o de costillas que se denomina pseudorrafe sin embargo, solo las diatomeas provistas de rafe son capaces de desplazarse.

Reproducción

En las diatomeas existe tanto la reproducción asexual como sexual. El sistema asexual es el más importante y efectivo cuando de lo que se trata es de colonizar rápidamente un nuevo sustrato. Se da por medio de bipartición siendo el sílice un elemento fundamental en la reproducción de las células. La valva externa contiene en su interior a la otra, que es más pequeña, cuando la diatomea divide en dos su célula estas valvas se separan y cada una de ellas con su contenido citoplasmático da lugar a un nuevo organismo regenerando la media valva que le falta, siendo siempre la interna la regenerada.

Mediante la bipartición se da lugar a dos series de células hijas en cada generación; una mantiene el tamaño original y la otra de talla progresivamente decreciente. Sin embargo, este problema se resuelve por medio de reproducción sexual que además, permite la variabilidad genética. La reproducción sexual se lleva a cabo por medio de meiosis dando lugar a cuatro estructuras haploides y los

zigotos formados finalmente son diploides. En las diatomeas céntricas se da la oogamia y en las pennales se da anisogamia. Tras la fusión de gametos se forma la auxospora que aumenta de tamaño tras la fusión.

De acuerdo con el doctor Jaime Cambra, miembro de los Centros Especiales de Investigación en Biodiversidad Vegetal (CERBIV), en Ecología y Gestión del Agua (CEREGA) de la Universidad de Barcelona, “a nivel del fitobentos, las diatomeas son unos excelentes sensores naturales de la calidad ambiental del medio” (Crónica universia).

7. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Lerma-Chapala tiene unos 54,300 Km² (Wester *et al.*, 2004 en Martínez, 2004) y está situada al centro de México. La cuenca se encuentra en cinco estados del país: Querétaro (5%), Guanajuato (44%), Michoacán (28%), México (10%) y Jalisco (13%). El río Lerma corre desde el este de la cuenca, de la ciudad de Toluca con una elevación de 2,600 msnm, al oeste de la cuenca terminando en el lago de Chapala con una elevación de 1,500 msnm.

La cuenca limita al norte con cuencas de la misma Región Hidrológica Lerma-Santiago, al sur con la Región Hidrológica número 18 Balsas, al este y noroeste con la Región Hidrológica número 26 Pánuco y al oeste con la Cuenca Hidrológica del Río Santiago (SEMARNAT, 2003).

De acuerdo con SEMARNAT (2003), la zona hidrológica Lerma-Chapala se divide en diecinueve cuencas hidrológicas:

- | | |
|----------------------|----------------------|
| a) Río Lerma 1 | k) Río Turbio |
| b) Río La Gavia | l) Río Angulo |
| c) Río Jaltepec | m) Río Lerma 5 |
| d) Río Lerma 2 | n) Río Lerma 6 |
| e) Río Lerma 3 | o) Río Duero |
| f) Río La Laja 1 | p) Río Zula |
| g) Río Querétaro | q) Río Lerma 7 |
| h) Río La Laja 2 | r) Lago de Pátzcuaro |
| i) Laguna de Yuriria | s) Lago de Cuitzeo |
| j) Río Lerma 4 | |

La Comisión Nacional del Agua define la localización, límites y la extensión geográfica de las cuencas en base a información y estudios técnicos con resultados descritos geográficamente en el Plano Oficial denominado Zona Hidrológica Río Lerma Chapala 12ª, de la Comisión Nacional del Agua SEMARNAT, 2003).

La cuenca del río Turbio se encuentra localizada en el extremo noroeste del Estado de Guanajuato, con una superficie de poco más de 4000 Km². Inicia en la sierra de Guanajuato en la parte norte de León hasta su unión con el Río Lerma e incluye varios poblados como las ciudades de León, San Francisco del Rincón, Manuel Doblado, Cuerámara, Pénjamo, Abasolo (Martínez *et al*, 2005) y Pastor Ortiz ya en el Estado de Michoacán (Figura 2).

La cuenca del Río Turbio tiene una extensión de 4000 kilómetros cuadrados aproximadamente y se encuentra geográficamente ubicada en el centro del país, dentro del cuadro de coordenadas 20°30' y 21°20' latitud norte y 101°30' y 102°20' longitud oeste, delimitada al norte por la Cuenca de Río Verde, al sur y al este por la Cuenca Río Lerma 5 y al oeste por las cuencas Río Verde y Río Zula (SEMARNAT, 2003).

El Río Turbio tiene su origen en el cerro de San Juan, con dirección suroeste, atraviesa la ciudad de León y cambia de dirección hacia el este en las inmediaciones de Manuel Doblado hasta llegar a la estación hidrométrica Las adjuntas con varios aportadores por ambas márgenes a lo largo de su trayecto (SEMARNAT, 2003).

El río Turbio se sitúa al noroeste del estado de Guanajuato, en el área que corresponde a la región Medio Lerma (Figura 2). Colinda al norte y al poniente con el Estado de Jalisco, al oriente con los valles de León y Silao y al sur con el valle de Pénjamo. Se encuentra fisiográficamente ubicado dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano, el cual cuenta con un sistema de bloques afallados y

basculados con dirección WSW-ESE, rodeando a una depresión central. Son varios los elementos estructurales y volcánicos regionales que controlan tanto geológicamente como hidrogeológicamente el funcionamiento del río Turbio, estos elementos son: Meseta León-Guanajuato, Sierra de Pénjamo y el Graben de Penjamillo cuya continuación puede estar influenciando estructuralmente la orientación y geometría del valle del Río Turbio (CNA, 2002).

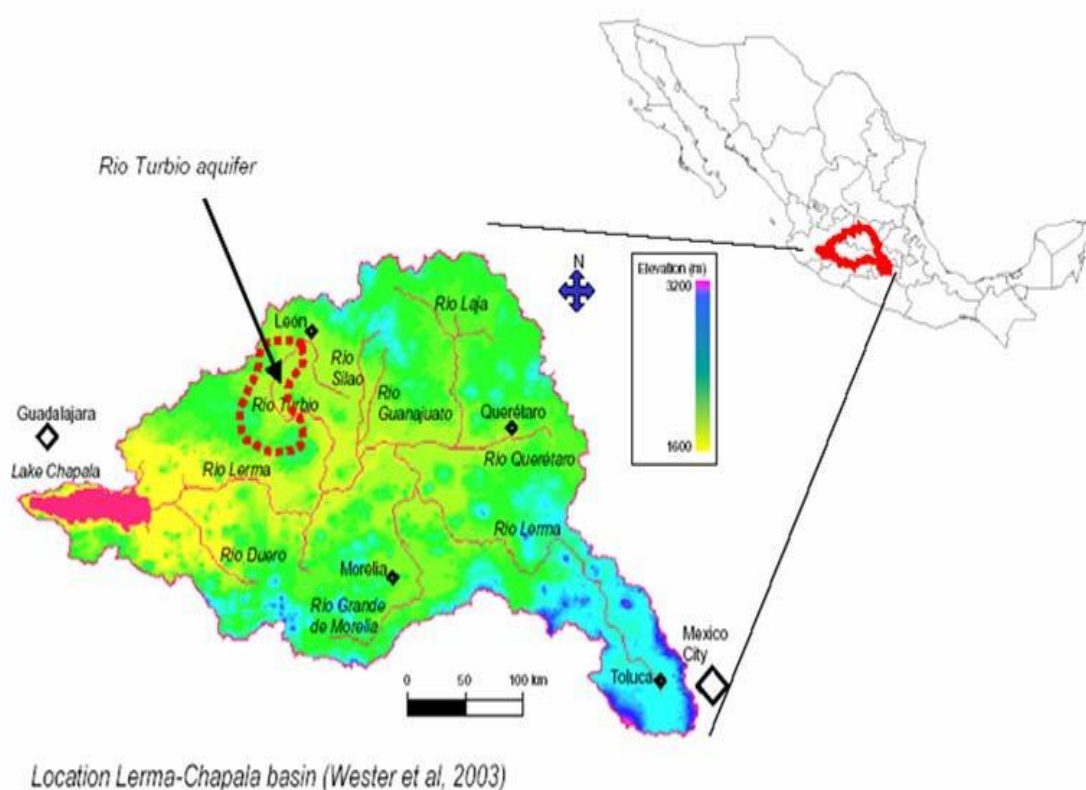


Figura 2.- Cuenca Lerma-Chapala

CLIMA

De acuerdo a la clasificación de climas de Köpen, modificado por García, el clima predominante de la zona es seco a árido, con lluvias en verano.

La precipitación media anual se acerca a los 670 mm en temporada de lluvias durante los meses de junio a septiembre (CNA, 2002).

GEOLOGÍA

La cuenca del Río Turbio se encuentra entre las provincias geológicas del Cinturón Volcánico Transmexicano y el Altiplano Mexicano, éste influenciado por el vulcanismo de la Sierra Madre Occidental, controlado geológica e hidrogeológicamente por la Meseta León-Guanajuato, la Sierra de Pénjamo y el Graben de Penjamillo.

Según Martínez *et al.* (2005), destacan dos conjuntos litológicos principales; el más antiguo aflora a lo largo de la Sierra de Guanajuato, constituido por un complejo plutónico y metasedimentario de edad mesozoica. Incluye Conglomerados Rojos del Terciario Inferior. Al segundo conjunto lo representan rocas volcánicas y sedimentos granulares del Terciario Medio al Cuaternario, que cubren toda la parte centro y sur del área. A la Sierra de Guanajuato la afectan fallamientos inversos NW-SE, por esfuerzos compresionales de dirección SW-NE. Las estructuras Terciarias presentan fallas de tipo normal NW-SE, NE-SW WNW-ESE; ENE-WSE y N-S, principalmente. Rocas riolíticas, andesíticas y basálticas, del Terciario Medio, Superior y Cuaternario, predominan en el centro y sur de la subcuenca, dichas rocas pertenecen al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental y a la Faja Volcánica Mexicana. Estos materiales volcánicos son cubiertos e intercalados con sedimentos granulares de edades que van del Terciario Superior al Reciente. Debido a cabalgaduras y fallamientos normales, son difíciles las relaciones estratigráficas entre las unidades mesozoicas. Se encuentran afectadas por intrusivos terciarios de composición granítica y gabróica (Martínez *et al.*, 2005).

De acuerdo con la CNA (2002), existen por lo menos seis unidades litológicas de origen continental con características estratigráficas particulares, correspondientes en su mayoría a rocas volcánicas con un rango estratigráfico del Oligoceno al Reciente. Dichas unidades son:

Ignimbritas Del Oligoceno-Mioceno

Esta unidad ocupa la mayor distribución en el área, aflora al sur y al poniente de Manuel Doblado constituyendo amplias mesetas. Al oriente se observan cantiles y mesetas basculadas hacia el oriente y conformando hacia el sur la Sierra de Pénjamo. Estas rocas están consideradas, de acuerdo a su posición estratigráfica y a la correlación regional, pertenecientes al Oligoceno-Mioceno y forman parte de la Sierra Madre Occidental.

Basalto o Andesita Basáltica Indiferenciada

En una parte de la cuenca, específicamente en la Cañada de Negros, se encuentra un basalto alterado y deformado con abundante fracturamiento, al que le subyace un gran paquete de rocas piroclásticas y brechas deformadas. A esta unidad, por su posición estratigráfica, se le asigna una edad del Mioceno.

Conglomerado Xoconoxtle

Este conglomerado se encuentra distribuido desde la región del Xoconoxtle hacia el oeste de San Miguel de Allende, Guanajuato.

En la parte norte de esta unidad se han identificado paquetes de piedra pómez, tobas limo-arenosas con horizontes de material depositados en un medio acuoso.

Al suroeste de San Francisco del Rincón, existe una secuencia continental conglomerática de abanicos aluviales y depósitos fluviales, constituidos por clastos de ignimbrita en una matriz arenosa y con un basculamiento de 24° aproximadamente al NE, por efecto de una falla con dirección N-S. Se considera una edad del Mioceno para esta unidad.

Secuencia Máfica del Río Santiago

Ésta consiste de una secuencia de flujos de lava basáltica con intercalaciones de depósitos aluviales y lacustres. La edad asignada a esta unidad por datación radiométrica es de 10.2 millones de años con un espesor de 250 metros aproximadamente. La unidad se extiende hacia la región occidental del área de estudio; constituye la parte baja del Graben de Jalpa.

Basaltos del Plioceno

Esta unidad es la que corona las partes altas del área de estudio con varias unidades de composición basáltica afectadas por fracturas subhorizontales y verticales, cubriendo a las unidades más antiguas.

Conos de Escoria y derrames de Lava del Cuaternario

Consiste en una serie de estructuras volcánicas como conos de escorias morfológicamente bien conservados, constituidos por una alternancia de materiales del tipo de escorias de caída y derrames de lava que afloran al noroeste de la zona de estudio.

Aluvión

Es la unidad más joven de nuestra zona y es la que rellena las partes bajas de la misma. Dependiendo de la región de aporte y los diversos cambios que presenta el Río Turbio, presenta gravas, arenas y arcillas.

Se desarrollan amplios abanicos aluviales, constituidos esencialmente por conglomerados en las partes cercanas a las sierras circunvecinas. Canales de corte y relleno, meandros abandonados, planicies de inundación y depósitos lacustres constituyen las partes centrales de la región. Dos sistemas de fracturamiento y/o fallamiento influyen fuertemente al valle del Río Turbio; por un lado el sistema N-S cuya orientación configura de manera importante la geometría del valle y controla la sedimentación continental, desarrollando abanicos en dirección este-oeste. Ha tenido varias fases de reactivación por ser

una estructura antigua, sin embargo, la más importante ocurre durante el Plioceno, al ser verificada una etapa distensiva provocada por la tectónica “Basin and Range” a partir de la cual se desarrolla el modelo sedimentario continental de esta parte del territorio (CNA, 2002).

La red de drenaje conforma sistemas dendríticos siendo comunes los sistemas radiales a lo largo de los pocos conos que se encuentran en la cuenca del río Turbio éstos con matorrales y pastos como vegetación característica. A lo largo del río se observan cambios en la vegetación riparia que están asociados directamente a la geología, geomorfología y superpuestos al uso del suelo.

8. METODOLOGÍA



Figura 3.- Diagrama de la metodología utilizada en el presente estudio.

8.1. TRABAJO DE CAMPO

Se realizaron dos 3 salidas a campo para coleccionar el material a ser analizado, así como el reconocimiento de campo de las diferentes características del paisaje, roca, relieve, suelos, cobertura y uso del suelo. La primera salida se llevó a cabo en época de secas y la segunda al terminar el período de lluvias, todo ello para tener un registro más exacto y confiable de los resultados obtenidos. La tercera salida se realizó en época de secas para corroborar los datos tomados en las dos salidas anteriores.

Selección de sitios de muestreo

Se eligieron 10 sitios de colecta relacionados con posibles fuentes de contaminación puntuales y difusas incluyendo un manantial (Figura 4). Las fuentes de contaminación puntuales son aquellas de zonas en cambios de afluentes cloacales, descargas industriales y/o domésticas y basureros. Las fuentes de contaminación difusas, son las aguas que llegan por arrastre de zonas más alejadas o por percolación de soluciones de herbicidas y plaguicidas que provienen de áreas agropecuarias y se relacionan con los drenajes (Gajón, 2005).

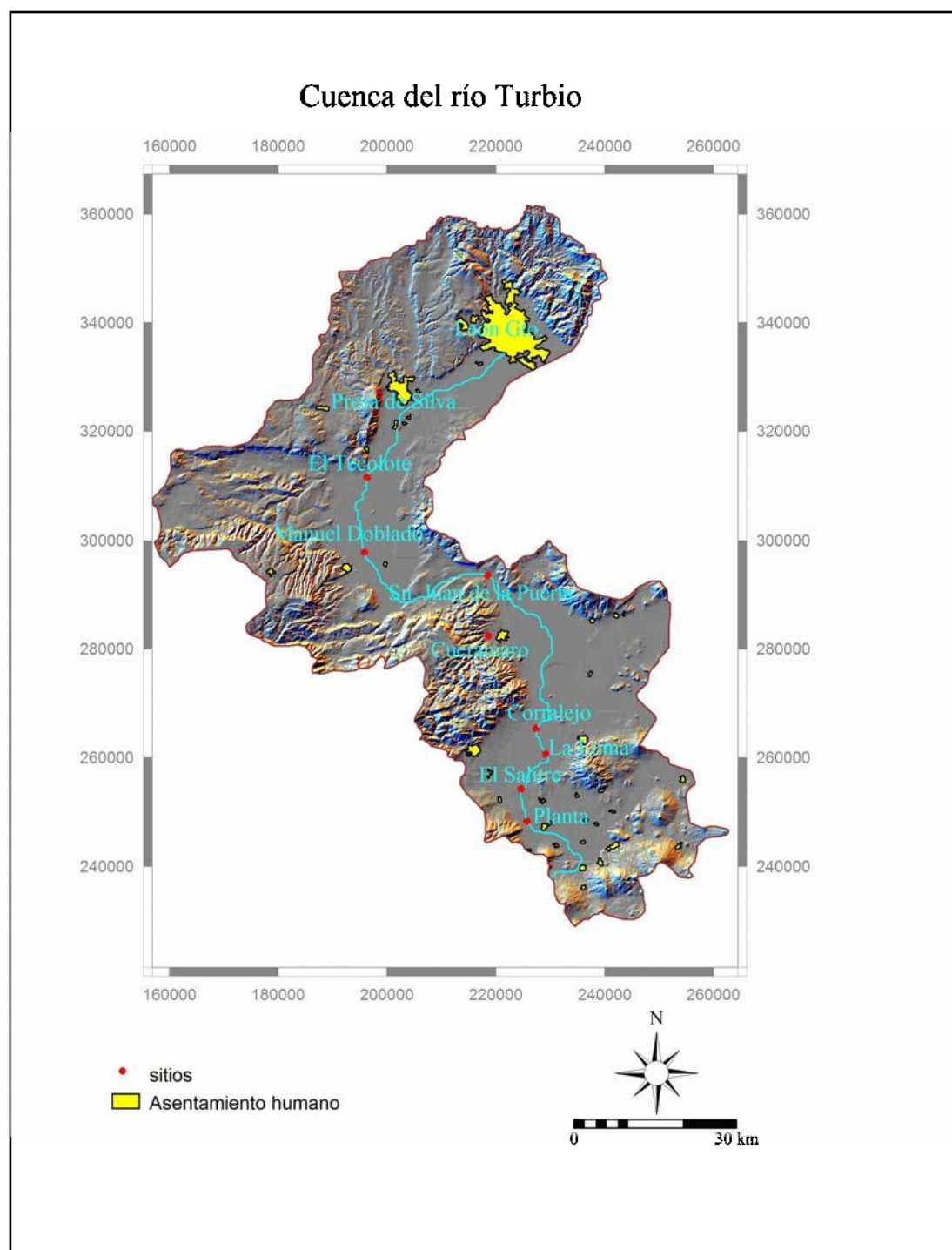


Figura 4. Localización de sitios de muestreo

Muestreo de roca

Se toma una muestra de roca representante del afloramiento más cercano al sitio de muestreo, se etiqueta y se transporta al laboratorio petrográfico para ser procesada y observada al microscopio en láminas delgadas con el propósito de determinar la relación que existe entre el tipo de roca y la calidad del agua.

Obtención de las muestras de diatomeas

Para obtener las muestras de diatomeas se sigue el criterio de Rumeau & Coster (1988). Dicho criterio consiste en la técnica efectuada en superficies duras *in situ*:

- 1) Seleccionar un clasto que reciba luz solar, sometido a constante fricción con el agua y debe medir 10 cm³ como mínimo,
- 2) Ya que fue seleccionada la roca, se moja un cepillo dental para raspar en forma circular la roca ejerciendo una fuerza media,
- 3) El raspado debe ser depositado en un frasco de 25 ml,
- 4) El frasco debe llenarse con el cepillado a la roca tantas veces sea necesario,
- 5) Para asegurar calidad y representatividad, se recomienda elegir dos o tres rocas para raspar,
- 6) La muestra se etiqueta con datos de campo: fecha, localidad, colector, tipo de muestra, número de muestra.

Muestreo de agua

Estos parámetros se analizan en muestras de 2 litros de agua tomados en cada estación, las cuales deben permanecer en frío para que no sean alterados los resultados. Para ello cada muestra es colocada en hielo y es refrigerada hasta su análisis.

Determinación de parámetros físico-químicos *in situ*

Se lleva a cabo una caracterización físico-química del agua de cada estación o sitio muestreado considerando los siguientes parámetros:

- temperatura del agua
- pH
- oxígeno disuelto
- conductividad eléctrica
- sólidos totales disueltos

La determinación de los parámetros se hizo por medio de un equipo marca HACH, modelo sension156.

8.2. TRABAJO DE LABORATORIO

Limpieza de diatomeas

La limpieza del material recolectado se realiza de acuerdo con la técnica establecida por Kelly (1998), para muestrear superficies duras *in situ*, ésta consta de los siguientes pasos:

- 1) Etiquetar los vasos de precipitado con cada uno de los sitios muestreados.
- 2) Verter la muestra a los vasos de precipitado correspondiente.
- 3) Agregar 20 ml de peróxido de hidrógeno al 30 %.
- 4) Colocar todas las muestras a calentar a temperaturas menores a 100° C sin dejar hervir hasta que se produzca la evaporación.
- 5) Agregar 20 ml de ácido clorhídrico a cada muestra.
- 6) Agregar 20 ml de 5 en 5 de ácido nítrico a cada muestra.
- 7) Calentar hasta que el sedimento tome un color blanco.
- 8) Verter agua destilada en cada vaso hasta aforar.

- 9) Al siguiente día, ya que el sedimento se encuentra bien asentado, decantar y aforar nuevamente con agua destilada para lavar.
- 10) Repetir el paso anterior hasta que el agua esté cristalina y con un pH neutro.
- 11) Montar las muestras en una resina con un alto índice de refracción (Nafrax R.I~1.7+).

Análisis químicos

La mayor parte de los análisis fueron realizados en el laboratorio del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, de la Universidad Nacional Autónoma de México con un espectrofotómetro de laboratorio (HACH) modelo DR/2500, estos fueron:

- ❖ Nitritos
- ❖ Nitratos
- ❖ Fósforo
- ❖ Amonio
- ❖ Clorofilas

Se utilizó la muestra de 500 ml tomada en cada sitio de muestreo del río Turbio. De estos 500 ml, se filtraron 200 ml con una membrana de $.45\ \mu$, para analizar la cantidad de nutrientes (amonio, fósforo, nitritos, nitratos) y la membrana se usó para medir la cantidad de clorofilas en cada estación.

Los 300 ml sobrantes de la muestra, se utilizaron para analizar alcalinidad y sólidos totales. Para esto, se utilizaron las técnicas de volumetría y diferencia de peso respectivamente. Este proceso también se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM en la ciudad de México.

El DQO se analizó en el laboratorio de la Facultad de Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y los análisis para metales pesados se

llevaron a cabo en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Departamento de Geología con un ICP de masas.

Láminas delgadas

Se realizaron láminas delgadas para determinar la constitución mineralógica de las unidades litológicas sobre las que el río corre. El procedimiento para obtener láminas delgadas es el siguiente:

- Se corta la roca en trozos pequeños de 5 x 2.5 cm.
- Se adhieren a un portaobjetos con resina termoplástico.
- Se devastan por medio de discos de diamante de diferentes tamaños de granos hasta obtener una superficie tipo espejo y un espesor aproximado de 10 μm .

8.3. TRABAJO DE GABINETE

Inventario de diatomeas

Antes de realizar el conteo se determinan las especies existentes para cada sitio de muestreo por medio de fotografías en un microscopio óptico marca Olympus modelo BX50 con un objetivo de 100X y con una cámara digital adaptada al microscopio.

Conteo de diatomeas

El conteo se lleva a cabo mediante el microscopio referido anteriormente. Si la muestra lo permite se toma en cuenta un mínimo de 400 valvas por lámina que permitan definir variedades morfológicas de la misma especie.

Procesamiento de datos químicos y fisicoquímicos

Una vez obtenidos los resultados de los análisis químicos, se conjuntan con los parámetros físico-químicos para realizar gráficos y tablas que son posteriormente interpretadas para obtener información sobre su efecto en la zona de estudio.

Observación de láminas delgadas (Análisis petrográfico)

El análisis de los minerales constituyentes de las unidades litológicas se lleva a cabo por medio de un microscopio petrográfico marca Olympus, modelo--- con filtros de nícoles cruzados y normales que permiten distinguir diferentes especies minerales y determinar el efecto de la roca sobre la química del agua.

Análisis espacial

Para llevar a cabo esta parte del trabajo, se utilizó información generada por el INEGI. Se integraron datos geográficos correspondientes a la geología, topografía, edafología, cobertura vegetal y uso del suelo para la creación final o diseño de cada una de las cartas de la cuenca del río Turbio.

Los datos topográficos e hidrográficos se utilizaron para interpretar el parteaguas de la cuenca. El resto de las bases de datos temáticas fueron recortadas al límite de la cuenca del río Turbio. La integración y caracterización geográfica se realizó en un Sistema de Información Geográfica (SIG) denominado ILWIS (Integrated Land and Water Information System) (ILWIS) 2005. También se integro la distribución espacial de los sitios a la base de datos geográfica.

Análisis estadístico

Por medio del software especializado JMP, versión 3.2.2, se realizó el análisis estadístico de:

- **Cluster** para determinar grupos de localidades de acuerdo a los parámetros físico-químicos y diversidad de especies.

Por medio de este análisis se relacionan los parámetros fisicoquímicos, químicos, metales pesados y diatomeas, se forman grupos de localidades de acuerdo con el grado de similitud entre éstos.

- **Análisis de componentes principales (ACP)** para comprender las relaciones existentes entre parámetros físico-químicos, especies y localidades.

El análisis de componentes principales muestra en un diagrama varios ejes con ecoregiones formadas por las estaciones que poseen características semejantes de los valores de parámetros fisicoquímicos, químicos o de diversidad de especies, de este modo se sabe que factores intervienen en el establecimiento de comunidades de diatomeas en cada sitio a lo largo del río Turbio.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. ANÁLISIS ESPACIAL

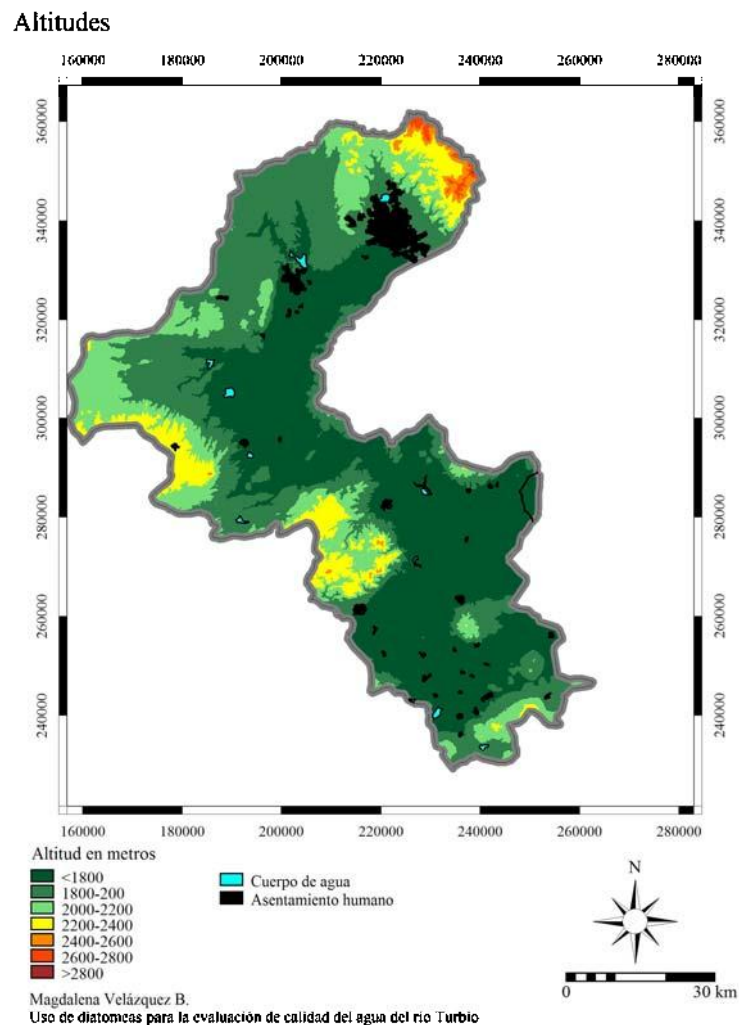


Figura 5. Mapa de altitudes de la cuenca del río Turbio

En una clasificación de siete clases para el mapa de pendientes (Figura 5), resulta dominante la primera, que corresponde a menos de 1800 msnm, ya que la mayor parte del área es planicie, de la parte media hacia el noroeste dominan las altitudes entre 1800 y 2000 msnm y en mucha menor proporción, altitudes por arriba de los 2000 m.

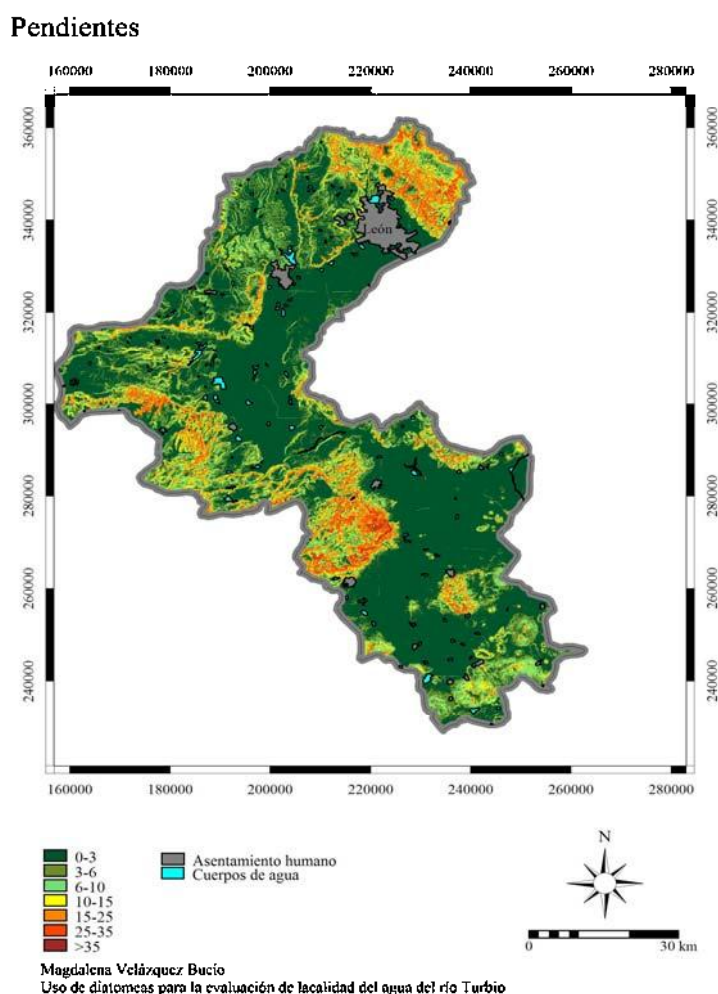


Figura 6. Mapa de pendientes de la cuenca del río Turbio.

El mapa de pendientes (Figura 6) se elaboró haciendo una clasificación de pendientes en siete clases, sin embargo, la más predominante de éstas corresponde a la primera, es decir, entre 0-10°, ya que la mayor parte del área es planicie. Le siguen algunas zonas con pendientes entre 3 y 6 grados y sólo en algunas partes de sierra se encuentran pendientes por arriba de los 15°.

Unidades de suelo

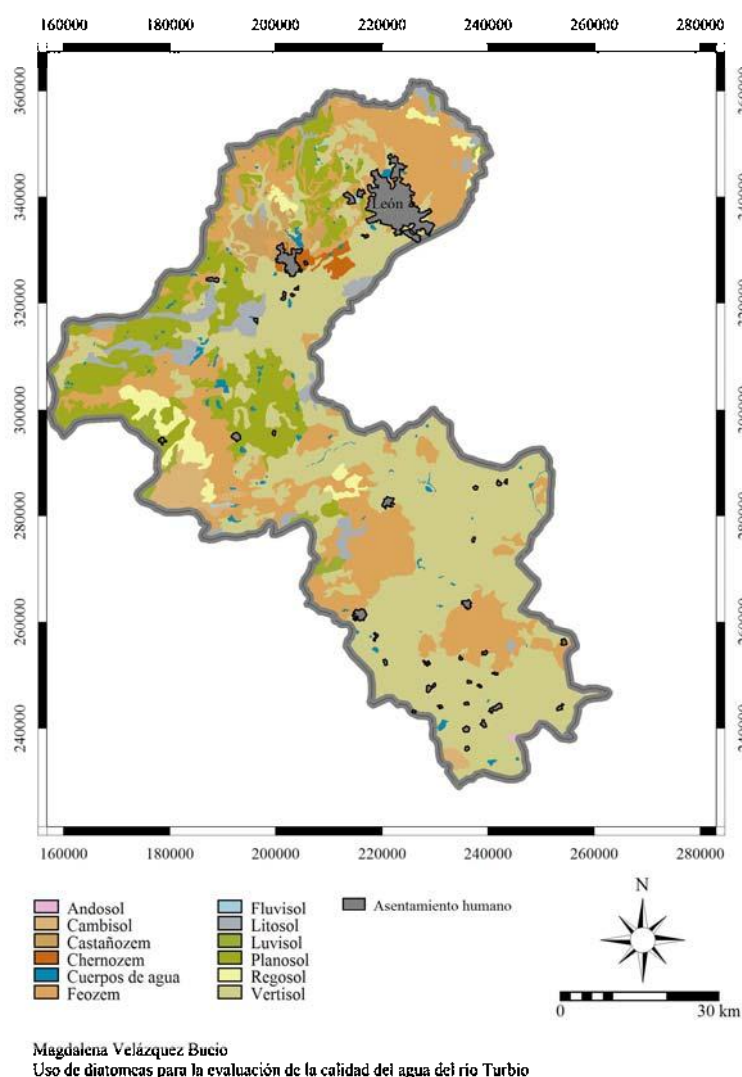


Figura 7. Mapa de unidades de suelo de la cuenca del río Turbio

Los suelos representativos para toda la zona del río Turbio (Figura 7) son los vertisoles, éstos ocupan la mayor parte del área, son además en los que se lleva a cabo la práctica de la agricultura. Le sigue el tipo de suelo feozem, ocupando gran parte de la zona noroeste y en menor proporción, se encuentran luvisoles.

Cobertura vegetal y uso de suelo

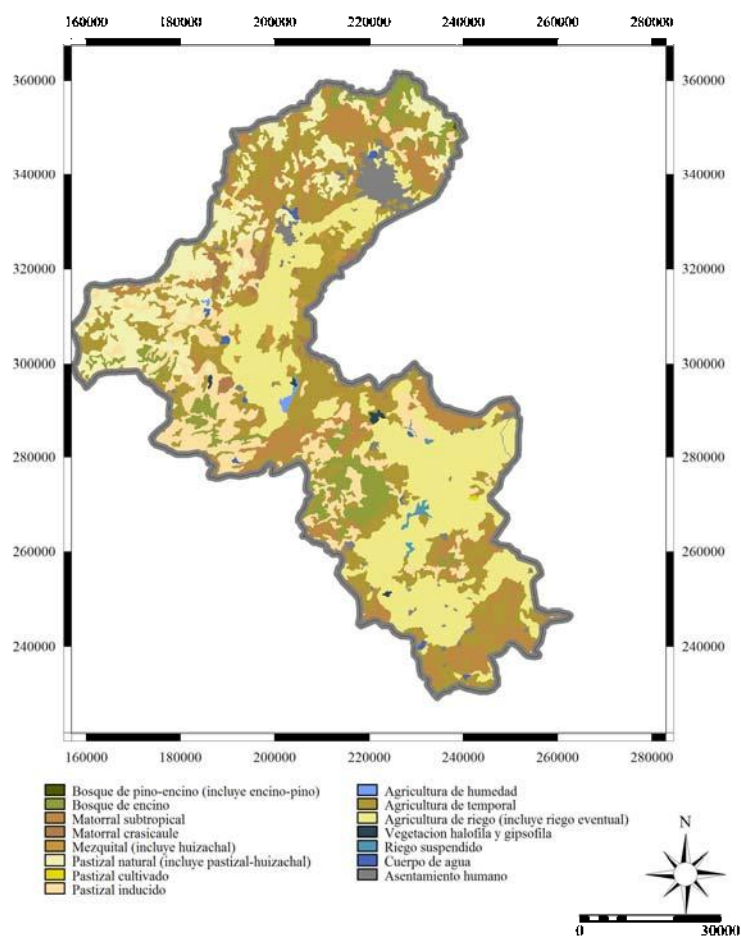


Figura 8. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del río Turbio

En lo referente a la cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca del río Turbio se tiene que, las clases predominantes son pastizal natural, agricultura de temporal y agricultura de riego principalmente (Figura 8). A lo largo de todo el río Turbio se observan grandes áreas utilizadas para la agricultura, sin embargo en la zona media y hasta aguas abajo en las que estas actividades se incrementan constituyendo las zonas utilizadas para la agricultura de temporal y agricultura de riego y sólo una pequeña porción incluye bosque de encino, en las partes de sierra y con mayor altitud.

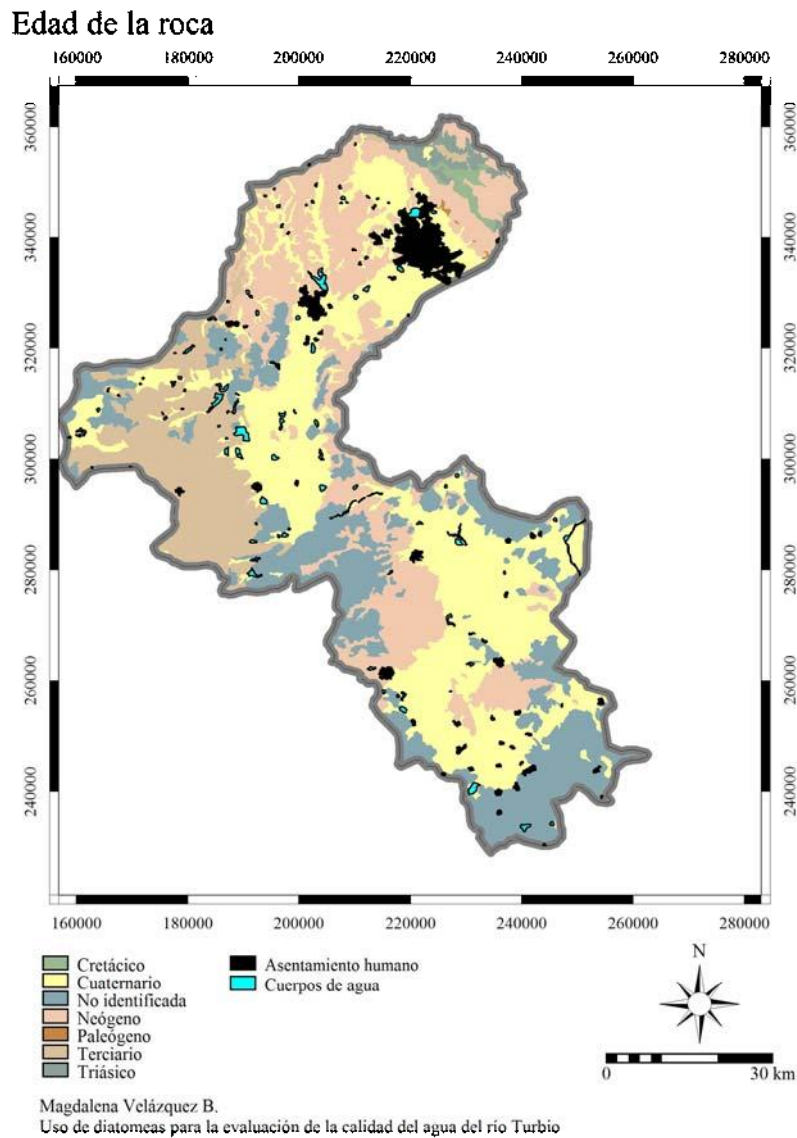


Figura 9. Mapa de edad de la roca en la cuenca del río Turbio

La mayor parte de las rocas pertenece al cuaternario, éstas se distribuyen a todo lo largo de nuestra zona de estudio (Figura 9). En la parte norte y centro, se encuentran unidades del Neógeno y al oeste, del Terciario. Estas tres edades de roca son las más características en la subcuenca del río Turbio.

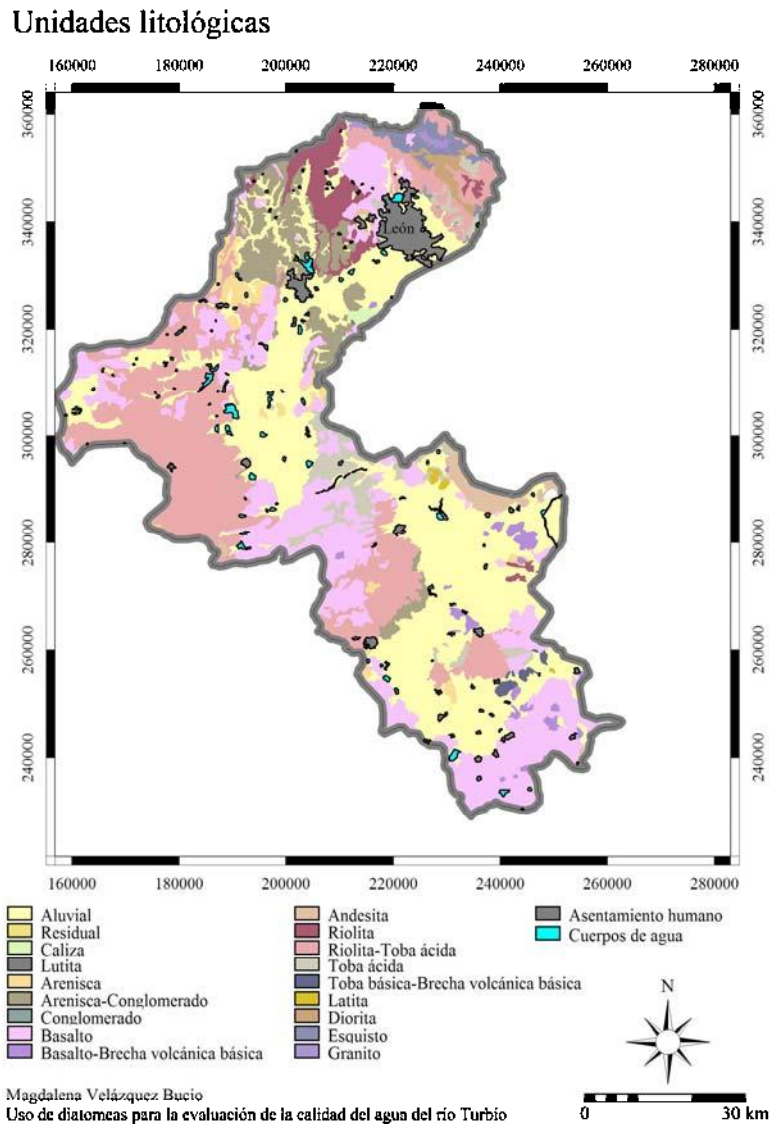


Figura 10. Mapa de unidades litológicas de la cuenca del río Turbio

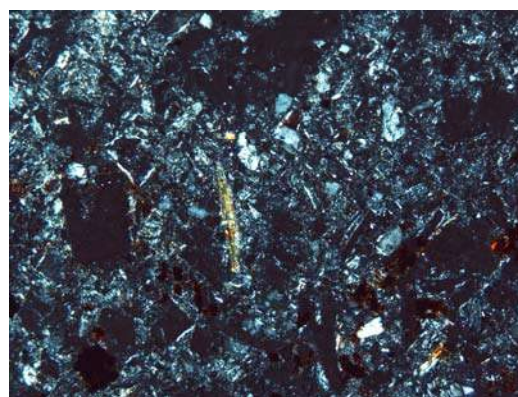
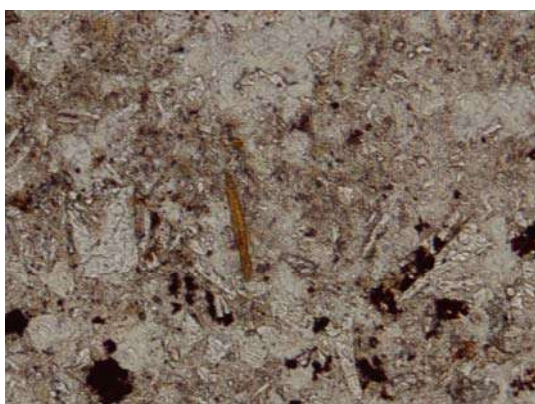
Las principales unidades litológicas de la subcuenca del río Turbio pertenecen a roca aluvial a lo largo de toda la cuenca (Figura 10), riolita-toba ácida sobre todo en la parte oeste de la subcuenca y basalto principalmente en la parte baja y de acuerdo con Martínez *et al.*, (2005) a un segundo conjunto lo representan rocas volcánicas y sedimentos granulares del Terciario Medio al Cuaternario, que cubren toda la parte centro y sur del área. Aunque en menor proporción, también se observan unidades de arenisca-conglomerado y riolitas entre otras.

9.2. ANÁLISIS DE ROCA POR MEDIO DE LÁMINAS DELGADAS

El Tecolote

Toba lítica cristalina de composición ácida

Corresponde a una roca de matriz holohialina (Figura 14) de textura vítrea con fragmentos redondeados, angulosos y desordenados y con un índice de color bajo que va de parda a grisácea sucia y puede pasar a ocre en la que se observan fragmentos de vidrio (shards) transparentes y angulosos, los cuales tienen un índice de refracción más alto y una distribución de tamaño inequigranular seriada (Figuras 11 y 12). El tamaño de estos cristales correspondientes a la matriz es pequeño, granular redondo.



Figuras 11 y 12.- Toba lítica cristalina de composición ácida.

Los fenocristales aumentan en tamaño con algunos muy grandes (Figura 13). En cuanto a la composición mineral, la mayor parte de los fragmentos corresponden a minerales leucocráticos; plagioclasas (30-40%) y cuarzo (8-10%), no obstante, también contiene minerales melanocráticos correspondientes a fenocristales de piroxeno (augita) y biotita.

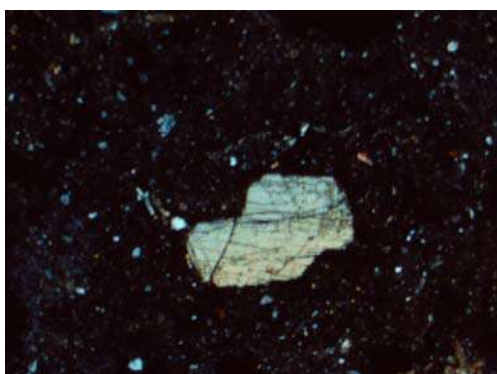


Figura 13. Fenocristales en toba lítica.

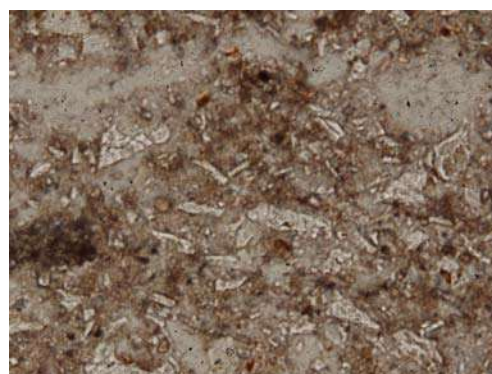


Figura 14. Matriz holohialina con fragmentos inequigranulares.

Además cabe resaltar que en esta roca se encontraron diatomeas completas y fragmentos de otras (Figura 15), por lo que se deduce que es una roca prioclástica que se depositó en un medio lacustre.

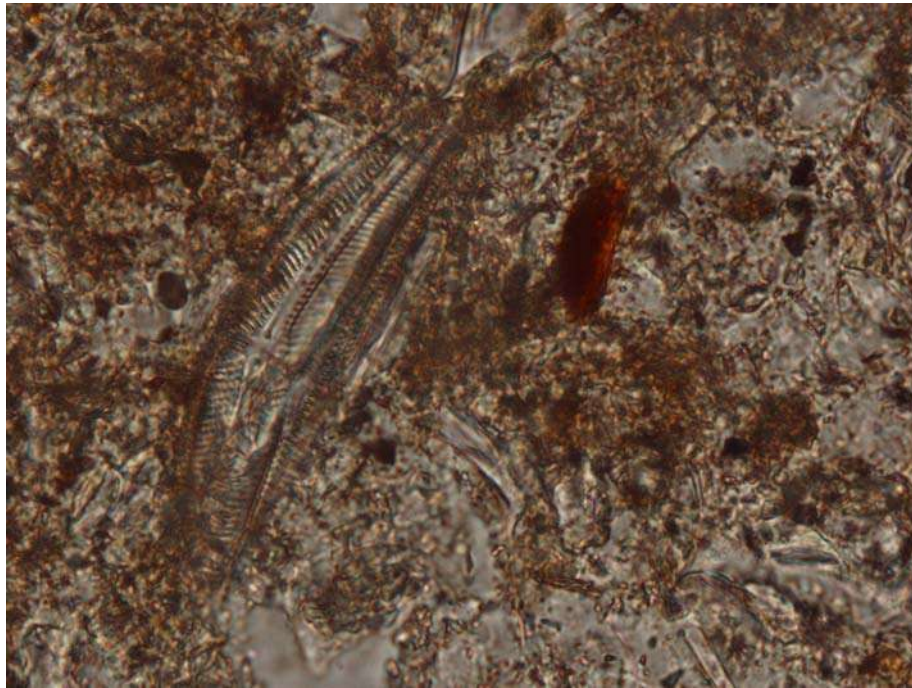


Figura 15. Toba lítica cristalina de composición ácida con presencia de diatomeas.

Manuel Doblado**Toba vítreo cristalina ácida (Ignimbrita).**

La roca correspondiente a la estación Manuel Doblado es de textura holohialina vítrea con estructuras incipientes de flujo y con una distribución de tamaño de cristales inequigranular bimodal (Figura 16). Se trata de una roca de caída libre en el que un 90-95% es vidrio distribuido entre una matriz fina con numerosos cristales de plagioclasa y cuarzo con fragmentos más grandes que mantienen una proporción en tamaño y fragmentos milimétricos asociados en una estructura de flujo a fragmentos de cristales y pocos líticos. El índice de color es bajo. En cuanto a la composición del vidrio, el índice de color es alto con presencia de minerales leucocratos; cuarzo (3%) y plagioclasas (3-5%), de los minerales melanococráticos solo se logra observar olivino.

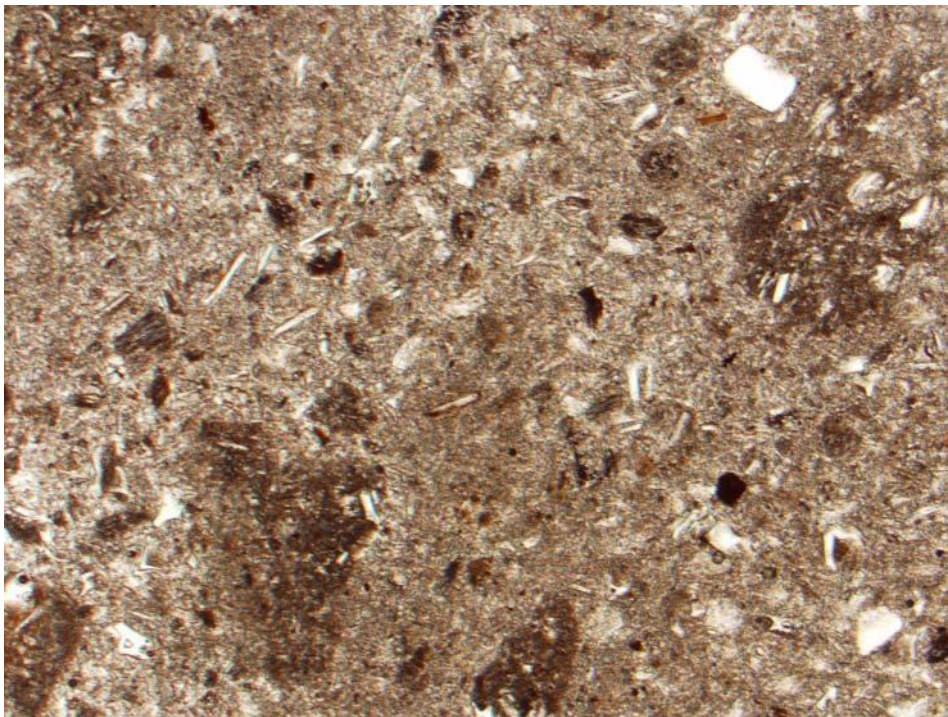
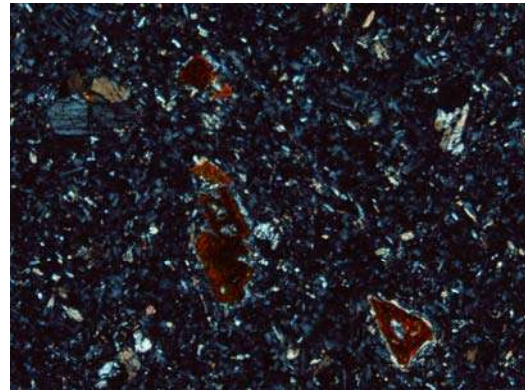
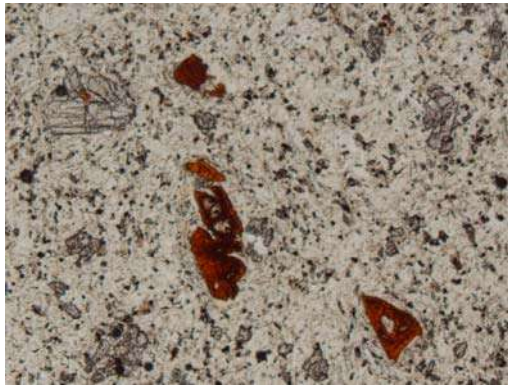


Figura 16. Toba vítreo cristalina ácida.

San Juan de la Puerta

Basalto de piroxeno

Ésta es una roca de textura holocristalina, microlítica traquítica, ligeramente porfídica la cual tiene una distribución de tamaño de los cristales inequigranular bimodal con un índice de color bajo (Figuras 17 y 18). La matriz corresponde al 85% aproximadamente, en la que se encuentra plagioclasa (50-55%), vidrio (35-40%), óxidos (Magnetita 4-6%) y piroxeno (enstatita 1-4%). En cuanto a los fenocristales, domina la enstatita y en menores cantidades, existe presencia de óxidos, relictos de olivino y augita alterada por hematización.

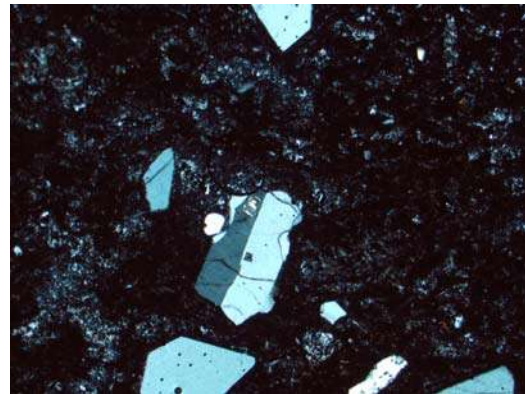
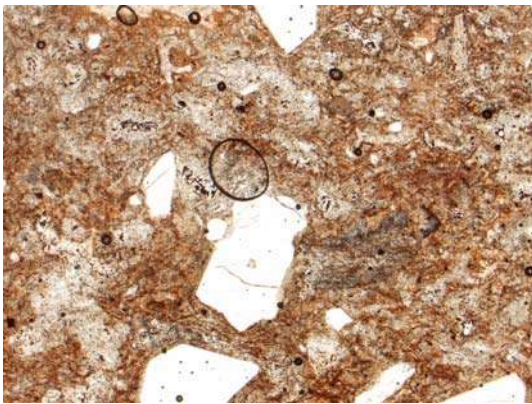


Figuras 17 y 18. Basalto de piroxeno

Cuerámaro

Pórfido-riolita

Roca hialocristalina constituida por una matriz en un 65-70% y con 30-35% de fenocristales (Figuras 19 y 20). Cuenta con una distribución de cristales inequigranular seriada y con un índice de color bajo en la composición mineral. La matriz es compuesta por vidrio microgranular (40%) y dendrítico color ámbar, café a transparente con formas aciculares. Los cristales (60%) muestran estructuras de flujo alargadas en concentrados de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico. Presenta además hábito acicular esferulítico, es altamente inequigranular y aproximadamente 5% de óxidos. En lo referente a los fenocristales, predomina el feldespato potásico (15%) y el cuarzo (5%) los cuales se presentan muy limpios. El feldespato se observa con un maclado carlsbad inequigranular. Muchos de los cristales se observan angulosos y corroídos y además, contiene relictos de biotita oxidados (Figura 21), muy alterado y corroído. Presenta esferulitas (Figura 22).



Figuras 19 y 20. Pórfido riolita

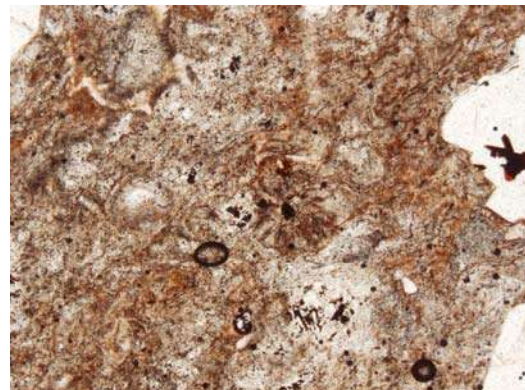
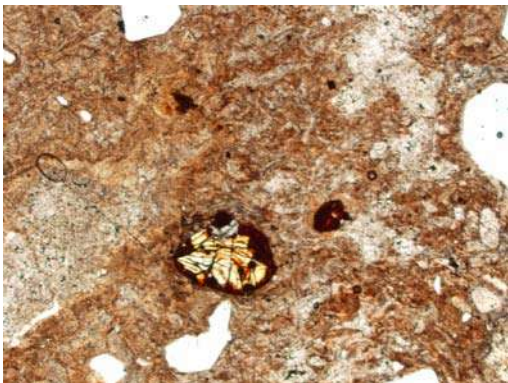


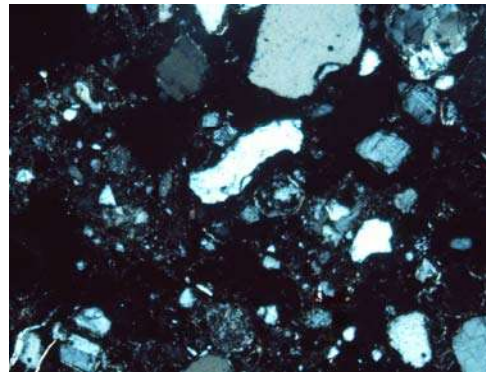
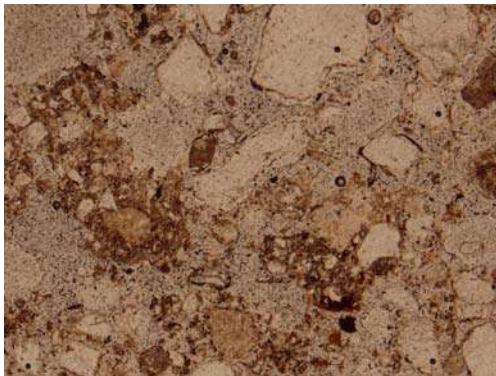
Figura 21. Relicto de biotita oxidado.

Figura 22. Esferulita.

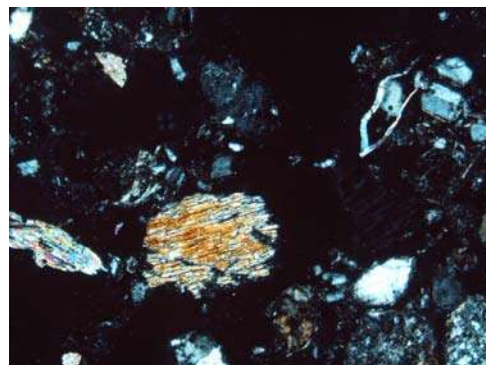
El Salitre

Toba vítrea cristalina de composición riolítica (Ignimbrita)

La roca representante de “El Salitre” es una roca hialocristalina cuya matriz es pórfido-vítrea, muy homogénea y transparente en un 92%, con un índice de color bajo (Figuras 23 y 24). El 8% restante de la matriz corresponde a óxido, el cual le da un aspecto grisáceo o turbio. De los fenocristales (Figuras 25 y 26), el predominante es la plagioclasa (30%) y le sigue el cuarzo (20%). Éstos se observan limpios, con una distribución del tamaño inequigranular seriado. El resto lo constituyen piroxenos, anfíboles y biotita.



Figuras 23 y 24. Toba vítrea cristalina con fenocristales de plagioclasa y cuarzo.



Figuras 25 y 26. Fenocristales de tamaño inequigranular.

En general, se puede decir que el material rocoso en contacto con el agua no está teniendo gran influencia, pues la mayoría de los sitios presentan valores de pH básico y de igual manera, la mayor parte de la roca es de composición ácida; sin embargo, no existe un equilibrio al ser tan alto el aporte de elementos por actividades antrópicas.

9.3. CALIDAD DE AGUAS

El estado trófico de un cuerpo de agua es el reflejo de cómo responde la biota a condiciones físicas y químicas (Rosas *et al.*, 1993). Por lo tanto es importante distinguir cuales de estos parámetros son los mas representativos para interpretar los efectos en la distribución de las diatomeas y sus tendencias sobre todo en cuerpos de sistemas lóticos que sufren cambios continuos a lo largo de su curso.

En la tabla 1 y 2 Se presentan las mediciones efectuadas en dos periodos de un ciclo anual a lo largo del curso del río Turbio (Junio del 2005 y noviembre del 2006) y se describe brevemente la contribución de cada parámetro. En época de secas la estación La Loma se encontró sin agua, por lo que no se tomaron parámetros físico-químicos.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos en época de lluvias

	OD mg/l	Cond. Ms/s	pH	T °C	STD gr/l
Presa de Silva	24	10.2	7.54	15.7	7
El Tecolote	17	7.2	7.7	15.4	5.6
Manuel Doblado	47	4.36	6.63	12.4	3.2
Cuerámaro	101	0.591	5.96	21.3	0.42
San Juan de la Puerta	83	9.7	7.88	15.9	7
Corralejo	117	3.86	4.17	25.3	2.8
La Loma	160	2.77	8.3	23.5	2
El Salitre	199	2.42	8.9	25.3	1.7
Crucitas	19.9	2.45	8.4	20.2	1.8
Planta Tratadora	15.86	2.98	8.12	18.1	2.1

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos en época de secas

	OD mg/l	Cond Ms/s	pH	T °C	STD gr/l
Presa de Silva	0.22	6.42	7.82	21.8	6
El Tecolote	1.2	3.8	8.3	22	2.1
Manuel Doblado	9.4	3.3	8.5	25	0.71
S Juan d la Puerta	4.4	6.87	8.9	22	0.35
Cuerámaro	4.33	2.45	6.65	19.5	0.4
Corralejo	1.35	5.38	7.4	26	253
La Loma					
El Salitre	10.87	11.38	8.9	26	0.25
Crucitas	68.1	7.33	8.2	24	0.38
Planta T	19.2	7.61	9	25	0.37

El oxígeno disuelto, así como algunas de sus propiedades como son distribución y solubilidad, son de gran importancia para el metabolismo, distribución y comportamiento de los organismos acuáticos. De igual manera, influye en la solubilidad de muchos nutrientes inorgánicos. Es importante resaltar que hasta cierto punto, la salinidad puede reducir la solubilidad del oxígeno en el agua, la respiración de los organismos también influye; sin embargo, el mayor consumo es debido a la respiración bacteriana al descomponer la materia orgánica que se encuentra sedimentada (Wetzel, 1981).

A lo largo del río Turbio, el oxígeno disuelto es un parámetro que se asocia directamente a las características de cada estación de muestreo (Figura 27). Es claramente visible que en las primeras estaciones la cantidad de oxígeno disuelto registrado es bajo tanto en periodo de secas como en lluvias, esto es efecto de dos variables ambientales, por un lado se localizan mayormente en la planicie, además de que reciben un mayor impacto de los aportes industriales y domésticos que recibe. A partir de la estación La Loma, se presentan zonas de meandros, lo cual ayuda a la capacidad del río para autodepurarse y es en donde los valores de oxígeno se elevan debido a una mayor cantidad de agua y velocidad de corriente en el río. Particularmente en la estación Crucitas para la época de secas, fue el lugar donde se observó mayor cantidad de agua y velocidad de corriente. Niveles ascendentes de oxígeno se observan también en el manantial de Cuerámaro.

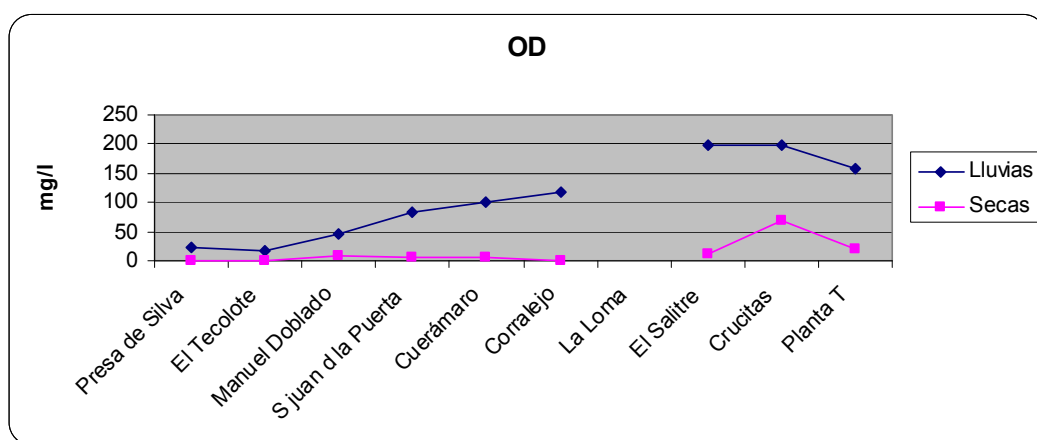


Figura 27. Diagrama de oxígeno disuelto en las estaciones de muestreo

El comportamiento de los demás parámetros físico-químicos es muy similar al del oxígeno; no obstante en algunos sitios es notorio el aumento de algunos como se indica a continuación:

La temperatura es un factor climático que influye en la salinidad del agua, ésta, junto con el viento, tiene que ver con el alcance de la meteorización superficial de las rocas (Wetzel, 1981). La influencia de la temperatura del agua es difícil de medir en las diatomeas, porque depende de otros parámetros. Un cambio de la temperatura puede modificar la oxigenación, la viscosidad del agua, la solubilidad y la difusión de los componentes químicos, parámetros que influyen más o menos directamente sobre el metabolismo de las diatomeas. En la toma de parámetros fisicoquímicos influye la hora del día en que se registran los datos, por consiguiente, la temperatura corresponde al momento en que se midió. Se determinó que tanto en secas como en lluvias las más altas temperaturas corresponden a las estaciones Corralejo y El Salitre, que muestran que los sitios son altamente perturbados y con muy poca cantidad de agua y velocidad de corriente (Figura 28).

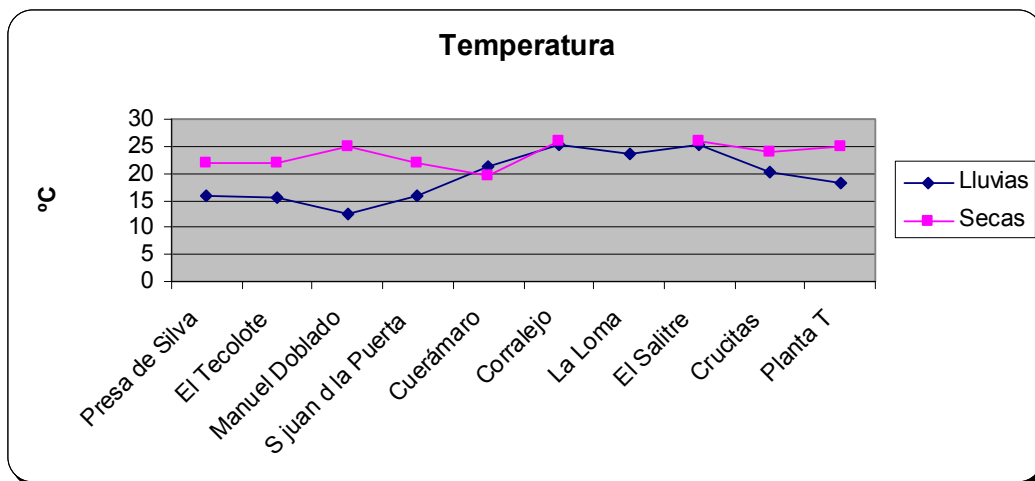


Figura 28. Diagrama de temperatura en las estaciones de muestreo.

La medida de la conductividad eléctrica refleja el estado de contaminación inorgánica (Jonnalagadda, *et. Al.*, 2001); proporcionando una visión de la concentración de iones en el agua, ya que ésta naturalmente es resistente a la conducción de corriente eléctrica. Este parámetro refleja también las concentraciones de macro-iones y nutrientes disueltos de la roca que son sumados finalmente al incremento proporcional de los iones totales (Blinn, 2004). Del total de las estaciones (Figura 29), se determina que las de mayor conductividad, son precisamente las que reciben descargas directas de alguna zona industrial y el Salitre que es un sitio particularmente perturbado debido a la intensa actividad agrícola practicada además con grandes cantidades de fertilizantes, los cuales aportan altas cantidades de iones de amonio al río.

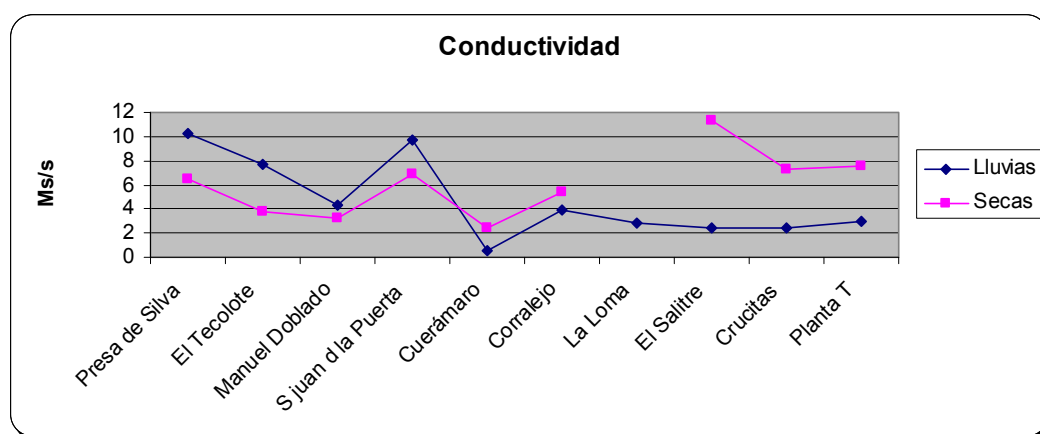


Figura 29. Diagrama de conductividad de las estaciones de muestreo.

El pH (potencial de hidrógeno) de los sistemas acuáticos es un importante indicador de la calidad del agua y de la contaminación en diferentes sitios en el cuerpo de agua. El rango permisible del pH es de 5 a 10 unidades (NOM – 001 – ECOL1996). Los efectos letales de la mayor parte de los ácidos se presentan cuando el pH es menor de 5 y cuando el sistema se vuelve excesivamente alcalino con valores mayores de 9.5. Este parámetro es determinante en la distribución de diatomeas debido a que sus rangos de requerimiento es muy pequeño para algunas de las especies, mientras que otras son tolerantes o indiferentes a él. En el curso del río Turbio, en la estación Corralejo se registró un valor para pH de 4.17, de manera opuesta la estación El Salitre con un valor

de pH de 8.9 y la planta tratadora. (Figura 30). Este amplio margen de diferencia se debe a que en la estación de Corralejo se localiza una destilería que vierte directamente sus residuos con una acidez alta al río Turbio, por otro lado en las estaciones El Salitre y Planta Tratadora, el aporte por parte de las actividades agrícolas probablemente hace que se incremente la alcalinidad del agua en esta zona.

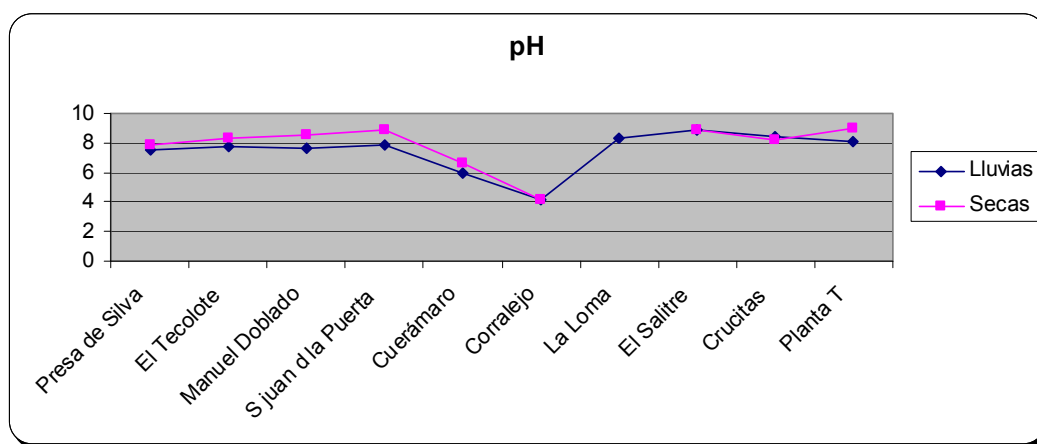


Figura 30. Diagrama de pH de las estaciones de muestreo.

El efecto de los sólidos totales se manifiesta en la reducción de la fotosíntesis de las plantas y diatomeas al impedir que la luz penetre en el agua por la turbidez al atenuar la luz y reducir la transparencia, teniendo por consiguiente un efecto directo en la transmisión y dispersión de la luz, y es en las zonas con una fuerte influencia industrial (Figura 31) en donde se registran las mayores concentraciones de éstos debido a que se concentran tanto sólidos disueltos como suspendidos de los desechos de efluentes conectados al río. Asimismo, la influencia de la lluvia en el movimiento del agua en el río permite el aumento por dilución de éstos.

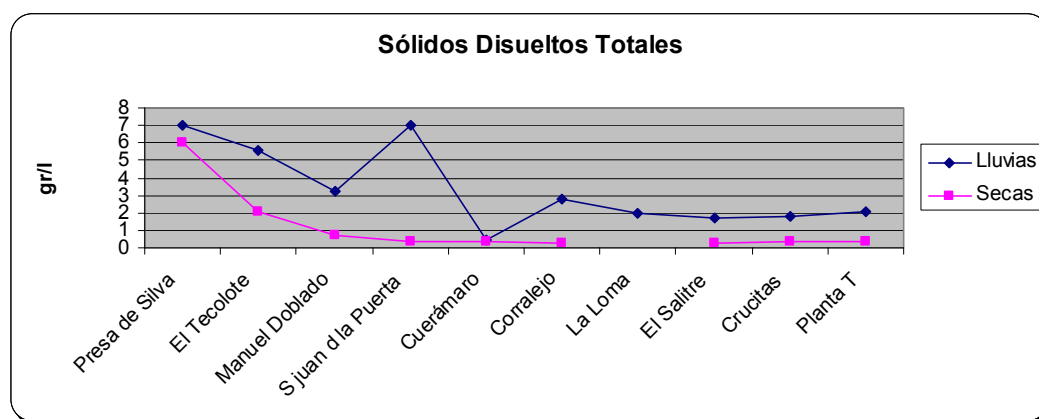


Figura 31. Diagrama de sólidos disueltos en las estaciones de muestreo.

Nutrientes

Las relaciones entre las especies de diatomeas y nutrientes son influenciadas por complejos gradientes ecológicos (Potapova y Charles, 2002). En general, oxígeno, luz, temperatura y nutrientes juntos definen el potencial para la producción primaria, mientras la velocidad del agua y sus interacciones en el tipo de flujo (elevaciones del fondo, tipo de transporte, sinuosidad, longitud del colector, forma del perfil, escurrimientos asociados) influyen el desarrollo de la biomasa. Las diferencias en los efectos de esos factores en diferentes especies, a su turno conduce a cambios en la composición de la comunidad. Los rasgos que pueden afectar el funcionamiento de un taxón (bajo condiciones geográficas) incluyen la habilidad para sobrevivir en bajas concentraciones de oxígeno disuelto, contenido en sólidos disueltos, capacidad para absorber el carbono y la tolerancia a altas concentraciones de amonio, nitritos y otros materiales potencialmente tóxicos. Sin embargo, el nicho ecológico de un taxón es igualmente determinado por una combinación de esos factores junto con esta habilidad competitiva en altas concentraciones de nutrientes. El amonio en particular es la fuente de asimilación de nitrógeno más determinante del fitoplancton por lo que puede ser muy útil para determinar contaminación en un cuerpo de agua.

De acuerdo con Jonnalagadda, *et al.*, (2001), los fosfatos y nitratos son parámetros importantes para evaluar la calidad del agua; los altos niveles de

estas especies, aumentan el crecimiento de vegetación en sistemas acuáticos e incrementa la demanda de oxígeno. Según Blinn *et al.*, (2004), el nitrógeno y el fósforo son los principales macronutrientes que enriquecen los ríos y causan problemas en el nivel algal; el exceso de P causa alta biomasa algal. El N puede ser aportado por la agricultura, lluvia o agua de descarga y puede ser un elemento limitante de la biomasa algal y aunque también las aguas residuales contribuyen con grandes cantidades de P a los ríos, altas concentraciones de éste son comunes en ríos de aguas bajas sin signos de fauna y flora tolerante a la contaminación orgánica.

Como se observa en la figura 32, en el río Turbio los nutrientes que se encuentran con más alta cantidad corresponden a nitritos, nitratos y fósforo, y es precisamente en las estaciones aguas arriba en donde existe la mayor concentración de éstos, lo que corresponde al área industrialmente más desarrollada, es decir, a las descargas de la ciudad de León y San Francisco del Rincón.

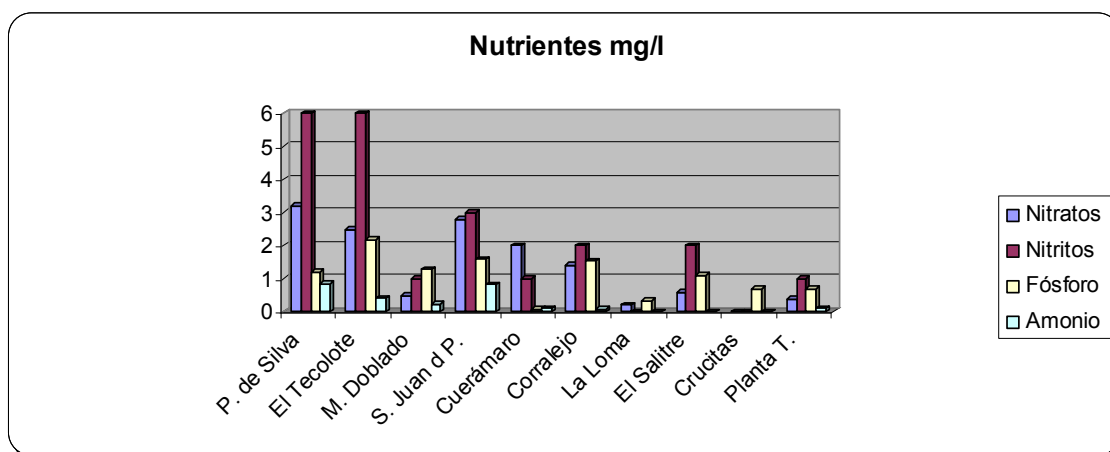


Figura 32. Diagrama de nutrientes del río Turbio.

Sólidos Totales

En la figura 33 podemos observar, que los valores máximos, comparando con la gráfica anterior, son los sitios en los que los sólidos totales atenúan la luz y reducen la transparencia, determinando así la transmisión y dispersión de luz para el proceso de fotosíntesis y por lo tanto también la cantidad de clorofilas en cada estación de muestreo. Paralelamente nos muestra cuales son los sitios mas contaminados o por lo menos, los sitios en que debido a la cantidad de sólidos totales, se incrementa la demanda química de oxígeno, como sigue en las siguientes gráficas.

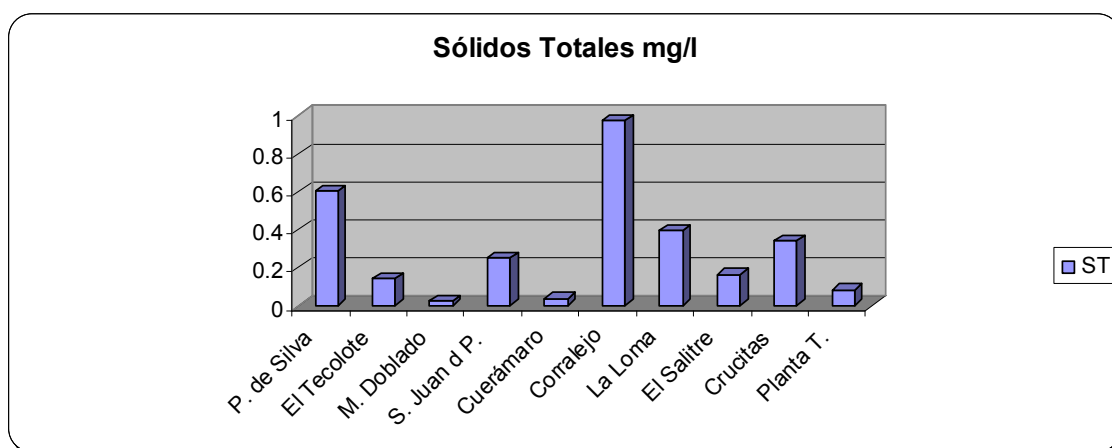


Figura 33. Diagrama de sólidos disueltos en el río Turbio.

Demanda química de oxígeno (DQO)

Cómo es bien sabido, el oxígeno es un elemento esencial para el metabolismo de los organismos, en este caso el oxígeno disuelto para los organismos aerobios acuáticos, por lo tanto, es necesario conocer su comportamiento y disponibilidad, lo que permite comprender como influye en la distribución y la composición de las comunidades de diatomeas en cada uno de los sitios de muestreo.

La solubilidad de muchos nutrientes inorgánicos, depende en gran medida también de la distribución del oxígeno en el agua, de este modo, la productividad de un cuerpo de agua será alterada si la disponibilidad de nutrientes regulados por el oxígeno se prolongan durante un tiempo (Wetzel,1981). En la figura 34, se aprecia el comportamiento del oxígeno como demanda química (DQO).

Como se mencionó en la gráfica anterior, los dos sitios con mas cantidad de sólidos totales son los que más DQO muestran; sin embargo, a excepción de Corralejo la figura nos muestra valores considerables ya sea de carga orgánica de las aguas residuales que, o no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos. Igualmente se observa que el río Turbio se autodepura conforme mas se acerca a la unión con el Lerma.

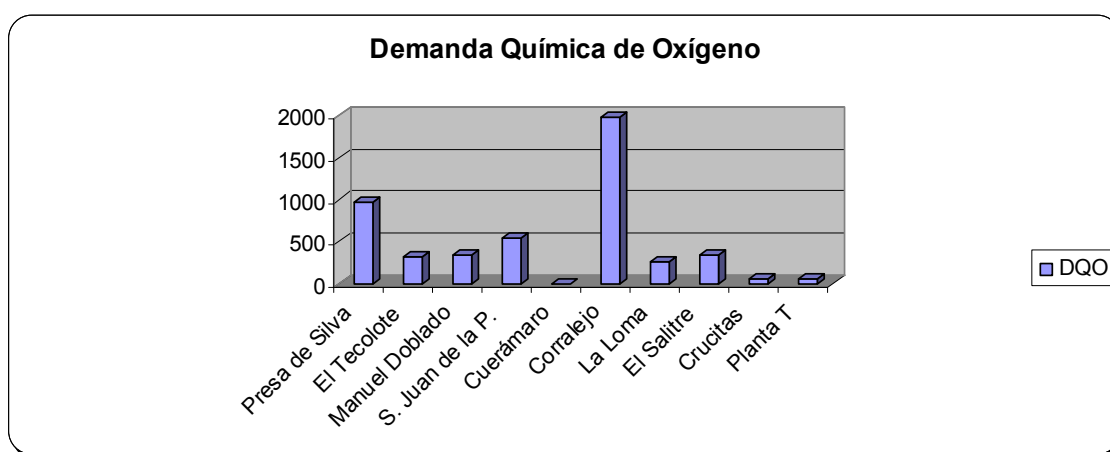


Figura 34. Diagrama de DQO en el río Turbio.

Metales pesados

En México no hay reglas para criterios de calidad de agua por metales pesados y contaminantes orgánicos asociados a sedimentos suspendidos y depositados (Hansen y Van Afferden,2004). Según la Norma Oficial Mexicana (NOM – 001 – ECOL – 1996), los metales pesados “son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites pueden producir efecto negativos en la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial

Mexicana sólo se consideran los siguientes: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros”.

Los metales en los ríos vienen tanto de fuentes naturales como artificiales. Naturalmente se introducen al río por erosión de las rocas, del suelo o disolución de sales. Sin embargo, como las cuencas de los ríos son industrializadas, los metales se adicionan primordialmente por actividades humanas que pueden afectar la calidad del agua. Algunos metales son esenciales para la vida humana; mientras que otros son altamente tóxicos en relativamente bajas concentraciones y pueden acumularse en los tejidos del cuerpo. Los iones libres disueltos son las más comunes formas tóxicas de metales y las especies químicamente más reactivas. La especiación de metales depende de diversos factores como pH, potencial redox, enlaces orgánicos e inorgánicos, temperatura, reactividad química y salinidad entre otros (Hansen y Van Afferden, 2004).

En el estudio realizado por Hansen y Van Haffren (2004), a lo largo de la cuenca Lerma-Chapala, la mayor concentración de metales encontrados (Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn), hidrocarburos policíclicos aromáticos, son obtenidos en sedimentos, especialmente en el río Turbio y hacia La Piedad. Según sus resultados, tan solo el municipio de León aporta el 15% de Ni, 48% de Pb, 22% de Cu, 92% de Cr y 10% de la descarga industrial de Cd. Menciona que “en general, la ciudad altamente industrializada de León, ha sido identificada como el principal productor de descargas industriales”. La Red Nacional de Monitoreo, ha detectado la presencia de cromo trivalente y hexavalente siendo este último uno de los precursores de cáncer en el ser humano (Informe Ambiental del Estado de Guanajuato).

Se ha reportado desplazamiento vertical de Cd y Zn en la vertiente que irriga los suelos y además éste es altamente variable e influenciado por el tipo de irrigación, contenido de carbono orgánico de los mismos suelos y el pH. Según un estudio en un periodo de 50 años, las aguas residuales han contribuido con el 31 % de los metales constituidos en los contenidos del suelo (De León *et al.*, 2001).

En la figura 35 de los datos obtenidos en la presente investigación se observa que la estación San Juan de la Puerta es la que mas contiene zinc, cantidad que se encuentra en los límites permisibles establecidos en la NOM- 001- ECOL-1196, esto se asocia a la cantidad y forma de uso de agroquímicos en las zonas de cultivo. El cromo es otro elemento que se encuentra en cantidades relativamente altas sobre todo en aguas arriba, estaciones en las que los efluentes de las zonas industriales se conectan con el río Turbio. A medida que el desarrollo industrial queda arriba, las concentraciones de metales disminuyen en las siguientes estaciones de muestreo.

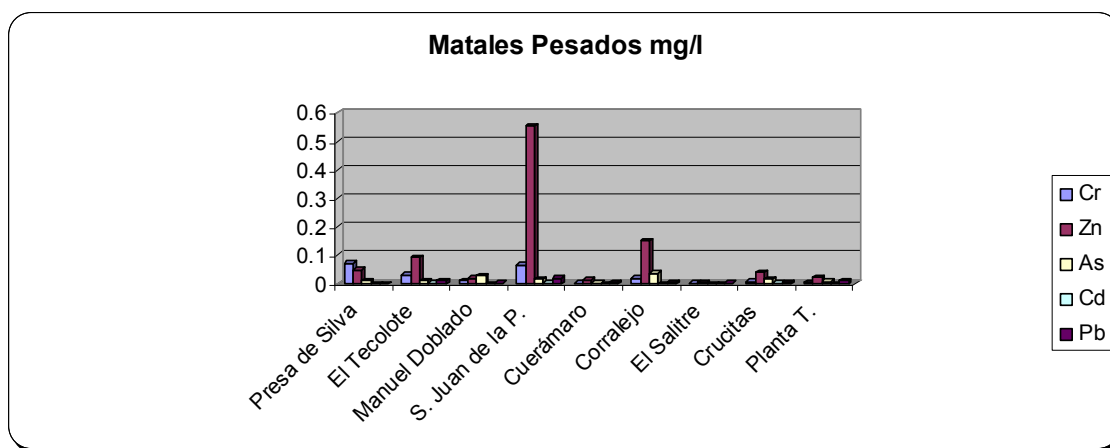


Figura 35. Diagrama de concentración de metales pesados en el río Turbio.

9.4. DIATOMEAS

La relativa importancia de los parámetros ambientales en la explicación de la composición de las asociaciones de diatomeas varía con las áreas geográficas (Potapova y Charles, 2002), y su presencia es un índice inequívoco de las condiciones que prevalecen (Del Toro, *et al.*, 2004). Además, una fina escala taxonómica lleva al reconocimiento preciso de la distribución geográfica y ecológica de cada vez más especies lo que permitirá afinar la potencialidad de estos organismos para caracterizar distintos ambientes, sobre todo aquellos sometidos a alto impacto humano (Potapova y Charles, 2002).

9.4.1. UBICACIÓN TAXONÓMICA DE LAS DIATOMEAS

Basada en la clasificación de Krammer & Lange-Bertalot (1986-1991)

División CRYSOPHYTA

Subdivisión CRYSOPHYTA

Clase BACILARIOPHYCEAE

Subclase CENTROPHYCIDEAE

Orden CENTRALES

Suborden COSCINODISCINEAE

Familia THALASSIOSIRACEAE

Genero *Aulacoseira* Ehrenberg

Aulacoseira ambigua

Aulacoseira granulata

Genero *Cyclostephanos*

Cyclostephanos dubius

Genero *Cyclotella*

Cyclotella meneghiniana

Genero *stephanodiscus*

Stephanodiscus carconensis

Stephanodiscus medius

Stephanodiscus minutulus

Stephanodiscus niagarae

Subclase PENNATOPHYCIDA

Orden PENNALES

Suborden ARAPHIDINEAE

Familia FRAGILARIACEAE

Genero *Fragilaria* Lynbye, 1819

Fragilaria capucina

Staurosira construens

Staurosira construens var. *Venter*

Staurosirella pinnata

Suborden RAPIDINEAE

Familia: EUNOTIACEAE

Género: *Eunotia* (Ehrenberg, 1844)

Eunotia bilunaris

Familia ACHNANTHACEAE

Genero *Achnanthes* Bory, 1822

Achnanthe acares

Achnanthes biasoletiana

Achnanthes exigua

Achnanthes hungarita

Achnanthes marginulata

Achnanthes minutissima

Achnanthes praeipua

Achnanthes rosii

Genero *Cocconeis* Eherenberg, 1838

Cocconeis placentula

Cocconeis placentula var. *euglypta*

Cocconeis placentula var. *lineata*

Género *Planothidium* (Lange-Bertalot)

Planothidium lanceolatum

Orden NAVICULARES

Suborden NAVICULINEES

Familia Naviculaceae

Género: *Amphora* (Ehrenberg)

Amphora veneta

Género *Cymbella* (Agardh)

Cymbella lata

Cymbella microcephala

Cymbella tumida

Encyonema silesiaca

Genero *Gomphonema* Ehrenberg

Gomphonema affine

Gomphonema gracile

Gomphonema laticollum

Gomphonema mexicanum

Gomphonema parvulum

Gomphonema pumilum

Gomphonema truncatum

Gomphonitzchia

Subfamilia NAVICULOIDEAE

Genero *Navicula* Bory, 1822

Navicula acomoda
Navicula cryptocephala
Navicula cryptotenella
Navicula declives
Navicula erifuga
Navicula gerlofii
Navicula pygmaea
Navicula simetrica

Género *Neidium* Pfitzer

Neidium productum

Género *Pinnularia* Ehrenberg

Pinnularia brandelii
Pinnularia gibba
Pinnularia lundii
Pinnularia microstauron var. *brebisonii*
Pinnularia stomatophora
Pinnularia subcapitata

Género *Rhoicosphenia* Grunow

Roicosphenia abreviatta

Género *Sellaphora* Bory

Selaphora pupula

Género *Stauroneis* Ehrenberg

Stauroneis phoenicenteron

Género *Diadesmis*

Diadesmis conforvacea

Género *Craticula*

Craticula cuspidata

Craticula paramutica

Género *Caloneis*

Caloneis aff. Sulinearis

Familia *Epithemiaceae* Grunow 1860

Género *Epithemia* Brébisson

Epithemia turgida

Género *Rhopalodia* O. Möller

Rhopalodia gibba

Familia *Bacillariaceae* Ehrenberg 1840

Género *Denticula* Kützing

Denticula ketzenguii

Género *Nitzschia* Hassall

Nitzschia amphibia

Nitzschia capitellata

Nitzchia clausii
Nitzchia hungarita
Nitzchia inconspicua
Nitzchia microcephala
Nitzchia palacea
Nitzchia palea
Nitzchia sigma
Nitzchia umbonata

Las diatomeas son altamente susceptibles a cambios ambientales y estas se han agrupado de acuerdo a espectros ecológicos, a continuación se presentan los más utilizados y permitirán describir sus afinidades y tolerancias a las distintas variables en el medio.

VARIABLES AMBIENTALES DE LAS DIATOMEAS (Reunidas por Low e, 1974)

Espectro de pH	Acidibiéntico	Menor de 5.5
	Acidófilo	Menor de 7
	Neutral	Alrededor de 7
	Alcalófilo	Sobre 7
	Alcalobiéntico	Aguas alcalinas
Espectro de nutrientes	Eutrófico	Alto
	Mesotrófico	Moderado
	Oligotrófico	Bajo
	Distrófico	Rico en materia orgánica
Espectro de salinidad Concentración de sales, mg/l)	Polihalobio	Sobre 40 000
	Euhalobio	30 000 a 40 000
	Mesohalobio	500 a 30 000
	-Rango alfa	10 000 a 30 000
	-Rango beta	500 a 10 000
	Oligohalobio	Formas de agua dulce Menores de 5 000
	Halófilo	Estimulado por pequeñas Concentraciones
	Indiferente	Tolerante a pequeñas Concentraciones
	Galófobo	No tolerante a pequeñas Concentraciones
	Eurihalobio	Amplio rango
Espectro saprobio (nitrógeno)	Polisaprobio	Zona de degradación, Putrefacción, oxígeno ausente
	Mesosaprobio	Zona de oxidación de Desechos orgánicos
	-Rango alfa	Contaminación fuerte en Forma de aminoácidos
	-Rango beta	Contaminación en forma de Compuestos de amino

	Oligosaprobio	Zona de biodegradación de Compuestos---
	Saprofílico	Aguas contaminadas y Aguas limpias
	Saproxeno	Hábitat con aguas limpias Y con contaminación
	Saprofóbico	
Forma de vida	Euplanctónico	Suspendido en el agua
	Ticoplanctónico	Asociado con perifiton o hábitats terrestres
	Perifítico	Sobre sustrato y sumergido
	Epipélico	Sobre lodo
	Epilítico	Sobre rocas
	Epidéndrico	Sobre madera
	Epifítico	Sobre plantas
	Epizoico	Sobre animales
	Béntico	Sésil en el fondo
	Libre	Motil
Espectro de temperatura (T°C)	Eutermal	Aguas calientes 30°
	Mesotermal	Aguas templadas 15 a 30°
	Oligotermal	Aguas frías 0 a 15°
	Estenotermal	Angosto rango de variación
	Metatermal	5 a 15°
	Euritermal	Amplio rango de variación

En cuanto a los metales pesados no existe un espectro para las especies. Sin embargo, algunas han sido reportadas como tolerantes a metales por varios autores, entre las que destacan *Gomphonema parvulum*, *Pinnularia sp.*, y *Fragilaria crotonensis* (Gold et al., 2002).

De acuerdo a los resultados, sobre todo en las estaciones de aguas arriba en el río Turbio, se asemejan a los presentados por García (1996); la autora afirma que se ha demostrado que algunas algas cuentan con mecanismos fisiológicos que las hacen tolerantes a altas concentraciones de metales pesados. En el presente estudio, se registraron las especies *Nitzschia palea*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia capitellata*, *Gomphonema* y *Gomphonema parvulum* como especies

dominantes a lo largo del cauce; no obstante, en estaciones como en la Presa de Silva, El Salitre, San Juan de la Puerta y Corralejo, sitios en donde encontramos las mayores concentraciones de cromo y zinc y arsénico, la abundancia de las demás especies es muy baja o en algunos casos nula. En la estación de San Juan de la Puerta, la comunidad de diatomeas es monoespecífica, sólo se registra *Nitzschia capitellata*. Ésta se comporta como la especie más tolerante, de acuerdo a los resultados obtenidos.

9.4.2. DESCRIPCIÓN DE ESPECIES

De acuerdo con nuestras observaciones y conteos en laboratorio ha sido posible obtener un listado con las especies de diatomeas presentes a lo largo del río Turbio. Dichos resultados corresponden a 74 especies dentro de 29 géneros. La siguiente es una descripción característica de las especies encontradas. La morfología y el tamaño ha sido comparado con la descripción de especies realizada por diversos autores y con la efectuada en el presente trabajo.

AULACOSEIRA Thwaites, 1848

Células firmemente unidas para formar largos, rectos, curvados o incluso enroscados filamentos. La profundidad de la valva forma un ángulo recto que se une con la cara valvar; filas verticales o curvadas de poroides en el manto; valvas ordinariamente muy estriadas, unidas por espinas con un pseudoseptum alrededor de la valva marginal.

Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen

Largo: 6-18 μm

Diámetro: 5-10 (21) μm

Valva circular. Estrías aureoladas a lo largo de la cara 9-5 en 10 μm , rectas o finamente curvadas (ambas posibles a la vez en células adyacentes de un único filamento o incluso en una célula); las areolas varían en tamaño. En relación a las uniones normales de espinas, también es aguda, espinas largas en los márgenes de algunas valvas y corresponden con las estrías a lo largo de la célula adyacente. Bajo microscopio las frústulas son comúnmente acompañadas en vista circular, de forma alargada y filamentos largos. Es una especie muy poliforma respecto al tamaño, diámetro, altura y estriación.

Ecología: euplanctónica en ríos eutróficos, estanques, lagos y ríos; oligohalobia, alcalófila, oligosaprobia o mesosaprobia.

CYCLOSTEPHANOS

Cyclostephanos dubius

Diámetro: 5.4-15.2 μm

Valvas circulares y onduladas concéntricamente. Fascículos e interfascículos radiales en la superficie valvar. Areolas dispuestas en un patrón radial que inicia desde el centro con hasta tres hileras hacia la unión del manto y la valva, arreglo irregular de las areolas del centro. Cuando hay espinas se encuentran en el interfascículo cerca del margen de la valva. La vista interna de la valva presenta cámaras alveolares no bien definidas. La densidad de las areolas marginales va de 13-15 en 5 μm .

Crece en natas flotantes de *Oedogonium*, en sustrato arcilloso y en la columna de agua.

Ecología: alcalófila, eutrófica, oligohalobia, halófila. Planctónica y en sedimentos. Es común en aguas con alta concentración de sílice y elevada conductividad. Habita en lagos.

CYCLOTELLA Kützing 1834

Células cortas, cilíndricas, forma de vida libre o formando cadenas o raramente unidas en grupos por mucílago. Valvas generalmente circulares, a veces con una ondulación tangencial o concéntrica en la cara valvar. Estrías marginales formadas por grupos de hileras de areolas cubriendo cámaras internas. Areolas poroidales. Numerosas cópulas, divididas.

Este género abarca alrededor de 100 especies. Sin embargo, existen muchos problemas para identificar las especies sólo con microscopía óptica.

Principalmente planctónicas, sobre todo en aguas continentales y muy pocas especies en aguas costeras, probablemente como una invasión evolutiva desde aguas continentales salinas (Díaz y Maidana, 2005).

Cyclotella meneghiniana Kützing, 1844

Diámetro: 8-40 µm

Valva circular con aspecto tangencialmente ondulado. 8-10 estrías radiales en 10 µm. Prominente cerca de la mitad, área central lisa o finamente punteada-radiada, mostrando 1-4 poros conspicuos (soporte central). Bajo microscopio electrónico, el aspecto interno de la valva muestra un soporte marginal cerca de la base, se ven espinas marginales en la cara externa.

Ecología: ticoplanctónica o perifítica, halofila, alcalófila, alfamesosaprobia; en aguas oligo a mesohialina de química variable, tolerante a altas temperaturas (Gasse, 1986).

STEPHANODISCUS Ehrenberg 1846

Células solitarias o en grupos cortas cadenas. Forma de la célula discoidal o cilíndrica. Borde de la valva con un círculo de cortas espinas, del que parten las series radiales de poros muy finos, que se pierden hacia la región central.

Stephanodiscus minutulus Kützing (Leve & Moller, 1882)

Diámetro: 8-25 μm

Valva circular, usualmente con una marcada elevación o depresión en la parte central. Estrías radiales biseriadas (algunas veces triseriadas) llegando a ser uniseriadas en el centro.

Ecología: euplanctónica, oligohalóbia.

Stephanodiscus niagarae

Diámetro. 47-89 μm

Valva circular con el centro ligeramente cóncavo o convexo ya que la valva está concéntricamente ondulada. Estrías radiales areoladas en fascículos muy cercanos entre sí, interespaciados sólo por áreas hialinas. De 5-7 fascículos en 10 μm y de 15-19 areolas en 10 μm . Cada 2-3 interfascículos con espinas submarginales y un proceso de puntos bajo cada espina en el manto de la valva. Presenta un anillo de procesos punteados en la cara de la valva.

Ecología: planctónica de aguas mesotróficas a hipereutróficas.

FRAGILARIA Lyngbye 1819

Las células generalmente forman colonias, unidas por sus caras valvares, debido a esto, la vista singular es la más comúnmente observada. Valvas lineales. Linear-lanceoladas, elípticas a veces con una expansión central hacia uno o ambos lados de la valva. Los extremos pueden ser redondeados, rostrados, capitados, etc. El esternón se encuentra linear a lanceolado, frecuentemente expandido hacia uno de los lados valvares. Areolas simples, organizadas en hileras uniseriadas transapicales. Puede haber espinas en la unión valva/manto.

El género *Fragilaria* se encuentra típicamente formando parte de sedimentos en aguas continentales, con pocas especies planctónicas (Díaz y Maidana, 2005).

STAUROSIRA Ehrenberg, 1843

Células solitarias o formando filamentos o filamentos en zig-zag de unas pocas a muchas células. Pueden estar adheridas al substrato, sin embargo generalmente son libres. Valvas ovaladas, elípticas, cruciformes o raramente triangular con un espacio considerablemente con una fila uniseriada de areolas. Espinas marginales. (Cox, 1996).

Staurosira capucina Desmazières 1925

Largo: 10-100 μm

Ancho: 3.5-4.5 μm

Valvas muy alargadas con la parte media abultada y en forma rectangular. Área axial estrecha y área central longitudinalmente asimétrica. Estrías paralelas y muy finas. Puede tener de 12-17 estrías en 10 μm .

Ecología: cosmopolita, alcalófila, tolerante a pequeñas concentraciones de sal. Se le encuentra en aguas corrientes y estancadas.

Staurosira construens Ehrenberg, 1862

Largo: 10-20 μm

Ancho: 6-10 μm

Valva característicamente hinchada en la porción media. Pseudorafe lanceolado. En vista conectiva, la frústula es rectangular, hinchada en la parte media. Presenta de 14-18 estrías transapicales en 10 μm delimitando una reducción.

Ecología: perifítica y ticoplanctónica en lagos, estanques y ríos, oligohalobia-indiferente, alcalófila, oligosaprobia a alfamesosaprobia, en aguas eutróficas, según Uted (1949b) es indicador de aguas bien oxigenadas.

Staurosira construens (Ehrenberg) Grunow 1862 **var. *construens***

Largo: 19 μm

Ancho: 9 μm

Valvas con simetría bipolar, apices redondeados, márgenes convexos en el centro; área central ausente; área axial amplia lineal lanceolada. Con 17 estrías en 10 μm .

Ecología: perifítica, de pH alcalifila, eutrófica mesotrófica, oligotrófica, oligohalobia mesosaprobia, oligosaprobia, se encuentra en lagos, pozos, manantiales, corrientes, euplantonica, ticoplanctonica, perifítica, bentica, epífita mesotermal, oligotermal, euritermal, forma largas cadenas sobre las macrofitas de estanques, aguas lénticas, menos frecuente en aguas lóxicas indicador de aguas oxigenadas.

Staurosira pinnata Ehrenberg

Largo: 3-35 μm

Ancho: 2-8 μm

Valvas linear-elípticas con extremos bien redondeados e isopolares. El área central de la valva es lanceoladas. De 6 a 12 estrías en 10 μm .

Ecología: especie cosmopolita, en aguas moderadamente distróficas hasta en pantanos ácidos. Se encuentra principalmente en aguas continentales oligosaprobias con un contenido mineral de mediano a alto en un pH de hasta 9.3.

EUNOTIA (Ehrenberg, 1844)

Las valvas son variadamente dorsiventrales a lunadas, pueden o no ser capitadas o con ápices reflejados, algunas veces con una ondulación dorsal del margen, rectangular en vista cingular. Dos alargados plastidos en el lado ventral de la célula y extendiéndose dentro de las caras de las valvas (Cox, 1996).

ACHNANTHES Bory de St. Vincent 1822

Las células son heterovalvares y se les encuentra solitarias o formando pequeñas colonias adheridas a un substrato. Respecto al eje pervalvar, los frústulos son curvados con la valva con rafe cóncava y la valva sin rafe convexa. La forma de las valvas son lineares a lanceoladas, con estrías uni, bi o triseriadas. En la valva con rafe se presenta un pequeño estauro y un rafe central y la valva sin rafe posee su esternón con un pequeño desplazamiento hacia el centro y sin estauro.

Bentónicas, predominantemente marinas, algunos representantes de aguas continentales y subaéreos (Díaz y Maidana, 2005).

Achnantes biasoletiana Grunow

Largo: 19-35 μm

Ancho: 3-6 μm

Valva elíptica a elíptica-rómbica, elíptica-lanceolada, lineal-elíptica tendencia a ser lineal, en algunas especies es cóncava. Rafe lineal recto, llegando a ser en la parte terminal curvado, área axial lineal cerrada poco lanceolado acortado en el centro. Las estrías son radiales extendiéndose del centro al borde de la valva con una densidad en promedio de 20-27/10 μm observándose extremadamente consolidadas al final.

Ecología: perífítica, alcalifila, oligotrófica, mesohalobia, epífita, mesotermal. Se le encuentra en aguas calcáreas y aguas con alta conductividad.

Achantes exigua Grunow, 1880

Largo: 11-12 μm

Ancho: 6-7 μm

Valva con rafe en forma rómbica-elíptica, área axial lanceolada, hacia los dos extremos la valva se hace cuadrada con los ápices rostrados, presenta estauros. La densidad de estrías radiales de 24-30 /10 μm .

Ecología: Es mas frecuente en trópicos o subtropicos que en la zona templada, donde se distribuye en aguas termales. Cosmopolita, bajo condiciones muy amplias de temperatura y luz; oligohalobia o indiferente a la sal; pH 6.8 – 9 con un óptimo cerca de 8; euritermicas; indiferente a la corriente. Forma de vida: Litoral, bentonica; epipelon, epilíton, perífítica. Se le encuentra en ríos, lagos, cascadas, manantiales, gradientes de salinidad en marismas; sedimentos fósiles de lagos; se presentan en estanques de acuarios.

***Achnantes marginulata* Grunow**

Largo: 6-21 μm

Ancho: 4-7 μm

Valva elíptica, lineal-elíptica, elíptica-lanceolada terminación redondeada. Rafe lineal, área axial lanceolada cerrada en el centro, área central amplia rectangular, algunas veces ligeramente rómbica las estrías son radiales continuas 27-30/10 μm , área central elíptica rómbica.

Ecología: Se encuentra en ambientes oligotróficos, donde el agua es pobre en electrolitos, siendo esta especie considerada como buena indicadora de contaminación antrópica. Es cosmopolita se tienen registros particularmente en el hemisferio sur.

***Achnanthes minutissima* Kützinger 1833**

Largo: 11.9 μm

Valvas lanceoladas o lineal lanceoladas con extremos rostrados-capitados; rafe recto, área axial lineal angosto, área central asimétrica; estrías muy finas.

Ecología: Presenta un pH indiferente eutrófico, mesotrófico, oligohalobio mesosaprobio se encuentra en ríos, charcas, arroyos, manantiales, presas, perifítica, béntico, epifito, euritermal mesotermal eutrófico, aguas bastante mineralizadas buen indicador de altas concentraciones de oxígeno en aguas alcalinas.

COCCONEIS Eherenberg 1937

A este género corresponden células solitarias, heterovalvares y adheridas al sustrato por la valva con rafe. Las valvas son de forma elíptica, en algunas ocasiones casi circulares, con estrías uniseriadas, en raras ocasiones multiseriadas, con diferente patrón de ordenamiento en las dos valvas. En la

valva con rafe, a veces se interrumpen las estrías por un anillo submarginal. El cingulo se forma por algunas bandas.

Epifíticas, epipsámicas y epilíticas de aguas continentales y marinas (Díaz y Maidana, 2005).

***Cocconeis placentula* Ehrenberg, 1838**

Largo: 12-48 μm

Ancho: 8-22 μm

Valva elíptica, débilmente curvada a lo largo del ápice axial. Las estrías de la valva con rafe son finamente punteadas, se interrumpen cerca del margen por una figura linear, área hialina con la valva circular hasta el margen. 20-25 estrías transapicales en 10 μm en el pseudorafe reducido de la valva. En la valva con rafe, con 24-28 estrías transapicales en 10 μm .

Ecología: perifítica (epifítica, epilítica y epipsámica), oligohalobia-indiferente, alcalófila; las variedades *lineata* y *euglypta* son consideradas como oligosaprobias y pueden tolerar moderadamente aguas contaminadas, de acuerdo con Gasse (1986). Indicadora de calcio o calcifica.

***Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Cleve, 1985**

Largo: 15-24 μm

Ancho: 5-16 μm

La valva sin rafe es de forma elíptica. Presenta área axial hialina con 4 puntos formando estrías. La valva opuesta muestra rafe lineal central y un disco que interrumpe el acomodo de las estrías, posteriormente con una serie de estrías marginales, radiales en los extremos y paralelas en el centro. Los ápices son completamente redondeados. 18 estrías transapicales en 10 μm .

Ecología: perifítica, epifítica, epilítica, oligohalobia, oligotrófica a eutrófica. Se encuentra en lagos, ríos, corrientes lentas. Indicadora de poca profundidad. Es eutérmica e indiferente al pH (Gasse, 1986).

Cocconeis placentula var. lineata (Ehrenberg 1843) Van Heurck 1880-1885

Largo: 27-33 μm

Ancho: 13-16 μm

Puntos distantes que forman líneas longitudinales undulantes hialinas y presenta estrías. 18-19 μm estrías en la parte central y 16-17 en 10 μm en los polos.

Ecología: alcalifila, oligohalobia, oligosaprobia, reófilo, perifítico, epifito, eutermal, conductividad de 400-20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, fosfatos totales 0.02-0.83 mg/lt comúnmente en aguas salobres, con amplia distribución epifito a plantas acuáticas, soporta altas concentraciones de materia orgánica, y está presente comúnmente en aguas semiduras en ríos y arroyos.

PLANOTHIDIUM Round & Bukhtiyarova, 1966

Las especies del género *Planothidium* cuentan con células pequeñas, levemente curvadas en vista cingular con valvas elíptica-lanceoladas, ápices alargados en algunas ocasiones o capitados ampliamente. Estrías radiales, a veces casi transversales en la valva sin rafe, gruesas. Estrías continuas o interrumpidas centralmente en la valva con rafe y con interrupción en un lado de la valva sin rafe por una depresión en forma de herradura. En algunos taxa, esta interrupción se encuentra del lado interno. La valva con un rafe prominente, frecuentemente expandido hacia el centro y curvado hacia un lado en los ápices. El esternón puede ser de forma y ancho variable. Manto valvar con una hilera de poros inconspicua. Éste es un género separado de *Achnanthes* recientemente.

Es un género bentónico y epilítico. Cosmopolita (Díaz y Maidana, 2005).

AMPHORA Eherenberg 1844

Células solitarias, raramente se las puede observar en vista valvar ya que el cóngulo del lado dorsal es más ancho que el lado ventral y que la valva. Las dos valvas se observan en el mismo plano y del otro lado sólo se logra distinguir las bandas del cóngulo. Respecto al eje ápical, las valvas son simétricas, con extremos constrictor en algunas ocasiones y el rafe se encuentra en posición ventral. Manto del lado ventral poco profundo o ausente. Estrías uni o biseriadas.

Ecología: epifíticas, epilíticas o epipélicas. Ámplia distribución marina y pocos representantes de aguas continentales (Díaz y Maidana, 2005).

Amphora veneta Kützing 1844

Largo: 5-60 µm

Ancho: 7-18 µm

Valva elíptica con el borde liso. Estrías 26-32 en 10 µm. Centro dorsiventralmente convexo terminación lisa algunas veces ventral. Rafe filiforme terminación curva muy visible, presenta gran cantidad de poros centrales de extremo a extremo. Rafe distal usualmente visible curvo-dorsal. Área axial lineal, el área central se encuentra más amplia. Las estrías se encuentran más visibles en la parte ventral definiendo el área central; el área lateral no se encuentra definida.

CYMBELLA Agardh, 1830

Solitarias o en colonias. Valvas asimétricas respecto al eje central. El margen ventral más convexo que el dorsal; el siguiente puede ser recto o cóncavo.

Lo que permite distinguir un lado ventral y uno dorsal. Valvas paralelas arqueadas, poros redondeados, rostrados o capitado, estrías uniseriadas con fisuras frecuentemente sinuosas. Rafe central relativamente y curvado

dorsiventralmente. Uno o más estigmas a un lado del nódulo central. Se encuentra en aguas continentales. Epifíticas, epilíticas o epipélicas.

***Cymbella lata* (Grunow) Cleve 1894**

Largo: 40-70 μm

Ancho: 16-22 μm

Valva pequeña dorsoventral muy visible, terminación ventral poco convexa a lisa ampliamente elíptica a lanceolada. Rafe mediano ventral 3 a 5 μm , terminación dorsal, poros centrales inclinados, área axial lineal, área central pequeña rómbica algunas veces dorsal a ventral, estrías radiales en el centro. Terminación con estrías dorsales 16 a 17 en 10 μm .

Ecología: alcalobiótica, eutrófica, euhalobia, meso a polisaprobia, mesotermal.

***Cymbella microcephala* Grunow 1880**

Largo: 12.5-28.8 μm

Ancho: 3.3-4.8 μm

Valvas naviculoides o semilanceoladas, con el margen dorsal y ventral convexo. Extremos capitados a aguadamente rostrados, área axial muy angosta; rafe recto o ligeramente curvado central, ligeramente desplazado hacia el lado ventral, fisuras distales externas curvadas dorsalmente y estrías paralelas o suavemente radiales en el centro y radiales en los extremos. 16.5 a 26 estrías en 10 μm .

Ecología: alcalifila, indiferente mesotrófica, eutrófica, oligohalobia, indiferente beta mesosaprobia, oligosaprobia, perifítica, epifítica, mesotermal. Se encuentra en estanques, ríos, cascadas, corrientes entre musgos, en aguas con media a alta conductividad, frecuente en zonas montañosas ambientes templados altamente oxigenados indiferente al calcio.

Cymbella tumida (Brébisson) Van Heurck 1880

Largo: 65-70 μm

Ancho: 17-19 μm

Estrías: en los extremos de 9-10 en 10 μm ; en los puntos de 16-20 en 10 μm

Valva dorsiventral con un margen dorsal liso o ligeramente sinuoso, recto u ondulado, extremos rostrados, redondeados; área axial angosta, curvada, área central orbicular, asimétrica; rafe lateral con extremos distales curvados hacia el lado dorsal, proximales bulbosos hacia el ventral, estrías lineadas, radiales.

Ecología: perifítica, de manantiales, zona de cantos rodados, velocidad de corriente baja, intensidad luminosa alta. pH indiferente, alcalófilo, alcalibiontico, eutrófico, mesotrófico, oligohalobio, halófilo indiferente, mesosaprobio, oligosaprobio. Se encuentra en ríos, arroyos, lagos, corrientes, manantiales, pozos, serófilos, edáfico. perífítico, epilítico, epífito, mesotermal, eutermal, conductividad 400-20,000 $\mu\text{m}/\text{cm}$, fosfatos totales 0.02-0.29 mg/lit, ambientes alcalófilos, creciendo sobre plantas en descomposición; no crece en gran número en aguas con contaminación orgánica.

ENCYONEMA Kützing, 1833

Valvas con simetría dorsoventral, el margen dorsal más convexo que el ventral, el cual puede ser casi recto. Células solitarias o encerradas en tubos mucilaginosos (Cox, 1996).

Encyonema silesiaca Bleisch Rabenhorst 1864

Largo: 15-31 μm

Ancho: 5-9.5 μm

Valvas semilanceoladas, marcadamente dorsiventrales. Márgen dorsal convexo a fuertemente convexo y el ventral recto, a veces con una ligera protuberancia,

extremos subrostrados a rostrados, angostos, curvados hacia el lado ventral; área axial muy angosta; rafe lateral, de posición ventral, fisuras externas distales curvadas centralmente y las proximales curvadas hacia el lado dorsal, con poros centrales distinguibles, estrías dorsales suavemente radiales, la central con un estigma en el extremo, las ventrales paralelas. 8-10 estrías centrales en 10 μm y de 9-11 ventrales en μm .

Ecología. en sustrato pedregoso, formado por cantos rodados y lodo. Oligotrófico, eutrófico, oligohalobio, mesosaprobio, común en habitats reófilos, en manantiales, pozos, ríos, arroyos es un taxa perifítico y epilítico, resiste cambios bruscos en los gradientes ambientales, oligohalobios, indiferentes al pH en, aguas de baja a media conductividad.

GOMPHONEMA Ehrenberg, 1832

Células heteropolas en vista valvar y cuneda en vista lateral, a menudo (no siempre) adheridas al sustrato por almohadillas mucilaginosas o pedúnculos secretados por el polo basal. Los ápices de la valva pueden ser variadamente proyectados o capitados (Cox, 1996). Células heteropolas, libres o fijas al sustrato mediante un pie mucilaginoso simple o ramificado. Valva con un rafe mediano rectilíneo que coincide con el eje de simetría. En la base de fijación la valva es estrecha, mientras que el ápice es ancho. Contorno más o menos de forma piriforme. Frecuentemente, los polos son capitados. La valva es ornamentada por estrías finas, punteadas, el área axial es estrecha, el área central es algunas veces ligeramente asimétrica y presenta frecuentemente uno o varios poros aislados o estigmas. En la base de la valva se observan dos campos porosos lisos en el nacimiento. El rafe es rectilíneo.

***Gomphomena affine* Kützing 1844**

Largo: 30-100 μm

Ancho: 7-20 μm

La valva es cuneiforme con extremos redondeados u obtusos, angostos; el área axial es lineal y angosta; con área central transversal; posee estrías radiales a todo lo largo de la valva. 9-13 estrías en 10 μm .

Ecología. perifítica, alcalífila, mesotrófia, oligohalobia, B-mesosaprobia, se registra en arroyos, es tolerante a aguas con alta conductividad. Además, se le localiza en regiones tropicales y subtropicales (Cantoral, 1997).

***Gomphonema gracile* Ehrenberg 1838**

Largo: 48-60 μm

Ancho: 8-10 μm

Valva romboidal con extremos simétricos, rafe recto, área central estrecha con un estigma, estrías punteadas, nódulo central cargado hacia un lado.

1 estigma. 10 a 11 estrías en 10 μm .

Ecología: perifítica, epifito, presenta velocidad de corriente alta, iluminación baja, conductividad 0.03-0.08 $\mu\text{m}/\text{cm}$. pH alcalifilo, indiferente, acidofilo, mesotrófico, oligotrófico, oligohalobio, halófilo, mesosaprobio, oligosaprobio, limnobiontico, limnofilo, reófilo, ríos, arroyos, lagunas, cascadas, cenotes, es una especie aerofila, euplanctónica, perifítica, epifítica, epipelica, eutermal, mesotermal. Aguas ácidas, en sedimentos de ríos, lagunas, paredones, corrientes y cascadas, entre musgos, aguas con baja conductividad, se considera un taxa cosmopolita, común en zonas tropicales, además de ser indiferente al calcio.

***Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing 1849**

Largo: 10-36 μm

Ancho: 4-8 μm

Forma de la valva muy variable, de lanceolada a elíptica-elongada. El área axial es siempre estrecha, las estrías transversales son radiadas a paralelas y el área central es unilateralmente desarrollada, limitada por una estría mediana en un lado y con un estigma distinto en el otro lado. Rafe ligeramente curvo y lateral hacia el lado del estigma, sin extremos terminales conspicuos. Las estrías son poco radiales en el centro, y se observan más radiales en los extremos, además de ser gruesas. 7-20 estrías en 10 μm

Ecología. Esta especie se desarrolla mejor en aguas ricas en nutrientes, particularmente con desechos sanitarios o de granja. Ha sido reportada como una especie distribuida en un amplio intervalo saprobio, desde aguas xeno- y oligosaprobias hasta aguas beta y alfa-mesosaprobias (más abundantes). Los datos anteriores señalan a esta especie como tolerante a diferentes condiciones ambientales. Cosmopolita. Tiene un buen desarrollo en aguas con un pH, alrededor de 7 (su intervalo va de 4.2 a 9), y su pH óptimo va de 7.0 a 8.2. En aguas con bajas concentraciones de sal. Mesosaprobia. Perifítica, mesotermal y estenotermal. Su gran adaptabilidad explica el porque de su gran variabilidad morfológica (Lowe 1974).

Cuando es abundante es considerada como indicadora de contaminación.

***Gomphonema truncatum* Ehrenberg 1832**

Largo: 30-85 μm

Ancho: 7-11 μm

La valva es globosa, el área axial estrecha con nódulo central y una estría opuesta, las estrías son radiales; 8 a 11 en 10 μm en el área central.

Ecología: Es perifítica normalmente sésil, alcalifila, eutrófica, oligotrófica, mesotrófica, mesohalobia, oligohalobia. Se encuentra en aguas con alta conductividad, sobre macrofitas y algas filamentosas, soportando aguas contaminadas.

NAVICULA Bory 1822 *sensu stricto*

Frústulos simétricos respecto a los ejes y con valvas iguales generalmente lanceoladas a lineales. Ápices con varias formas y rafe en las dos valvas ubicado en el centro de cada una. Estrías uniseriadas formadas por lineolas.

Se le encuentra en todos los ambientes dulceacuícolas y marinos, en distintas condiciones del pH, conductividad y concentraciones de materia orgánica (Díaz y Maidana, 2005).

Navicula cryptocephala Kützing 1844

Largo: 20-40 μm

Ancho: 5-7 μm

Valvas lanceoladas o ligeramente lanceoladas, ápices gradualmente reduciéndose o débilmente rostrados o obtusamente redondeados. Rafe filiforme, área axial estrecha a muy estrecha, área central pequeña a moderadamente larga, redonda a transversalmente elíptica. Estrías fuertemente radiadas, cerca de los ápices débilmente convergente. 14-18 estrías en 10 μm .

Distribución: Cosmopolita, común en áreas cubiertas de vegetación.

Ecología: comúnmente tolerante a un amplio espectro en aguas oligotróficas, baja en sales, poco ácidas a eutróficas, moderadamente salinas y débilmente alcalinas. Los rangos de tolerancia sapróbica van de oligo a β - α mesosapróbicas.

Navicula cryptotenella Lange-Bertalot 1985

Largo: 12-40 μm

Ancho: 5-7 μm

Valvas estrechas a ampliamente lanceoladas, ápices redondeados no rostradas. Rafe filiforme a débilmente lateral, área axial estrecha, linear. Área central con un borde algo irregular, siempre pequeño. Estrías radiadas, paralelas o convergentes a las puntas. Vistas al microscopio electrónico el esternón es levantado en la superficie de la valva, con poros pequeños. 14-16 estrías en 10 μm .

Ecología: en todos los ambientes de agua dulce oligotrófica a eutrófica, excepto en algunas con muy baja o muy alta concentración de sales. Ecológicamente es interesante esta particularidad como un indicador de la calidad del agua.

Distribución: cosmopolita, muy común en áreas cubiertas de vegetación.

Navicula erifuga Lange-Bertalot 1985

Largo: 20-45 μm

Ancho: 5-7 μm

Valvas lanceoladas, elípticas-lanceoladas a linear-lanceoladas, ápices obtusos, raramente agudas. Rafe filiforme, branquias externas curvadas hacia los poros centrales y extendiéndose asimétricamente hacia el nódulo central. Área axial muy estrecha, estrecha lanceolada proximalmente, extendiéndose a un área central muy asimétrica, más o menos rectangular en el lado donde los poros centrales son desviados, lanceolados al lado opuesto. Estrías moderadamente radiadas, convergentes hacia los polos. 12-14 estrías en 10 μm .

Distribución: cosmopolita, dispersa en áreas cubierta por vegetación, pero abundante donde logra establecerse.

Ecología: aguas salobres o biotopos con alto contenido electrolítico, arriba de los niveles de contaminación (β - α mesosapróbico).

***Navicula germanii* Wallace 1960**

Largo: 26-40 µm

Ancho: 5-8 µm

Edad:

Valvas lanceoladas con relativamente poca prolongación, ápices redondeados agudos. Área axial muy estrecha, área central pequeña a moderadamente larga, circular o expandida a un rectángulo transversal. Estrías como en los taxa de especies complejas, pero cerradas. 13-15 estrías en 10 µm y 33 lineolas en 10 µm.

Ecología: en agua eutrófica que puede estar por arriba de los niveles críticos de contaminación.

Distribución: cosmopolita, en el el área cubierta por esta flora, dispersa a moderadamente común.

***Navicula symetrica* Patrick 1944**

Largo: 30-55 µm

Ancho: 5-9 µm

Valvas linear-elípticas a linear-lanceoladas, ápices reducido a apretados, obtusamente redondeados, nunca prolongados. Rafe filiforme, poros centrales cerrados, ambos proyectados hacia el lado principal, hacia donde la simetría central de los nódulos es también dirigida. Área axial muy estrecha, el área central cambia de redonda a elíptica o a rectangular, más o menos lanceolada, expandida en uno de los lados y con su distintiva asimetría. Estrías radiadas a fuertemente radiadas, aunque a menudo menos que en el área de discordancia. 14-16 estrías en 10 µm y 24-28 lineolas en 10 µm.

Ecología: común en aguas salobres y con alto contenido electrolítico, menos común en donde el contenido electrolítico es normal. Eutrófica, tolerante a la contaminación en condiciones α-mesosapróbicas.

Distribución: cosmopolita en los dos hemisferios, dispersa a relativamente común en el área cubierta por esta flora.

***Navicula lundii* Reichardt 1985**

Largo: 13-35 μm

Ancho: 4-6.3 μm

Valvas lanceoladas. Ápices con estructura acunada, obtusamente redondeada, a veces muy poco prolongada. Rafe filiforme a débilmente lateral. Área axial estrecha, área central media en tamaño, circular a transversalmente rectangular. Estrías radiadas, débilmente curvados, paralelas a convergentes hacia los ápices. 14-15 estrías en 10 μm .

Distribución: no muy conocida, dispersa en áreas cubierta por vegetación, en lugares con moderadamente alta densidad de contaminación.

Ecología: en periodo de lluvias en habitats con concentraciones de sales moderadamente altas, ej. En suelos húmedos, canales de drenaje. En asociación con *N. cryptocephala* pero fácilmente distinguible de ésta.

***Neidium* Pfitzer 1871**

Morfología de las valvas con contorno elíptico o lanceolado y polos redondeados, raramente capitados. En la región central de la mayoría el rafe termina en ganchos opuestos, se observan dentro del nódulo. Frecuentemente el rafe es bifurcado con extremos polares. La superficie de la valva presenta ornamentaciones como estrías punteadas o lineadas, las cuales se cruzan hacia el margen por las líneas longitudinales paralelas a los bordes de la frústula. Área axial estrecha, área central estrechamente pequeña, redondeada o cuadrangular, raramente ensanchada en stauros. Estrías perpendiculares al rafe, raramente oblicuas. Dentro de este último caso, el área central o el stauros son también oblicuos.

PINNULARIA EHRENBURG, 1843

Éste es un gran género en el cual la especificación es algunas veces difícil. Células solitarias o raramente en colonias. Márgenes muy extendidos en vista valvar y es variadamente lobulada o disectada, márgenes laterales convexos, ondulados o rectos y paralelos. Algunas especies tienen pirenoides conspicuos(Cox, 1996). Rafe mediano. Superficie de la valva con área axial frecuentemente extendida. El resto de la superficie valvar está ornamentada por fuertes costillas, lisas, radiales.

SELLAPHORA Mareschkowsky 1902

Solitarias y frecuentemente observadas en vista valvar. Forma de la valva lineal, lanceolada o elíptica, con polos redondeados o capitados. (Díaz y Maidana, 2005). Estrías uniseriadas con poroides pequeños redondeados. Rafe central con esternón evidente. Ápices bruscamente redondeados (Cox, 1996).

Epipélicas de aguas continentales, salinas y con influencia marina.

STAURONEIS Ehrenberg 1843

Solitarias, rara vez forman colonias. Células isovalvares e isopolares con forma naviculaceas. Valvas lanceoladas a elípticas, frecuentemente capitadas. Estrías uniseriadas formadas por pequeños poros redondeados. Las estrías se interrumpen por la presencia de un estauro en el centro de la valva.

Epipélicas de aguas continentales, con algunas formas subaéreas presentes en suelo y musgos (Díaz y Maidana, 2005).

CRATICULA Grunow 1868

Células solitarias, comúnmente observadas en vista valvar. Frústulos isovalvares, isopolares y birrafideos. Polimorfos; estrías paralelas en la valva externa y radiales en la valva interna como respuesta al estrés osmótico. Estrías transversales formadas por hileras de poros pequeños y dispuestos regularmente.

Se encuentran en sedimentos de todo tipo de aguas continentales (Díaz y Maidana, 2005).

Craticula cuspidata Kützing

Largo: 55-170 μm

Ancho: 17-35 μm

Valva lanceolada-rómbica o lanceolada redondeada con terminaciones alargadas redondeada en los extremos. Rafe filiforme algunas veces amplio con poros centrales moderadamente distantes en forma de cortos ganchos. El área axial es estrecha linear con nódulo central, área central usualmente ausente o ligeramente formada casi imperceptible, las estrías son paralelas de pequeño radio convergiendo más o menos al final, algunas veces densas 11 a 15 en 10 μm . Las areolas forman filas apicales de 22 a 26 en 10 μm .

Ecología: Cuando se encuentra en condiciones salinas muy altas se forman en pares internamente. Vive en aguas con alta conductividad, usualmente epipélica, eutrófica y tolera niveles altos de contaminación. Es cosmopolita.

***Craticula paramutica* Bock 1963**

Largo: 10-22 μm

Ancho: 4-6 μm

Valva estrecha elíptica-lanceolada terminación ampliamente redondeada algunas veces el centro cóncavo. Rafe muy delgado con terminaciones proximales difícilmente observables, área axial corta lineal se diferencia la terminación, área central con estigma. Estrías radiales continuas 17 a 22 en 10 μm .

Ecología: alcalifila, eutrófica, oligohalobia, oligosaprobia, mesotermal.

CALONEIS Cleve 1891

Forma de células variable; en lancetas con los poros punteados, redondeados o capitados, márgenes con una ondulación media saliente en la mayoría de las especies, líneas paralelas en el borde. Rafe con nódulos internos. Superficie de la valva ornamentada con estrías finamente punteadas. Estrías transapicales y perpendiculares al rafe dentro de la región media, hacia los polos éstas cambian frecuentemente de dirección y se observan radiales, formando un ángulo agudo con el rafe. Área central lisa. Algunas especies muestran un diseño en forma de media luna a una y otra parte del nódulo central (Cantoral, 1997).

***Caloneis sublinearis* (Grunow) Krammer 1985**

Largo: 19-30 μm

Ancho: 4-5 μm

Valva lineal-lanceolada con lados convexos, centro tenue y terminación amplia. Rafe extendido poco curvado casi filiforme, poros centrales pequeños poco visibles, área axial lanceolada. Presenta estrías radiales pequeñas muy finas, de 21 a 25 en 10 μm , línea marginal usualmente visible.

Ecología: oligohalobia indiferente. En aguas carbonatadas.

***Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kütz. 1844**

Largo: 45-200 μm

Ancho: 13-35 μm

Valvas asimétricas dorsiventralmente. Margen ventral ligeramente cóncavo con extremos redondeados. El canal del rafe lateral está pegado al margen valvar, hacia el centro presenta una forma de V invertida. Estrías radiales, punteadas, de 7 a 9 en 10 μm . Las fíbulas forman fuertes costillas que van de 3.5 a 5 en 10 μm .

Ecología. Se encuentra en aguas dulces y salobres en forma litoral bentónica, especialmente en aguas estancadas. Alcalífila.

RHOPALODIA O. Müller 1895

Solitarias. Comúnmente observadas en vista singular. Valvas asimétricas respecto al eje apical, lineares o arqueadas. Estrías uni a multiseriadas. Costillas transversales robustas y frecuentes. Canal rafidiano con rafe dorsal, bordeado externamente por columnas silíceas, con nódulo central conspicuo. Células muy estrechas en vista valvar, en vista conectiva es fuertemente ancha, la sección transversal sigue el plano transapical dando forma de un trapecio, con la base formada en gran parte por las cinturas; en vista valvar la célula es más o menos recurvada con un margen convexo y el otro cóncavo. El costado convexo es frecuentemente escotado en su centro, este es recorrido por el canal rafidiano dentro de una cresta saliente. Presenta ornamentaciones compuestas por costillas perpendiculares al borde convexo, las estrías más finas con una redecilla cuadriculada de aerolas muy delicadas.

Se encuentra en aguas marinas y continentales, Epipélicas y epifíticas. Resiste a bajas concentraciones de nitrógeno (Díaz y Maidana, 2005).

Rhopalodia gibba (Ehrenberg) O Müller 1895

Largo: 22-300 μm

Ancho: 7-13 μm

Valvas ligeramente curvadas en la parte ventral, presenta un vértice hacia el centro y ápices ligeramente curvados; el rafe se manifiesta sin nódulos visibles, con curvaturas en la mitad, esto debido a la forma de la valva. De 12 - 17 costillas en 10 μm .

Ecología. Se reporta en pozos estancados, charcos, zonas de deslizamiento con velocidad en corrientes lentas, ríos, manantiales, lagos, sedimentos fósiles, paredones, corrientes, presas, pozos, cenotes de agua termal. Perifítica, epífita, epipélica, ticoplanctónica, sus rangos de pH van de alcalífilos a, alcalibionticos, es indistinta a aguas de eutróficas, a oligohalobias, mesosaprobias, alfa y B-mesosaprobias, oligosaprobias. Es una especie mesotermal, eutermal, con conductividades de 400 a 20 000 $\mu\text{s/cm}$.

Epífita de aguas de moderada hasta ligeramente alta conductividad; en ríos, corrientes, presas, sedimentos de manantiales, entre musgos, corrientes suaves; zonas litorales.

DENTICULA Kützing 1928

Solitarias o en colonias. Es común observarlas en vista valvar. Valvas simétricas, lineares o lanceoladas con polos redondeados o rostrados. Estrías uniseriadas o biseriadas, formadas por poroides redondeados. Canal rafidiano unilateral con fíbulas y costillas gruesas transversales hacia el interior de la valva.

Denticula kuetzingii Grunow 1862

Largo: 17-19 μm

Ancho: 8.9 - 9.4 μm

Valva lineal lanceolada, borde paralelo-convexo, cíngulo rectangular. Rafe continuo, las fibulas se confunden con picos, 17 estrías en 10 μm .

Ecología: perifítica, alcalifila, mesotrófica, oligohalobia. En aguas con media a alta conductividad.

NITZCHIA Hassall 1845

Solitarias o en colonias. Se observan tanto en vista cingular como en valvar. Las valvas tienen forma de aguja, lineares, elípticas, lanceoladas o sigmoides, con polos redondeados, rostrados o capitados. Rafe lateral en un canal rafidiano con fíbulas internas, en lados opuestos del frústulo. Estrías usualmente uniseriadas.

Epipélicas o planctónicas. Amplia distribución marina y continental (Díaz y Maidana, 2005).

Nitzschia amphibia Grunow 1862

Largo: 6-50 μm

Ancho: 4-6 μm

Valvas lanceoladas con extremos agudos. Estrías con poroides visibles. Fíbulas fuertemente punteadas 7-9/10 μm , 13-18 estrías en 10 μm .

Ecología: cosmopolita; se encuentra desde charcas, estancadas, pozos con

flujo suave, y habitats reófilos de distinta energía. Forma parte de crecimientos porosos, mechones filamentosos de zygnematales. Epilitica, perifítica, alcalófila a alcalobiontica. Muy común en ambientes eutróficos. Común sobre macrofitas dentro de estanques y cuerpos de agua permanentes. de distintos grados de contaminación, en ambientes de alta conductividad. Presente en un amplio intervalo de condiciones ambientales, especialmente en zonas donde varía el nivel del agua, aguas muy duras (mas de 537 ppm de CaCO_3).

Nitzschia clausii Hantzsch 1860

Largo: 20-55 μm

Ancho: 3-5 μm

Valvas lanceoladas sigmoides; extremos ligeramente rostrado capitados, carina visible, estrias muy finas. 10-13 fíbulas en 10 μm .

Ecología: perifítica. Indiferente al pH, alcalófilo, eutrófico, mesohalobio, oligohalobio, indiferente saproxeno, alfa mesosaprobio, reófilo, perifítico, epilitico, béntico. Presente en aguas con alta conductividad, aguas duras (322.2 ppm de CaCO_3), aguas con altas concentraciones de oxígeno disuelto. Muy común en ríos.

Nitzschia palea (Kützinger) W. Smith

Largo: 15-70 μm

Ancho: 2.5-5 μm

Valvas lineares y adelgazadas hacia los extremos en forma de cuña. De 9-17 fíbulas en 10 μm , estrías que van de 28- 40 en 10 μm .

Ecología. Epipélica, epilítica, en aguas alcalinas, con un amplio rango de

conductividad, se le ha observado en lugares ricos en oxígeno, su pH óptimo es de 8.4, es una especie indicadora de eutroficación. (Gasse 1986).

ANOMOEONEIS Pfitzer 1871

Las células de este géneros son solitarias, normalmente se observan en vista valvar. Las valvas son lanceoladas, con polos rostrados o capitados. Estrías uniseriadas, formadas por poroides pequeños y ovalados. Las estrías son interrumpidas por una hilera hialina entre el eje valvar y el manto.

Especies epiplélicas, registradas en sedimentos de aguas continentales de alta conductividad. Presentan gran tolerancia a cambios en el potencial osmótico del ambiente (Díaz y Maidana, 2005).

SYNEDRA Ehrenberg, 1830

Células como aguja, de vida libre o epifíticas, formando extensas colonias cuando las células se unen en un mucílago. Valvas lineares, algunas veces capitadas o centralmente infladas (Cox, 1996).

Synedra ulna (Nitzsch) Ehrenberg, 1838

Largo: 70-250 μm

Ancho: 5-8 μm

L/A:

Estrías: 9-12 estrías transapicales en 10 μm

Edad: Mioceno al Reciente (VanLandingham, 1967)

Valva linear, gradualmente atenuada en los ápices. Las estrías son marcadas, paralelas, a veces siguiendo una línea punteada: pseudorafe reducido. Área central más o menos desarrollada, redonda a cuadrangular, a veces llegando a los márgenes, más larga que ancha.

Ecología: perifítica a planctónica, oligohalobia-indiferente, alcalófila, oligosaprobia a beta-mesosaprobia, prefiere aguas eutróficas, ampliamente distribuida en todos los ambientes de agua dulce.

LUTICOLA Mann en Round *et al.*, 1990

Células solitarias, generalmente lineares, lanceoladas o elípticas, con ápices bruscamente redondeados a supcapitados. Un único plástico con un pirenioide central, dos lóbulos extendiéndose bajo cada cara de la valva, ensamblando longitudinalmente bajo el rafe. Ordinariamente con estructuras de poros(Cox, 1996) .

10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La relativa importancia de los parámetros ambientales en la explicación de la composición de las diatomeas reunidas varía con las áreas geográficas (Potapova y Charles, 2002). Además la presencia de una comunidad de diatomeas, es un índice inequívoco de las condiciones que prevalecen (Del Toro, *et al.*, 2004).

Para llevar a cabo el análisis estadístico se realizaron varias pruebas de análisis con el propósito de decidir aplicar un método que aportara una mayor explicación y que fuera más representativo de las condiciones registradas. Ya que una de las mayores variables de comparación con las tendencias fisicoquímicas fueron las diatomeas, se sometieron al paquete de análisis de cluster y de Componentes Principales (ACCP); uno por especies y otro por parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados para cada época con lo cual se obtuvo lo siguiente.

10.1. Análisis estadístico del periodo de secas

El cluster por análisis de parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados del río Turbio (Figura 36) en época de secas da como resultado la formación de tres grandes grupos; por un lado se agrupan las estaciones de Presa de Silva, El Tecolote y San Juan de la Puerta. El segundo grupo lo conforman las estaciones de Manuel Doblado, Crucitas y Planta Tratadora. El tercer grupo solo el manantial Cuerámaro lo conforma. Estos grupos evidencian que a partir de la parte media del río es en donde se autodepura gracias a las condiciones tanto físicas como químicas que en esta parte prevalecen, por lo tanto existen valores que indican una mejor calidad de agua que la parte alta, sobre todo en el manantial.

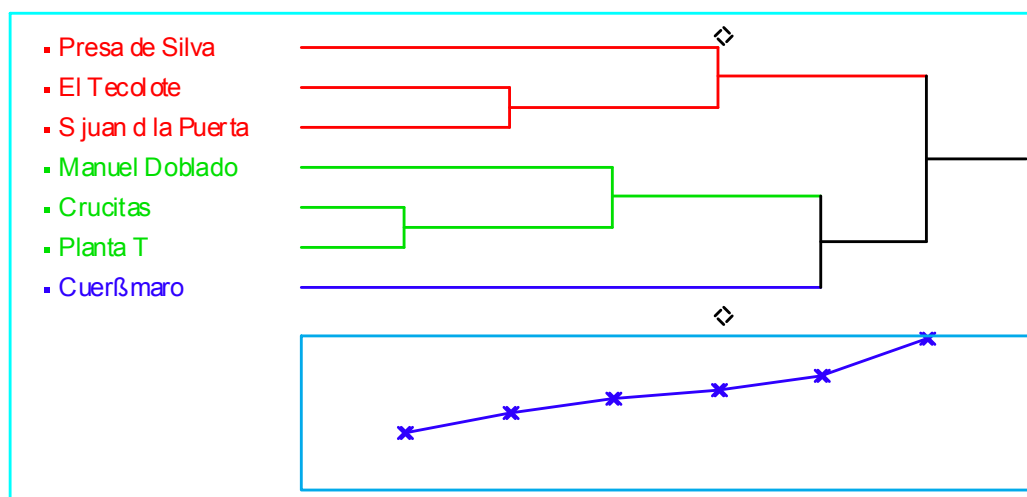


Figura 36. Cluster por parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados del río Turbio en época de secas.

El análisis de componentes principales respecto a parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados en época de secas (Figura 37), nos muestra la formación de tres grupos de acuerdo a los valores obtenidos con el análisis (Tabla 3). El primero formado por las estaciones de San Juan de la Puerta, El Tecolote y Presa de Silva, ya que comparten las más altas concentraciones de nutrientes, así como de cromo y zinc.

Otro grupo lo conforma solamente la estación Cuerámaro. Éste se caracteriza porque al ser un manatíal, presenta condiciones muy diferentes a las demás estaciones que han sido más influenciadas por actividades antrópicas.

Al tercer grupo lo integran nuevamente las estaciones de Manuel Doblado, Crucitas y Planta Tratadora. Los tres sitios conforman las estaciones de la parte media hacia el final del río y son semejantes en cuanto a los parámetros fisicoquímicos.

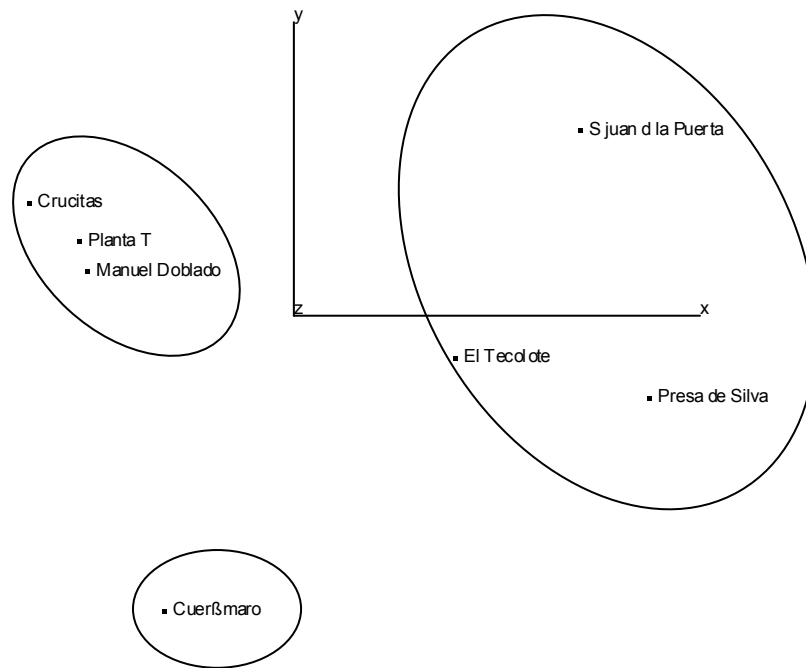


Figura 37. ACP por parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados del río Turbio en época de secas.

OD mg/l	-0.24318	0.18939	-0.25164
Cond Ms/s	0.0423	0.33493	-0.27841
pH	0.01531	0.43838	0.10802
T °C	-0.19509	0.33688	0.27298
STD gr/l	-0.21099	0.31496	0.29619
ST	0.23767	0.06388	-0.07864
Nitratos	0.37656	-0.14915	-0.04559
Nitritos	0.35166	-0.07272	0.12445
Fósforo	0.2415	0.19778	0.23854
Amonio	0.38368	0.08398	0.08513
Cr	0.38274	0.09872	0.01572
Zn	0.22257	0.25354	-0.20508
As	-0.0538	0.3003	0.45583
Cd	0.05359	0.34643	-0.40411
Pb	0.10293	0.28701	-0.34343
DQO	0.34117	0.05205	0.25694

Tabla 3. Valores obtenidos para el ACP por parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados del río Turbio en época de secas.

En el análisis de cluster por especies para época de secas (Figura 38), muestra tres grupos formados, siendo los dos grupos de los extremos Presa de Silva y

Cuerámaro con la mayor diferencia de especies identificadas. En el primero domina *Nitzschia capitellata*, mientras que en el manantial Cuerámaro dominan especies del género *Achnanthes*. En el centro se forma un tercer grupo con las estaciones del Tecolote, San Juan de la Puerta, Planta Tratadora, Crucitas y Manuel Doblado compartiendo tanto abundancia como diversidad de especies. Es de resaltar que las diatomeas que conforman el tercer grupo son comunes en ríos contaminados.

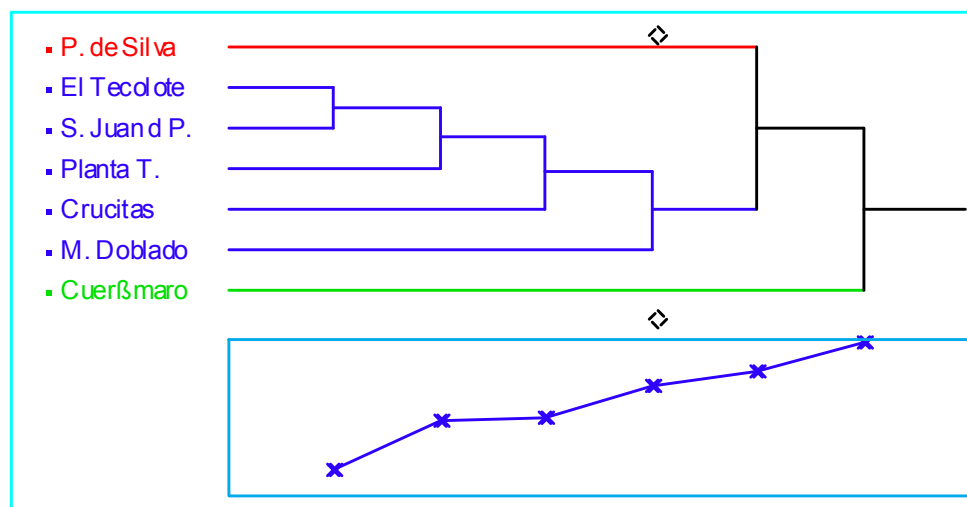


Figura 38. Cluster por especies en época de secas.

El análisis de componentes principales por especies en época de secas (Figura 39 y tabla 4), muestra que se forman nuevamente tres grupos. Uno conformado solamente por el manantial Cuerámaro, caracterizado por contar con la mayor diversidad de especies por lo que se separa de los demás grupos y estaciones. Siendo un manantial, las especies de diatomeas registradas indican condiciones de buena calidad de agua. Se aprecia que la mayoría de los taxa de este sitio no habita en otras estaciones y éstas pertenecen al género *Achnanthes*.

Un segundo grupo se aísla con una sola estación; Presa de Silva. Habitan aquí especies que no se registran en los demás sitios. Es una de las localidades con mayor grado de contaminación siendo consistentes las especies indicadoras de ambientes con altas concentraciones de nitratos, nitritos, amonio y cromo, entre

las que destacan *Stephanodiscus medius*, *Cyclostephanos dubius*, *Nitzchia palea* y *Nitzchia capitellata*.

El tercer grupo está conformado por el conjunto de estaciones que drenan suelos donde se vierten una gran cantidad de agroquímicos y son El Tecolote, Manuel Doblado, San Juan de la Puerta, Crucitas y Planta Tratadora. Todas ellas comparten tanto abundancia como diversidad de especies.

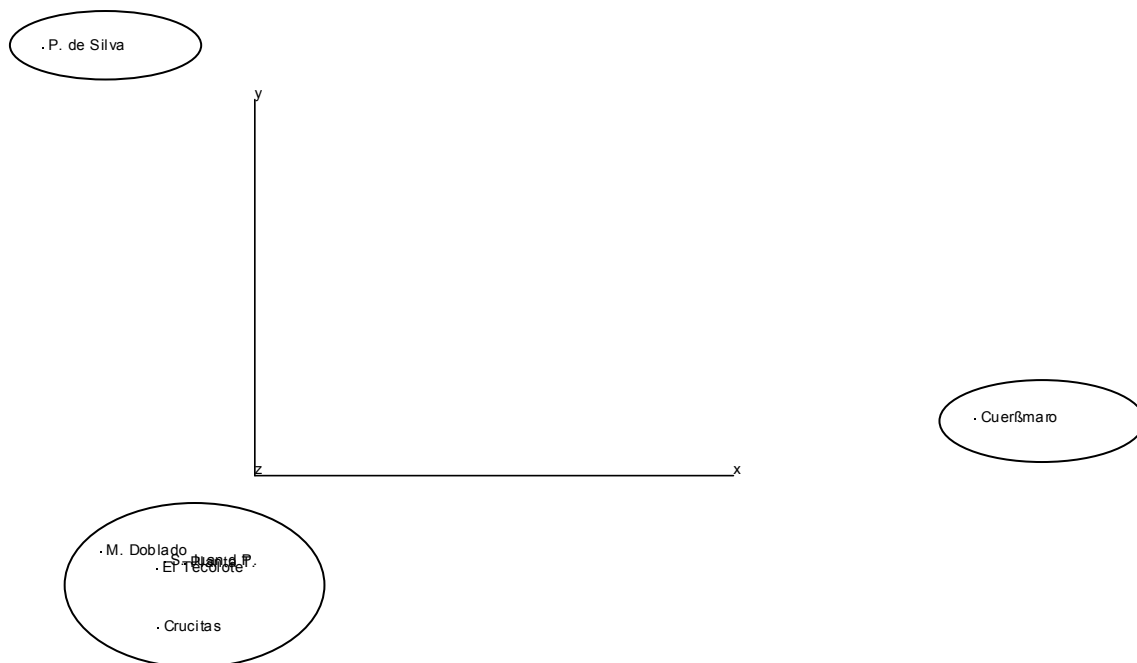


Figura 39. ACP por especies en época de secas.

<i>Aulacoseira granulata</i>	-0.06942	0.25601	-0.04443
<i>Cyclostephanos dubius</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	-0.04709	-0.04593	0.29349
<i>Stephanodiscus carconensis</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752
<i>Stephanodiscus medius</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Stephanodiscus niagarae</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752

<i>Fragilaria capucina</i>	-0.00849	0.26497	0.085
<i>Eunotia bilunaris</i>	-0.00985	0.27715	-0.02313
<i>Achnanthes acares</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Achnanthes exigua</i>	-0.02956	-0.09324	-0.12015
<i>Achnanthes hungarica</i>	-0.09317	0.15528	0.21423
<i>Achnanthes minutissima</i>	0.0613	-0.05669	-0.11409
<i>Achnanthes rosii</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Cocconeis placentula</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Planotidium lanceolatum</i>	-0.02971	-0.05649	-0.06577
<i>Amphora veneta</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Cymbella lata</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752
<i>Cymbella aff. microcephala</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Cymbella tumida</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Gomphonema affine</i>	0.1968	0.00655	-0.00105
<i>Gomphonema gracile</i>	0.21909	0.02823	0.01312
<i>Gomphonema laticollum</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Gomphonema parvulum</i>	0.20652	0.04228	0.08461
<i>Gomphonema pumillum</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Gomphonitzchia</i>	-0.02956	-0.09324	-0.12015
<i>Navicula cryptocephala</i>	-0.04799	-0.04786	0.29375
<i>Navicula cryptotenella</i>	-0.02956	-0.09324	-0.12015
<i>Navicula declivis</i>	-0.04709	-0.04593	0.29349
<i>Navicula erifuga</i>	-0.0537	-0.02147	0.29424
<i>Navicula pygmaea</i>	0.11806	0.01518	0.25729
<i>Navicula symetrica</i>	-0.05558	-0.07189	0.25628
<i>Neidium productum</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Pinnularia brandelii</i>	-0.05397	0.18097	-0.04837
<i>Sellaphora pupula</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752

<i>Epithemia turgida</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Stauronies phaenicenteron</i>	0.04322	0.27224	-0.01755
<i>Denticula ketzenguii</i>	-0.00561	-0.11785	0.01278
<i>Nitzchia amphibia</i>	-0.0566	-0.04923	-0.09808
<i>Nitzchia capitellata</i>	-0.02126	-0.05382	-0.03614
<i>Nitzchia hungarica</i>	-0.01184	0.08063	0.29125
<i>Nitzchia microcephala</i>	-0.02956	-0.09324	-0.12015
<i>Nitzchia palea</i>	-0.02422	-0.063	-0.04759
<i>Nitzchia sigma</i>	-0.04709	-0.04593	0.29349
<i>Nitzchia umbonata</i>	0.21536	0.02174	0.0088
<i>Encyonema silesiaca</i>	-0.02126	-0.05382	-0.03614
<i>Staurosirella pinnata</i>	-0.09349	0.22115	0.11764
<i>Diadesmis confervacea</i>	-0.04709	-0.04593	0.29349
<i>Craticula paramutica</i>	-0.04709	-0.04593	0.29349
<i>Caloneis aff. sulinear</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Craticula cuspidata</i>	0.21934	0.0362	0.01855
<i>Staurosira construens</i>	-0.06447	0.26521	-0.02752

Tabla 4. Valores de ACP por especie en época de secas.

10.2. Análisis estadístico del periodo de lluvias

Para época de lluvias el análisis de cluster (Figura 40), que involucra parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados divide al río en cuatro grupos, el primero conformado por las estaciones de El Tecolote y San Juan de la Puerta, otro es Manuel Doblado y Planta Tratadora, Cuerámaro, La Loma y El Salitre como tercer grupo y les sigue en el otro extremo Corralejo con características individuales por lo que conforma un cuarto grupo.

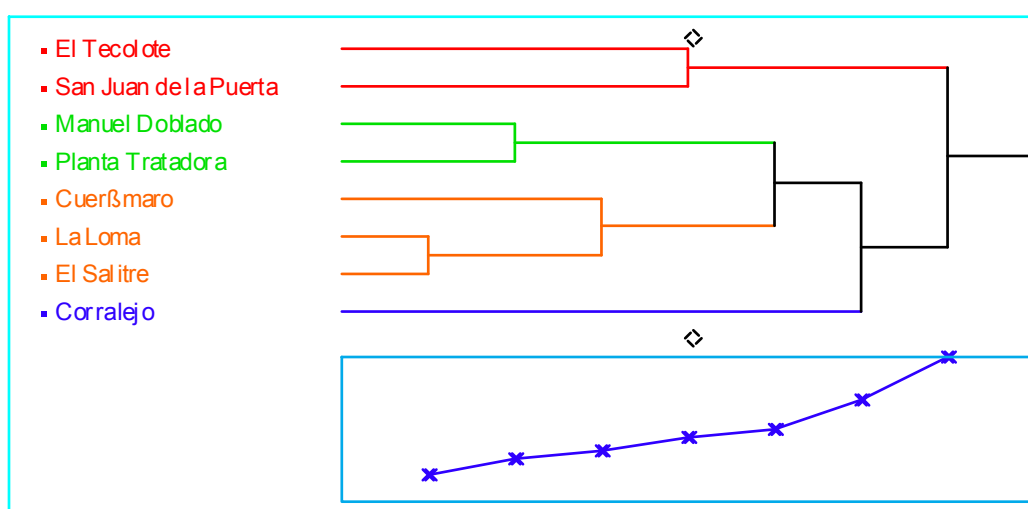


Figura 40. Cluster por parámetros fisicoquímicos, nutrientes y metales pesados en época de lluvias

En el análisis por componentes principales se observan tres grupos (Figura 41), en el que de acuerdo a la concentración de nutrientes, parámetros fisicoquímicos y metales pesados (Tabla 5), se relacionan por un lado El Tecolote y San Juan de la Puerta mostrando similitud sobre todo por presentar las más altas concentraciones de cromo, zinc y amonio, cadmio, nitratos de todas las estaciones.

Un segundo grupo es formado por Corralejo; debido a las condiciones en que este sitio se encuentra, muestra los más altos valores de la demanda química de oxígeno y de concentración de arsénico y sólidos totales así como el pH más ácido de todas las estaciones.

El grupo formado por La Loma, El Salitre, Cuerámaro, Manuel Doblado y Planta Tratadora revelan para la parte media y baja del río, aguas más constantes en los rangos de concentraciones en lo que se refiere a los parámetros tomados en cuenta para este análisis. Es en esta zona en donde existe una mayor concentración de oxígeno disuelto.

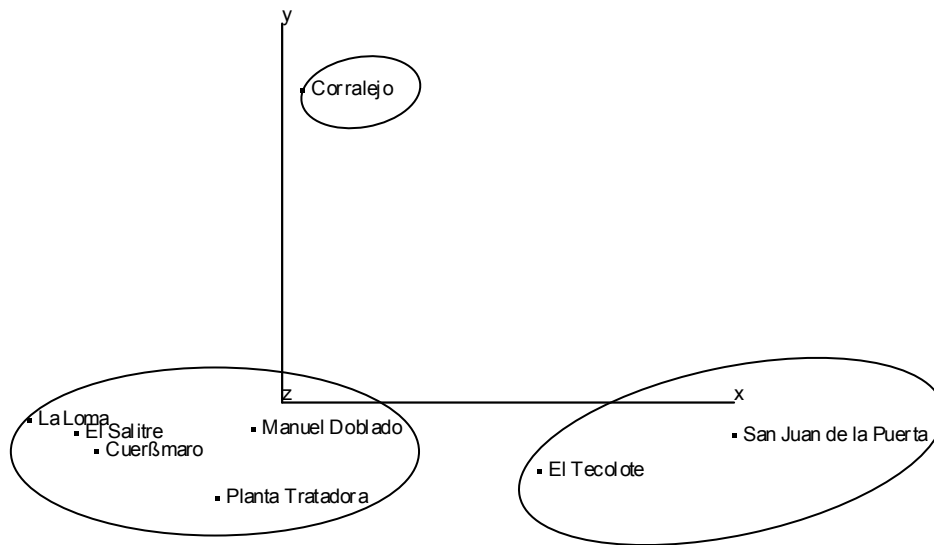


Figura 41. ACP por nutrientes, parámetros fisicoquímicos y metales pesados en época de lluvias.

OD mg/l	-0.17494	0.15382	0.58284
Cond. Ms/s	0.32695	-0.02612	0.07712
pH	-0.00781	-0.41966	0.3267
T °C	-0.19668	0.26882	0.45732
STD gr/l	0.32702	-0.03014	0.05668
Cr	0.3293	0.02909	0.18228
Zn	0.29138	0.06499	0.29759
As	0.12901	0.39862	-0.37346
Cd	0.32347	-0.00974	-0.01446
Pb	0.30292	-0.05311	0.10114
ST	0.01484	0.50718	0.15378
Nitratos	0.26752	0.00803	0.11671
Nitritos	0.24599	-0.03292	-0.03272
Fósforo	0.26324	0.11824	-0.12246
Amonio	0.32189	-0.11302	0.10091
DQO	0.07232	0.52378	0.00681

Tabla 5. Valores del ACP por nutrientes, parámetros fisicoquímicos y metales pesados en época de lluvias.

El análisis de cluster por especies en época de lluvias (Figura 42) revela la formación de cuatro grupos en cuyos extremos están El Tecolote por un lado y Manuel Doblado por el otro de acuerdo con las condiciones que ofrecen para la formación de comunidades de diatomeas en cada uno. El mayor grupo lo conforman las estaciones de San Juan de la Puerta, La Loma, El Salitre, Corralejo y Planta Tratadora indicando similitud en cuanto a diversidad se refiere. Cuerámaro es el otro grupo, que nuevamente se separa de los demás debido a la calidad de agua que presenta y por lo tanto de taxa registrados.

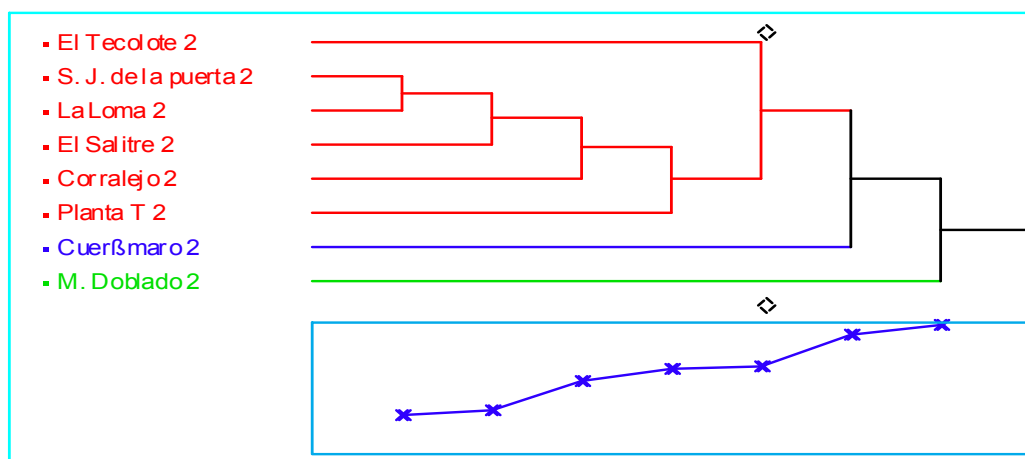


Figura 42. Cluster por especies en época de lluvias.

Según el análisis de componentes principales por especies para la época de lluvias (Figura 43) y de acuerdo con los valores obtenidos por medio del mismo (Tabla 6), divide a las estaciones del río Turbio en cuatro grupos.

Al primero sólo pertenece la estación Manuel Doblado, al que varias especies de *Pinnularia* y *Navicula* lo caracterizan, cuyas aguas presentan sólidos totales y arsénico.

El segundo grupo lo conforma también una sola estación, ésta es Cuerámaro por presentar una mayor diversidad de especies; sobre todo pertenecientes al

genero *Achnanthes*, *Cocconeis placentula*, *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, y tal como en la época de secas la mayoría de los taxa no se encuentra en las demás estaciones, por lo que se puede comprobar que las habitantes de este manantial son indicadoras de buena calidad de agua.

Un tercer grupo aísla a las estaciones El Tecolote, Planta Tratadora y Corralejo en las que se distribuyen la mayor diversidad de especies registradas en un solo sitio; no obstante, se encuentran también especies tolerantes con abundancia significativa como *Nitzchia amphibia* y *Nitzchia capitellata*.

El resto de las estaciones, San Juan de la Puerta, La Loma y El Salitre conforman el cuarto grupo en el que se encuentra la mayor abundancia de las especies más características de todo el río; *Nitzchia capitellata*, *Nitzchia amphibia* y *Gomphonema parvulum* son los taxa más tolerantes del rango de parámetros químicos y fisicoquímicos estimados en el presente estudio y llegan a formar comunidades monoespecíficas en dichos sitios.

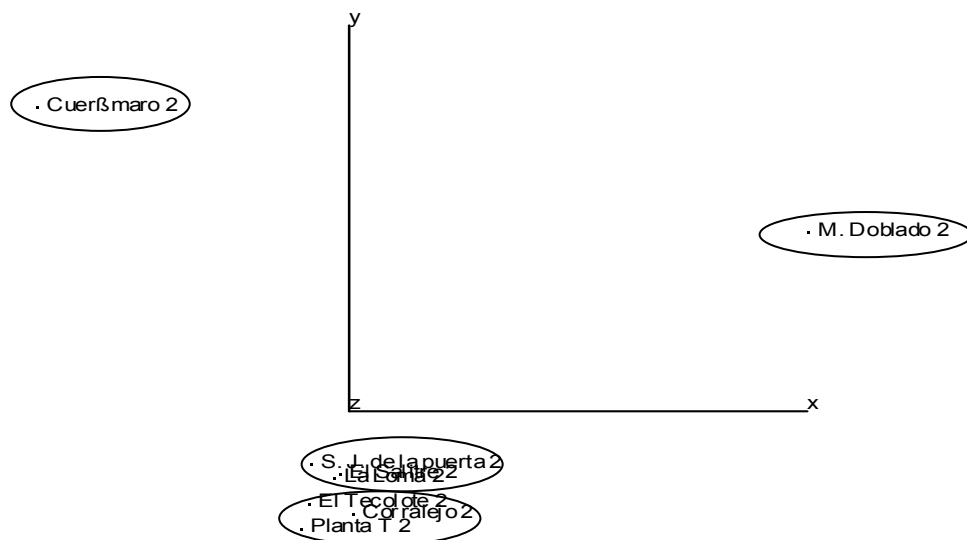


Figura 43. ACP por especies en época de lluvias.

<i>Aulacoseira granulata</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Cyclostephanos dubius</i>	0.14791	0.0261	-0.18722	0.0143
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.16774	0.1245	0.02566	-0.11708
<i>Stephanodiscus sp.</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Fragilaria capucina</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Eunotia bilunaris</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Achnanthes acares</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Achnanthes biasoletiana</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Achnanthes exigua</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Achnanthes hungarica</i>	-0.01211	-0.10107	-0.17857	-0.11829
<i>Achnanthes aff. marginulata</i>	-0.00447	-0.04204	0.01566	-0.03702
<i>Achnanthes minutissima</i>	-0.1333	0.21345	0.01776	-0.00007
<i>Achnanthes pracipua</i>	-0.01725	-0.06237	-0.27423	0.13172
<i>Achnanthes rosii</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Cocconeis placentula</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Amphora veneta</i>	-0.02091	-0.02852	0.04726	-0.2799
<i>Cymbella tumida</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Gomphonema affine</i>	-0.00392	-0.08747	0.05756	-0.25375
<i>Gomphonema gracile</i>	-0.10432	0.06263	0.19321	0.19825
<i>Gomphonema laticollum</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Gomphonema mexicanum</i>	-0.02101	-0.09105	0.21989	0.19221
<i>Gomphonema parvulum</i>	-0.00177	-0.07407	0.0762	-0.07057
<i>Gomphonitzchia</i>	0.00119	-0.0699	0.03686	-0.28189
<i>Navicula acomoda</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Navicula cryptocephala</i>	0.17541	0.02585	0.10264	-0.123
<i>Navicula cryptotenella</i>	0.2024	0.11093	0.03148	0.0385

<i>Navicula erifuga</i>	-0.02097	-0.07988	0.21224	0.23152
<i>Navicula gerlofii</i>	0.00119	-0.0699	0.03686	-0.28189
<i>Navicula pygmaea</i>	0.20411	0.11378	0.02236	0.05171
<i>Navicula symetrica</i>	-0.02487	-0.13236	0.2478	0.12306
<i>Pinnularia brandelii</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Pinnularia gibba</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Pinnularia lundii</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Pinnularia microstauron</i> var. <i>brebisonii</i>	-0.02097	-0.07988	0.21224	0.23152
<i>Pinnularia stomatophora</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Pinnularia subcapitata</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Roicosphenia abbreviata</i>	-0.01725	-0.06237	-0.27423	0.13172
<i>Selaphora pupula</i>	0.19962	0.09923	0.05421	0.08382
<i>Stauroneis phoenicenteron</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Rhopalodia gibba</i>	0.00119	-0.0699	0.03686	-0.28189
<i>Denticula ketzenguii</i>	-0.01725	-0.06237	-0.27423	0.13172
<i>Nitzchia amphibia</i>	-0.01255	-0.08877	0.24681	-0.01494
<i>Nitzchia capitellata</i>	-0.00765	-0.0621	-0.23829	0.09444
<i>Nitzchia clausii</i>	-0.01725	-0.06237	-0.27423	0.13172
<i>Nitzchia hungarica</i>	0.19994	0.10495	0.05425	0.0658
<i>Nitzchia inconspicua</i>	-0.00732	-0.10576	0.12015	-0.2063
<i>Nitzchia palacea</i>	-0.13697	0.21083	0.01257	-0.00622
<i>Nitzchia palea</i>	0.19797	0.08983	-0.0472	0.03293
<i>Nitzchia umbonata</i>	0.15379	0.02373	0.06199	-0.06747
<i>Craticula cuspidata</i>	-0.02097	-0.07988	0.21224	0.23152
<i>Diadesmis conforvacea</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Encyonema silesiaca</i>	-0.0362	-0.06681	0.22251	0.20307
<i>Eolimna subminuscula</i>	-0.02814	-0.10558	0.0711	0.28266
<i>Nupela chilensis</i>	-0.01725	-0.06237	-0.27423	0.13172
<i>Staurosira construens</i>	0.20138	0.12487	0.00455	0.02968
<i>Synedra ulna</i>	-0.09475	0.04046	-0.21269	0.16507

Tabla 6. Valores del ACP por especies en época de lluvias.

Nitzchia capitellata, *Nitzchia amphibia*, *Nitzchia palea* y *Gomphonema parvulum* son las más abundantes a lo largo de todo el río y las más tolerantes a concentraciones elevadas tanto de nutrientes como a los más extremos parámetros fisicoquímicos registrados en el río Turbio. De éstas, las pertenecientes al género *Nitzchia* son las predominantes en estaciones con presencia de metales pesados y alta demanda química de oxígeno; en particular, se forma una comunidad monoespecífica por *Nitzchia capitellata* en sitios con alta concentración de nitritos, nitratos zinc y cromo.

En el caso particular de la presente investigación, el uso de las diatomeas como bioindicadores permite conocer las características reales de cada estación y de todo el río al identificar las especies dominantes (*Nitzchia amphibia*, *Nitzchia capitellata*, *Nitzchia amphibia* y *Gomphonema parvulum*) como tolerantes a condiciones de contaminación y , las preferencias ecológicas de las demás especies registradas.

La contaminación del río Turbio es preocupante; se está ocasionando un constante proceso de eutrofización que trae como resultado una pérdida de biodiversidad, dicha situación es claramente visible en la estación Corralejo, agua fuertemente influenciada por la industria, en dónde no se logran observar especies de diatomeas en periodo de secas.

11. CONCLUSIONES

“La problemática ocasionada al cauce como resultado de la degradación ambiental derivada del depósito continuo de descargas domésticas e industriales así como el cambio del régimen hidráulico a la construcción de presas aguas arriba, ha ocasionado afectaciones tanto a la población como a la estructura misma del ecosistema, que va desde el riesgo constante por inundaciones cuando el régimen pluviométrico sobrepasa la media normal de precipitación hasta problemas de salud pública por la presencia constante de elementos contaminantes en el lecho del río” (Diagnóstico Ambiental Salamanca).

Éste representa el primer trabajo con un inventario taxonómico de diatomeas para la zona del río Turbio (74 especies en 29 géneros), por lo que las especies descritas representan el primer registro para la región y de acuerdo con los resultados obtenidos, se afirma que existen variaciones espaciales y temporales de las comunidades que se relacionan con parámetros físicoquímicos y químicos, y se identifican las especies indicadoras de distintas condiciones ambientales ya que se logra observar que si existen asociaciones de especies de diatomeas con contaminantes específicos en el río.

El grado de contaminación que se manifiesta en el río Turbio se basa en parámetros como pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno, nitritos, nitratos, fosfatos, amonio así como por la presencia de varios metales pesados, por lo que se pueden comparar las condiciones ambientales de las diatomeas con estudios previos de otras regiones.

Las unidades litológicas identificadas para diferentes sitios a lo largo del río Turbio no tienen gran influencia en cuanto al grado de lixiviación como para

afectar las condiciones geoquímicas, de lo contrario al agua del río mostraría una tendencia hacia condiciones neutras.

Es posible relacionar parámetros ambientales con la distribución de diatomeas por lo que este estudio puede ser utilizado como índice para estudios de otras regiones

12. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio J. 2001. Hidrology of the Lerma-Chapala Watershade. The Lerma-Chapala. Watershade. Evaluation and management. Chapter 1. KA/PP.USA: 3-30
- Aston B. 2006. Stable Isotopos as Archives of Environmental Change in Central Mexican Freshwater Lakes: Laguna Zirahuén, Michoacán. 10th Internatonal Paleolimnology. USA
- Bradbury J. P. 1982. Paleoecological studies at Lake Pátzcuaro on the West Central Mexican Plateu and at Chalco in the Basin of Mexico. Quaternary Research 17: 56-70
- Blinn, D. W., Halse S. A., Pinder A. M., Shiel R. J., McRae J. M. 2004. Diatom and micro-invertebrate communities and environmental determinants in western Australian wheatbelth: a response to salinitation. Hidrobiologia 528:229-248
- Bojorge G. M., Cantoral U. E. 2005. Diatomeas epilíticas como indicadoras de la calidad del agua del río Magdalena, México, D. F. VII Congreso de ficología de Latinoamérica y el Caribe. V Reunión iberoamericana de ficología. Cuba: 46
- Cantoral U. E. A., Carmona J. J., Montejano G. 1997. Diatoms Of Calcareus Tropical Springs In The Central Region Of México. Cryptogamie, Algal. Vol 18 (1): 19-46
- Cantoral U. E. A. 1997. Diatomeas (Bacillariophyceae) de ambientes lóticos en la cuenca baja de la Huasteca Potosina. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.

- Cantoral U. E. A., Aboal S. M. 2001. El Marjal Pego – Oliva: evolución temporal de la flora de microalgas. *Limnética* 20 (1): 159-171
- Cox E. J. 1996. Identification of Freshwater Diatoms from Live Material. Chapman & Hall. Reino Unido
- De León V. L.. F., Hansen A. M. sistemas de Información Geográficos para Identificar Zonas Potencialmente Contaminadas por Metales Pesados. IMTA
- Del Toro J., Schuster J. P., Kurosawa J., Araya E., Contreras M. 2003. Diagnostico De La Calidad Del Agua En Sistemas Loticos Utilizando Diatomeas Y Macroinvertebrados Bentónicos Como Bioindicadores Rio Maipo (Santiago Chile). Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica
- Descy J. P. y Ector L. 1997. Use of diatoms for monitoring rivers in Belgium and Luxemburg: 128-137. In: Prygiel J. B. A. Witton and J. Bukowsa (Eds.). 1997. Use of algae for monitoring rivers III. Centre Tertiaire de l'Arsenal
- Díaz P. C., Maidana N. I. 2005. Diatomeas de los Salares Atacama y Punta Negra II Región. Chile. Centro de ecología aplicada. Minera escondida Ltda. Chile.
- Gajón E. V. R. 2005. Taxonomía Y Distribución Longitudinal de la clase "Bacillariophyceae" En El Río Chiquito Mpio. De Morelia Mich. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- García M. J.V. 1996. Diatomeas de una zona de jales mineros de Guanajuato. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.

- Gold C., Feurtet M. A., Coste M., Boudou A. 2002. Field transfer of periphytic diatom communities to assess short-term structural effects of metals (Cd, Zn) in rivers. *Water Research*, vol. 36: 3654-3664
- Hansen A., Afferden V. 2004. The Lerma-Chapala . Watershed. Evaluation and management. Toxic substances. Dynamics and accumulations. Chapter 4. USA
- Israde A. I. 1999. Los Lagos Volcánicos y Tectónicos de Michoacán. La Carta Geológica de Michoacán Escala 1:250 000. IIM. UMSNH. México.
- Jonnalagadda S. B., Mhere G. 2001. Water Quality Of The Odzi River In The Eastern Highlands Of Zimbabwe. *Water Research*. Vol. 35, No. 10: 2371-2376
- Kelly M. G. 1995 Use of community-based indices to monitor eutrophication in rivers. *Environmental Conservation* (in press).
- Kelly M. G., Whitton B. A. 1995. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* 7: 433-444
- Kelly M. G., Whitton B. A. 1995. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology* 7: 433-444
- Kelly M., G. 1998. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe. *Journal of Applied Phycology*. 10 : 215-224.
- Krammer K. & H. Lange-Bertalot. 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart – New York. Germany. Band 2/2. Pp. 1 - 611.

- Lange-Bertalot H. 1979. Pollution Tolerance of Diatoms as a Criterion for Water Quality Estimation. *Nova Hedwigia*, Beiheft 6: 285-304
- Lowe R. L. 1974. Environmental Requirements and Pollution Tolerance of Freshwater Diatoms. U. S. Environmental Protection Agency. USA
- Martínez M. P., García M. M., Arellano G. J. C. 2005. Distribución De Metales Y Iones Mayores En La Subcuenca Del Río Turbio, Guanajuato. Consideraciones Genéticas. Agm. V Congreso De Aguas Subterráneas. Hermosillo, Sonora
- Moreira A., Seisdedo M., Leal S., Abatte M., Comas A., Alonso C., Delgado G., Regadera R. 2005. Composición Y Abundancia Del Fitoplancton De La Bahía De Cienfuegos, Cuba. VII Congreso De Ficología De Latinoamérica Y El Caribe. V Reunión Iberoamericana De Ficología. Resúmenes. Cuba: 17
- NOM-001-ECOL-1996. Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales En Aguas Y Bienes Nacionales. Normas Oficiales Mexicanas.
- Oliva M. M. G., Ramírez M. J. G., Garduño S. G., Cañetas O. J., Ortega M. M. 2005. Caracterización diatomológica en tres cuerpos de agua de los humedales de Jilotepec-Ixtlahuaca, Estado de México. *Hidrobiológica*. 15 (1): 1-26
- Potapova M. G. , Charles D. F. 2002. Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients. *Journal of Biogeography*, 29: 167-187
- Presa de Silva. Ejemplo de cooperación regional ambiental en América del Norte.

- Prygiel J. 1991. Use Of Benthic Diatoms In Surveillance Of The Artois-Picardie Basin Hidrobiological Quality. Use Of Algae For Monitoring Rivers. Institut für Botanik, Universität Innsbruck.
- Rosas A., Velasco R., Belmont A., Báez & A. M. 1993. The Algal Community As An Indicator Of The Trophic Status Of Lake Patzcuaro, México. *Environmental Pollution* 80: 255-264
- Seisdedo M., Moreira A. R. 2005. Comportamiento De Las Características Físico-Químicas Y Del Fitoplancton En La Bahía De Cienfuegos, Cuba. Vii Congreso De Ficología De Latinoamérica Y El Caribe. V Reunión Iberoamericana De Ficología. Resúmenes. Cuba: 19
- Vázquez S. G., Castro M. G., González M. I., Pérez R. R., Castro B. T. 2006. Bioundicadores Como Herramientas Para Determinar La Calidad Del Agua. *ContactoS* 60, 41-48
- Veitia C. E., Font B. Y., Barbón C. E. 2005. Exámen De La Contaminación Orgánica En Aguas Del Río San Juan, Cuba, Mediante Bioindicadores Del Fitoplancton. Vii Congreso De Ficología De Latinoamérica Y El Caribe. V Reunión Iberoamericana De Ficología. Resúmenes. Cuba: 18
- Velázquez B. M. M. 2004. Comportamiento de las diatomeas ante el efecto de episodios volcánicos en cuencas lacustres del centro de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. UMSNH. México.
- Wetzel R. G. 1981. *Limnología*. Michigan State University. Ed. Omega. Barcelona. 679 pp.
2003. ACUERDO por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada Río Lerma-Chapala, así como la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas que comprende

dicha zona hidrológica. Diario Oficial. Poder Ejecutivo. Secretaría De Medio Ambiente Y Recursos Naturales.

2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Turbio, Estado de Guanajuato. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica

Las diatomeas, nuevos bioindicadores de la calidad mediambiental del agua en los ríos de Cataluña, Universitat de Barcelona, Crónica universia.

Ligas de internet:

Garza A. V., Badii M., Fernández S. I.

<http://www.uacj.mx/publicaciones/sf/Vol2num4/Articulo.htm>

Odum, 1972 <http://www.uacj.mx/publicaciones/sf/Vol2num4/Articulo.htm>

(Rosenberg & Resh 1993) en Evaluar calidad de agua <http://www2.udel.edu/~palma/continental.html>).