



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS,
METALURGIA Y GEOLOGÍA

**“BIOEVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUAS
SUPERFICIALES DEL RÍO CHIPOCO UTILIZANDO
INDICADORES DE DIATOMEAS EPILÍTICAS EN
MACRÓFITOS DEL DISTRITO MINERO DE
MOLANGO, HIDALGO, MÉXICO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO ACADÉMICO DE
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA
JOSÉ ÁNGEL SÁNCHEZ SÁMANO

DIRECTORA DE TESIS
DRA. MARÍA JESÚS PUY Y ALQUIZA

GUANAJUATO, GTO, FEBRERO DE 2025

DEDICATORIA

A mis padres

Esta es una evidencia más del esfuerzo y apoyo que me han brindado toda la vida, han sido pilares fundamentales para mí, siempre estaré orgulloso y agradecido por ello.

A Dios y a la vida

Por la sabiduría, vivencias, oportunidades y fortaleza en mi camino.

A mí mismo

Por soñar, ser apasionado en cada momento y fiel en tus decisiones. Por cada esfuerzo logrado, por seguir adelante e intentar cada obstáculo y reto, valorar cada momento y creer en las oportunidades. Por ser tú mismo.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Ma. Consuelo

Gracias por ser la persona que eres, estar en cada momento, escucharme y apoyarme en mis decisiones, un sinfín de agradecimientos que sin ti me sería difícil estar aquí, quiero seguir compartiendo cada felicidad contigo.

A mi padre, J. Guadalupe

Siempre agradeceré tu apoyo y seguimiento en este camino, gracias por mostrarme el padre del que eres capaz y sentirte orgulloso por querer seguir adelante, te admiro mucho.

A mis hermanos, Judith, Paulina y José Guadalupe

A pesar de que este camino fue un poco a distancia de ustedes, siempre sentí el apoyo de todos, me siento orgulloso de lo que podemos hacer y lograr, forman parte de mi experiencia de vida.

A la Dra. María Jesús Puy y Alquiza

Nunca terminaré de agradecer todas las oportunidades brindadas, gracias por ser una excelente mentora y estar presente en mi trayectoria universitaria, me ha inspirado demasiado y forjado un camino lleno de experiencias y oportunidades próximas, la vida siempre devuelve los favores.

A la Dra. Pooja Vinod Kshirsagar

Gracias por la confianza, apoyo y sabiduría compartida, es una gran mentora, de verdad admiro su trayectoria.

Al Dr. Raúl Miranda Avilés

Su experiencia y sabiduría han sido fundamentales en mi trayectoria escolar, gracias por compartirla.

A Cristina Daniela Moncada Sánchez

Por el tiempo y sabiduría compartida, eres un gran elemento en la universidad.

A mis profesores

Gracias a cada maestro que se empeñó por compartir sabiduría y confianza en mis compañeros y a mí, agradecido de coincidir.

A mis amigos y compañeros

Siempre llevaré conmigo cada momento que compartimos y nos apoyamos, tanto en la escuela, salidas de campo y de manera externa, tendré por seguro que habrá apoyo mutuo. Deseo lo mejor para todos en sus proyectos de vida, sean felices.

A la Universidad de Guanajuato

Gracias por la oportunidad de ser parte de esta casa de estudios, una abeja más cumple sus sueños.

Por último, a todas las personas que llegué a omitir involuntariamente, pero que me han mostrado amistad a lo largo de este camino.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
CÁPITULO I: GENERALIDADES	
I.1 Antecedentes.....	7
I.2 Justificación.....	10
I.3 Objetivo general.....	11
I.4 Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
II.1 Conceptos generales de las diatomeas epilíticas	11
II.2 Área de estudio.....	13
II.3 Contexto tectónico.....	14
II.4 Geología estructural Regional.....	15
II.5 Geología Regional.....	16
II.6 Geología local.....	21
CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOLOGÍA	
III.1 Recopilación bibliográfica.....	26
III. 2 Toma de muestras de agua.....	26
III. 3 Características físicas del agua.....	26
III. 4 Análisis químico del agua.....	26
III. 5. Muestreo de macrófitos y plantas vasculares...	26
III. 6. Observación de Diatomeas al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), Clasificación...	27
III. 7 Análisis del índice de Shannon-Weiner.....	27
III. 8 El índice de Simpson (D).....	28
III. 9 Análisis estadístico.....	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	
IV. 1 Características fisicoquímicas del agua.....	29
IV. 2 Ensamblajes de briófitos y diatomeas.....	30
IV. 3 Índice de Shannon-Wiener (H') e índice de Simpson (D).....	33

ÍNDICE

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	35
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	36
REFERENCIAS.....	37

RESUMEN

En este trabajo de investigación se listan y describen comunidades epilíticas de diatomeas en macrófitos para evaluar las condiciones ecológicas de las aguas superficiales del río Chipoco, en el distrito minero de Molango, Hidalgo, cuya cuenca ha sido explotada con fines agrícolas y mineros, degradando los ecosistemas naturales.

Las diatomeas estudiadas se encuentran en depósitos de tufas calcáreas desarrolladas en ambientes pantanosos donde poco se ha estudiado su microbiota bentónica, a pesar de la relevancia regional de estas formaciones calcáreas dentro del distrito minero de manganeso. Para describir las diatomeas y evaluar el estado ecológico de las aguas superficiales, se dividió el río Chipoco en tres sectores (Norte, Centro y Sur) recogiendo un total de 15 muestras a lo largo de 10 km. Para la identificación taxonómica de las diatomeas se utilizaron técnicas de microscopía electrónica de barrido, consultas a especialistas y bibliografía especializada. Para evaluar las condiciones ecológicas del río Chipoco, se utilizaron enfoques multivariados como el análisis de correspondencia canónica, donde se evaluaron las relaciones entre las especies de diatomeas y las variables ambientales.

Asimismo, se determinó la diversidad de especies aplicando el índice de Shannon-Wiener y se calculó el valor de dominancia de Simpsons (D) para detectar procesos de empobrecimiento de la diversidad. Se identificaron diez géneros de diatomeas presentes en briófitos de la especie *Plagiomnium cuspidatum* que crecen en las riberas de dicho río. El análisis de correspondencia canónica indica que las características fisicoquímicas como conductividad eléctrica, pH, alcalinidad, sólidos totales disueltos, cloruro, fosfato, magnesio y calcio son los factores que explican la distribución de las diatomeas. Los índices de diversidad de Shannon-Wiener y de dominancia de Simpson muestran que existe una mayor diversidad y una marcada dominancia de diatomeas en el sector septentrional en comparación con los sectores central y meridional.

La abundancia y riqueza de diatomeas estuvo influenciada por las características fisicoquímicas e hidroquímicas del agua, permitiendo la identificación de taxones de diatomeas alcalófilas y diatomeas sensibles a la contaminación. Las actividades agropecuarias y mineras y la deficiente infraestructura sanitaria de los asentamientos humanos han ocasionado que el río Chipoco presente una calidad ecológica deficiente.

INTRODUCCIÓN

Las diatomeas son organismos unicelulares, eucariotas y fotosintéticos con algas microscópicas únicas que contienen sílice y diferentes formas geométricas. Se sabe que forman tapetes microbianos y se producen en lugares húmedos donde es posible la fotosíntesis. Estos organismos fotosintéticamente activos son responsables del 20-25% de la producción primaria terrestre total y de aproximadamente el 40% de la producción anual de biomasa marina (Field, et al., 1998), lo que los convierte en el grupo más dominante de organismos secuestradores de carbono de la atmósfera. Estos microorganismos viven generalmente en ecosistemas marinos, dulceacuícolas y terrestres, pero pocos estudios los describen en un ecosistema de tobas pantanosas (Ajuaba, et al., 2021); tobas fluviales (Beraldi-Campesi, et al., 2016); tobas fluvio-lacustres (Sanz Rubio, et al., 1996).

Las diatomeas epilíticas han sido ampliamente utilizadas como bioindicadores ecológicos para evaluar la calidad del agua, ya que responden rápidamente a los cambios ambientales, especialmente a la contaminación orgánica, y a la eutrofización, con un amplio espectro de tolerancia, desde condiciones oligotróficas hasta eutróficas (Rimet, 2012; Álvarez-Blanco, et al., 2013; Lobo, 2013; Lobo, et al., 2014, Lobo, et al., 2015; Celekli, et al., 2019, Celekli, et al., 2020).

En México, el estudio de las comunidades de diatomeas en ambientes lóticos (manantiales, ríos, arroyos) es limitado, concentrándose principalmente en el centro del país, como la cuenca del río Papaloapan (Tavera, et al., 1994), la cuenca del río Pánuco (Montejano, et al., 2000, Montejano, et al., 2004), cuenca del río Balsas (Bojorge-García et al., 2010, Bojorge-García et al., 2014), cuenca del río Antigua (Vázquez, et al., 2011), cuenca de Lerma -Chapala (Abarca-Mejía, 2010; Segura-García, et al., 2010; Segura-García, et al., 2012; Segura-García, et al., 2016; Mora, et al., 2015; Mora, et al., 2017; Mora, 2018), cabecera del río Zinapécuaro (Segura-García et al., 2016), cuenca alta del río Laja (Mora, et al., 2015), cuenca alta del río Lerma (Segura-García, et al., 2012), cuenca del río Turbio (Velázquez Bucio, 2007) y en la Cuenca de México (Ramírez-Vázquez, et al., 2001; Ramírez-Vázquez y Cantoral-Uriza, 2003; Bojorge-García y Cantoral-Uriza, 2007; Carmona-Jiménez, et al., 2016; Salinas-Camarillo, 2017), Parque Ecológico Xochimilco (Tavera, et al., 2018).

Los estudios de diatomeas en el norte de la República Mexicana son escasos, destacando las investigaciones en la Península de Baja California Sur (López-Fuente, 2009, López-Fuente, 2010). Hacia el sur de la República Mexicana destacan las investigaciones realizadas en el estado de Quintana Roo (Siqueiros-Beltrones, 2013). La mayoría de estos trabajos se han realizado con fines florísticos, y aunque algunos de ellos incluyen análisis de la estructura de las comunidades, o señalan aspectos importantes de las preferencias ecológicas de las especies, son pocos los estudios enfocados a su aplicación como bioindicadores ecológicos (Abarca -Mejía, 2010; Segura-García et al., 2010; Vázquez et al., 2011; Mora et al., 2015; Carmona-Jiménez et al., 2016; Salinas-Camarillo, 2017).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación fue contribuir al

conocimiento del estudio florístico de las diatomeas que habitan las briofitas de la especie *Plagiomnium cuspidatum* que crecen sobre los depósitos de tufas calcárea en las riberas del río Chipoco; evaluar las condiciones ecológicas de las aguas superficiales del río Chipoco que discurren a lo largo de un depósito de manganeso, aplicando análisis de correspondencia canónica donde se evaluaron las relaciones entre las especies de diatomeas y las variables ambientales. Asimismo, se determinó la diversidad de especies aplicando el índice de Shannon-Wiener y se calculó el valor de dominancia de Simpson (D) para detectar procesos de empobrecimiento de la diversidad.

CÁPITULO I: GENERALIDADES

I.1 Antecedentes

De acuerdo con la carta geológica-minera de Molango F14-D51, el distrito minero denominado Molango se divide en dos zonas mineralizadas: Chipoco y Naopa. Dicho yacimiento es clasificado como un yacimiento sedimentario exhalativo (SEDEX), con mineralogía consistente de calcita, kurtnahorita, rodocrosita, en ganga de cuarzo, piritita, magnetita y ocasionalmente serpentina, alojados dentro de la Formación Chipoco.

El inicio de la exploración por manganeso en las zonas cercanas a Molango comenzó por la Compañía Minera Autlán, quien dirige la explotación de mineral de manganeso en 1953 en Autlán en el estado de Jalisco, México, de donde toma el nombre la compañía. En 1960, inicio exploraciones por carbonatos de manganeso en el distrito manganesífero de Molango, localizado en la Sierra Madre Oriental, en el estado de Hidalgo. Para 1968 es instalado el horno de nodulización, iniciándose así la producción de nódulos de manganeso.

Carrillo Bravo (1965), definió la Formación Tamán como lutitas arenosas y areniscas arcillosas de color gris oscuro, gris verdoso y negro, con amonitas y pelecípodos, en capas que alternan con estratos delgados de pedernal negro; intercalados con esos sedimentos se observan cuerpos, en ocasiones hasta de 2 m de potencia de calizas arcillosas de color negro y gris oscuro.

Cantú (1971), describió la Formación Tamán como perteneciente al *Kimmeridgiano inferior-Titoniano* Inferior, en toda la región de la Huasteca una litofacies y una biofacies uniformes, donde se observa como micrita de color negra, en capas gruesas de 50 a 80 m. de espesor y alterna regularmente con capas de lutitas gris-negro, en capas de 10 a 20 m. Su contacto es concordante y transicional, con la Formación Santiago, el cual se observa en su sección tipo de Tamán, San Luis Potosí.

Aguilera (1972), estableció para la Formación Chipoco, facies clástico-calcáreo-arcillosa. Esta facies de litología mixta está distribuida en un cinturón que circunda al facie clástico calcárea esquelética hacia mar abierto. Los tipos litológicos más importantes son: "mudstones" arcillosos, piritizados, con intercalaciones y en ocasiones cuerpos definidos de "grainstones" con sedimentación gradual; interestratificación de lutita negra, calcárea,

laminar; son notables algunos "wackstones" y "Packstones" arcillosos.

Aguayo-Camargo (1977), describió a la Formación Chipoco, como aquella secuencia estratigráfica compuesta por biomicrudita y biomicrita, cuyos constituyentes son equinodermos y conchas de moluscos fragmentados, retrabajados y aglutinados en una matriz con ooides e intraclastos, en capas de 50 cm a 1 m de espesor. La caliza muestra un alto grado de estilolización, de acuerdo a los planos de estratificación. La parte superior de la Formación Chipoco está constituida por caliza de 10 a 15 cm de espesor, de composición bioespatítica y pelespatítica pobremente lavadas e intercaladas entre biomicrita de radiolarios y lutitas de color negro, finalmente laminada, marcado la zona de transición con la Formación Pimienta que la suprayace.

Pedrazini y Basáñez-Loyola (1978), describen a la unidad llamada Formación Chipoco de la siguiente manera: se ha observado en el área con tres aspectos distintos 1); transición gradual de areniscas y calcarenitas basales a facies pelágicas en la parte superior (sección Chipoco); 2). Variación abrupta entre facies someras evaporíticas y facies francamente pelágicas que las recubren (pozo Oleotuju No. 1); posiblemente se trata de turbiditas.

Alexandri (1988), clasificada como tamán mixto, en su base se localiza el depósito de manganeso, hacia la base de la formación se presenta un horizonte de aproximadamente 40 cm de espesor de caliza manganesífera de color gris oscuro, con estructura brechoide derivada del intenso plegamiento a que fue sujeto todo el paquete de sedimentos. Su contenido de Mn es relativamente bajo, en comparación con los estratos que la subyacen. Sobre este horizonte se localizan de 4 a 9 metros de caliza manganesífera de color gris oscuro, con estratificación delgada, estructura bandeada y grano fino. Existen bandas laminares de pirita interestratifica. El carbonato de manganeso predominante es la rodocrosita. Al finalizar este paquete de rocas, la ley de manganeso decae abruptamente hasta desaparecer aproximadamente a 50 metros sobre el contacto Santiago-Chipoco, aumenta el contenido CaO y los estratos se van engrosando hasta alcanzar espesores entre 40cm y 1m. Asimismo, la granulometría se va haciendo más gruesa, hasta formar una calcarenita, pudiendo presentar textura oolítica. A los 18 m por encima del contacto con la formación Santiago se presenta un horizonte constituido por espículas de esponja, de composición silíceas y aunque su espesor puede variar de 50 cm a 2 m, este es muy persistente y se encuentra ampliamente distribuido en el distrito manganesífero. El contenido de pirita también disminuye sustancialmente hacia la parte superior de la formación. De los 60 a los 225 metros se presenta una alternancia de calizas cristalinas (grainstones), sin contenido de manganeso, y limolitas calcáreas de color gris verdoso. Los microfósiles están restringidos a ciertos horizontes de caliza, donde pueden llegar a ciertos horizontes de caliza, donde pueden llegar a ser muy abundantes, como el caso de las concentraciones de Aulacomyella, hacia la cima de la formación Chipoco.

Okita (1992), menciona que el manganeso mineralizado ocurre en la base de la Formación Santiago conocida como facies Chipoco. Litológicamente alternancia limolita y lutita en la localidad tipo, hasta una mezcla de caliza de grano fino y lutita que contiene ooides, arenisca y cuarzo arcosa en el este de las minas.

Ochoa Camarillo (1998), distingue cuatro unidades litológicas con base en núcleo de sondeo y en una estratigrafía detallada de la Formación Chipoco: Miembro 1 constituido por caliza manganesífera con intercalaciones de lutitas calcárea; Miembro 2; caracterizado por arenisca calcárea con intercalaciones de lutitas calcárea arenosa; Miembro 3- presenta limolita y lutitas calcárea con intercalaciones de caliza arcillosa; Miembro 4; está constituido por una secuencia de caliza interestratificada en forma rítmica con lutita negra.

Eguiluz (2000), describe las secuencias del Triásico Liásico están plegadas y limitadas por discordancias angulares con las rocas a las que sobreyacen y con los sedimentos a los que subyacen, por lo que se infiere la existencia de un evento tectónico que pudo ocurrir posterior al Liásico o Jurásico Medio. La importancia de conocer la existencia, litología y espesor de estas rocas facilita el entendimiento para conocer que durante la deformación Laramide, actuaron como niveles de despegue potenciales. En las regiones antes descritas, al poniente, durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior, otro cinturón turbidítico se depositó y quedó sobrepuesto al cinturón turbidítico anterior Triásico-Liásico, que continuó representando a la zona interna de la cuenca; mientras que, al oriente, sobre la secuencia triásico-liásico se sobrepuso una sedimentación de lechos rojos, evaporitas, carbonatos y terrígenos monoclinales. Con la integración de información estratigráfica regional, se pueden reconstruir una serie de dominios sedimentarios que evolucionaron en cuencas y plataformas.

Esquivel-Macías et al. (2005), Se considera que este afloramiento pertenece a la Fm. Despí, como parte media superior del grupo Huayacocotla. El afloramiento tiene espesor de 26.6 m y extensión lateral de 30 m. Los estratos están inclinados 25 grados y la deformación es por compresión horizontal del anticlinal en el que yacen. En este afloramiento, se observa una secuencia finamente laminada, resultado de una alternancia cíclica, regular y milimétrica de las litologías que se observan en todo el espesor del paquete estudiado. El sedimento limo/arenoso fino se formó en condiciones de cuenca, influenciado cíclicamente por deposición de arena fina típica de la plataforma, esta última es cuarcita angulosa a sub redondeada, que implica transporte moderado a partir de un protolito ígneo. El tamaño de los granos y su contenido de moluscos fragmentados sugiere una plataforma arenosa en nivel submareal. Esta arena fue depositada cíclicamente, como indica su intercalación regular en el sedimento fino.

Esquivel-Macías (2017), En muchos afloramientos, hay un patrón compartido de concentración de especies del Sinemuriano superior, pero también es común encontrar algunas especies cuyo rango se informa que también está en el Sinemuriano inferior. Además, hay muchos registros taxonómicos que involucran datos contradictorios respecto al Sinemuriano inferior y prácticamente ninguno indicando directamente la zona obtusa.

Servicio Geológico Mexicano (2009), menciona la formación Chipoco como un conjunto de rocas sedimentarias dispuestas en una alternancia de calizas de textura grainstone y lutitas calcáreas gris oscuro. El manto se presenta como una caliza laminar color pardo oscuro a negro. Se han diferenciado cuatro unidades de esta formación, a saber, de su base hacia arriba: 1. Horizonte manganesífero que está constituida por calizas arcillosas

negras en estratos de 10 a 20cm, con intercalaciones de lutitas calcáreas, y cuya característica principal es la presencia carbonato de manganeso, principalmente rodocrosita, que constituye la roca. 2 unidad arenosa, está constituido por areniscas calcáreas gris obscuro en estratos de 0,2 a 0,6 m de espesor intercalados con lutitas calcáreas. El espesor de esta unidad es de 20 a 30m. 3 unidad limolítica se caracteriza por el predominio de limolitas y lutitas calcáreas gris obscuro con intercalaciones de calizas arcillosas negras. El espesor varía de 20 a 40 m. 4 unidad rítmica de calizas negras recristalizadas en estratos de 0,1 a 0,4 m, interestratificada con lutitas negras delgadas. Esta unidad es la superior y manifiesta el cambio transicional hacia la formación pimienta.

Padilla (2007), La evolución tectónica y sedimentaria del Golfo de México se caracterizó por una subsidencia lenta que comenzó desde el Jurásico Medio y continúa hasta hoy. Durante el Jurásico y el Cretácico se depositaron varios kilómetros de espesor de sedimentos carbonatados en las extensas plataformas someras que bordeaban la cuenca. A inicios del Paleógeno, la Orogenia Laramide deformó las rocas de la parte occidental del Golfo, formando los pliegues y fallas de las Sierras Madre Oriental y la de Zongolica, mientras que en el sureste mexicano continuaba la sedimentación de carbonatos sobre la parte norte del macizo de Chiapas y sobre el Bloque Yucatán.

Finalmente, además del interés geológico, el sureste mexicano tiene una importancia económica muy grande para el país, porque en las estructuras de la cadena plegada y cabalgada de Chiapas-Reforma-Akal y en las Cuencas del Sureste se ubican el 89% de las reservas probadas de petróleo crudo equivalente y el 92% de la producción total de petróleo crudo equivalente del país (PEMEX, 2005). Las rocas del Tithoniano fueron las generadoras de hidrocarburos, mismos que se almacenaron en trampas estratigráficas y estructurales del Jurásico (Kimmeridgiano), Cretácico Superior-Paleoceno y del Neógeno.

I.2 Justificación

En el distrito manganesífero de Molango, Hidalgo, afloran depósitos de tufas calcáreas cuyo origen está vinculado con las formaciones geológicas calcáreas (Formación Chipoco) que afloran en el área de estudio. En Molango estos depósitos de tufas calcáreas son considerados las únicas evidencias morfológicas que se encuentran interactuando con la morfología kárstica, vinculando el origen de estas tufas carbonatadas con los procesos de disolución desarrollada en las morfologías exokársticas. Así mismo, estas acumulaciones de tufas calcáreas están asociadas con otras formaciones geomorfológicas, como lo es la caliza manganesífera estratificada. La Formación Chipoco en el distrito de Molango revela la existencia de elementos geomorfológicos y paleo-ambientales que han pasado desapercibidos en las descripciones y estudios hasta la fecha. Siendo que los afloramientos de estos depósitos de tufas juegan un papel importante en factores geo-ambientales, donde interactúa con las condiciones morfoestructurales del área y las condiciones hidrológicas. Dentro de los depósitos de tufas calcáreas se almacenan evidencias botánicas como son diatomeas,

vegetación y restos malacológicos que permiten conocer la evolución de la geografía regional proporcionando su evolución kárstica, su comportamiento tectónico y los procesos de gradación o incisión de sus fluidos de agua.

I.3 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de investigación es bioevaluar la calidad de las aguas superficiales del río Chipoco utilizando indicadores de diatomeas epilíticas en macrófitos del Distrito Minero de Molango, Hidalgo, México.

I.4 Objetivos específicos

- 1) Caracterizar el contexto geológico, geomorfológico y estructural sobre el cual se desarrollaron los depósitos de tufas calcáreas en el municipio de Molango, Hidalgo.
- 2) Caracterizar la calidad de las aguas superficies del río Chipoco con base en las especies de diatomeas epilíticas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

II.1 Conceptos generales de las diatomeas epilíticas

Las diatomeas epilíticas son un grupo especializado de microalgas pertenecientes a la clase *Bacillariophyceae*, que se caracterizan por vivir adheridas a superficies sólidas en ambientes acuáticos. Estas superficies pueden incluir rocas, sedimentos consolidados, estructuras artificiales y otros materiales sólidos presentes en el entorno. Las diatomeas son organismos unicelulares eucarióticos que poseen una pared celular llamada frústulo, compuesta principalmente de sílice opalina. Este frústulo presenta una gran diversidad de formas y patrones, que son característicos de cada especie y sirven como herramientas útiles para su identificación taxonómica.

El término "epilítico" se refiere específicamente a organismos que habitan sobre superficies rígidas, en contraste con otros tipos de diatomeas que pueden ser planctónicas (suspendidas en la columna de agua), epífíticas (adheridas a plantas acuáticas) o bentónicas (viviendo en los sedimentos). Las diatomeas epilíticas juegan un papel ecológico crucial, ya que conforman una parte fundamental de los biofilms o comunidades microbianas que se desarrollan sobre las superficies sumergidas en sistemas acuáticos.

Importancia de las Diatomeas Epilíticas

Importancia Ecológica:

1. **Productividad Primaria:** Las diatomeas epilíticas son importantes productores primarios en los ecosistemas acuáticos, ya que realizan fotosíntesis y convierten la energía solar en materia orgánica. Esto las convierte en la base de la cadena trófica en muchos ambientes lóticos y lénticos.
2. **Ciclo de Nutrientes:** Estas microalgas desempeñan un papel fundamental en el reciclaje de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, contribuyendo al equilibrio biogeoquímico de los ecosistemas acuáticos.
3. **Indicadores Ambientales:** Debido a su sensibilidad a las condiciones fisicoquímicas del agua, las diatomeas epilíticas son excelentes bioindicadores de la calidad del agua. Los cambios en su composición comunitaria pueden reflejar variaciones en factores como la concentración de nutrientes, el pH, la temperatura y la presencia de contaminantes.
4. **Estructura del Hábitat:** Contribuyen a la formación y mantenimiento de biofilms, que sirven como microhábitats para otros organismos, incluyendo protozoos, invertebrados y bacterias.

Importancia Científica:

1. **Estudios Paleoecológicos:** Los frústulos de las diatomeas son altamente resistentes y se preservan en los sedimentos a lo largo del tiempo. Esto permite su uso en estudios paleoecológicos y paleoclimatológicos para reconstruir las condiciones ambientales del pasado.
2. **Taxonomía y Evolución:** La diversidad morfológica de los frústulos proporciona información valiosa para estudios evolutivos y filogenéticos.
3. **Monitoreo Ambiental:** Debido a su alta sensibilidad a los cambios ambientales, las diatomeas epilíticas se utilizan ampliamente en programas de monitoreo de la calidad del agua y evaluaciones ecológicas.

Importancia Económica y Tecnológica:

1. **Biotecnología:** Los frústulos de las diatomeas tienen aplicaciones en nanotecnología debido a sus estructuras microscópicas únicas. Por ejemplo, se investigan para su uso en sistemas de filtración, sensores biológicos y dispositivos ópticos.
2. **Industria Alimentaria y Farmacéutica:** Las diatomeas se emplean como fuente de ácidos grasos esenciales, como el omega-3, y otros compuestos bioactivos de interés nutricional y farmacéutico.

3. **Control de la Contaminación:** Algunas especies de diatomeas pueden ser utilizadas en procesos de biorremediación, debido a su capacidad para absorber metales pesados y otros contaminantes del agua.

Aplicaciones de las Diatomeas Epilíticas

1. **Monitoreo de Calidad del Agua:** Las diatomeas epilíticas son ampliamente utilizadas en la evaluación de la calidad del agua en ríos, lagos y otros cuerpos acuáticos. Los índices biológicos basados en la composición de las comunidades de diatomeas permiten detectar la presencia de eutrofización, contaminación por metales pesados y otros impactos antropogénicos.
2. **Estudios Paleolimnológicos:** Gracias a la preservación de los frústulos en los sedimentos, las diatomeas epilíticas son herramientas valiosas para la reconstrucción de condiciones paleoambientales. Esto incluye estudios sobre cambios en la calidad del agua, el clima y los regímenes hidrológicos a lo largo del tiempo.
3. **Aplicaciones en Nanotecnología:** La microestructura de los frústulos de las diatomeas está inspirando diseños en nanotecnología y ciencia de materiales. Por ejemplo, se está investigando su uso como plantillas naturales para la fabricación de materiales con propiedades ópticas, catalíticas y de almacenamiento de energía.
4. **Agricultura y Acuicultura:** En la agricultura, las diatomeas se han empleado como biofertilizantes y enmiendas del suelo debido a su contenido de sílice. En la acuicultura, se utilizan como alimento para organismos acuáticos, gracias a su alto valor nutricional.

II.2 Área de estudio

El área de estudio se localiza dentro del Distrito Manganesífero de Molango en el sector centro-norte del estado de Hidalgo y pertenece al municipio de Tlanchinol. El municipio de Tlanchinol se localiza en la Sierra Madre Oriental en la subprovincia fisiográfica del Karst Huasteco, que consiste en una zona de sierras plegadas constituidas por calizas con desarrollo de cañones y presencia de sumideros, pozos y cuevas. Tiene un rango de altitud de 60 msnm a 2445 msnm, ubicado hidrológicamente en la cuenca del Pánuco. El clima que predomina en la mayor parte del área de estudio es frío de montaña. La temperatura media en verano es de 29°C y una mínima de 5.5°C, siendo la precipitación media anual de 550 mm (INEGI, 1998). Río del cual se derivan las subcuencas del Río San Pedro, Río Los Hules y Río Amajac, en esta última existen veintiocho localidades, destacando la localidad de Chipoco por ser una de las más pobladas y por donde cruza el Río Chipoco.

La Cuenca ha sido explotada con fines agrícolas y mineros, degradando los ecosistemas naturales. El río Chipoco es un sistema deteriorado ya que atraviesa varias comunidades y a su vez es influenciado por los desechos de la empresa Minera. Se estudiaron tres

tramos del río Chipoco, el sector Norte ubicado a 1069 m de altitud, en las coordenadas (21°00'37" N - 98°73'84" O), obteniéndose las muestras (3a, 3b, 3c, 3d, 3e), el sector Central ubicado a 1000m de altitud, en las coordenadas (20°98'10" N - 98°72'29" O), obteniéndose las muestras (2a, 2b, 2c, 2d, 2e), y el sector Sur situado a 1100 m de elevación, en las coordenadas (20° 98'57" N-98°72'12" W), obteniéndose las muestras (1a, 1b, 1c, 1d, 1e) (Figura 1).

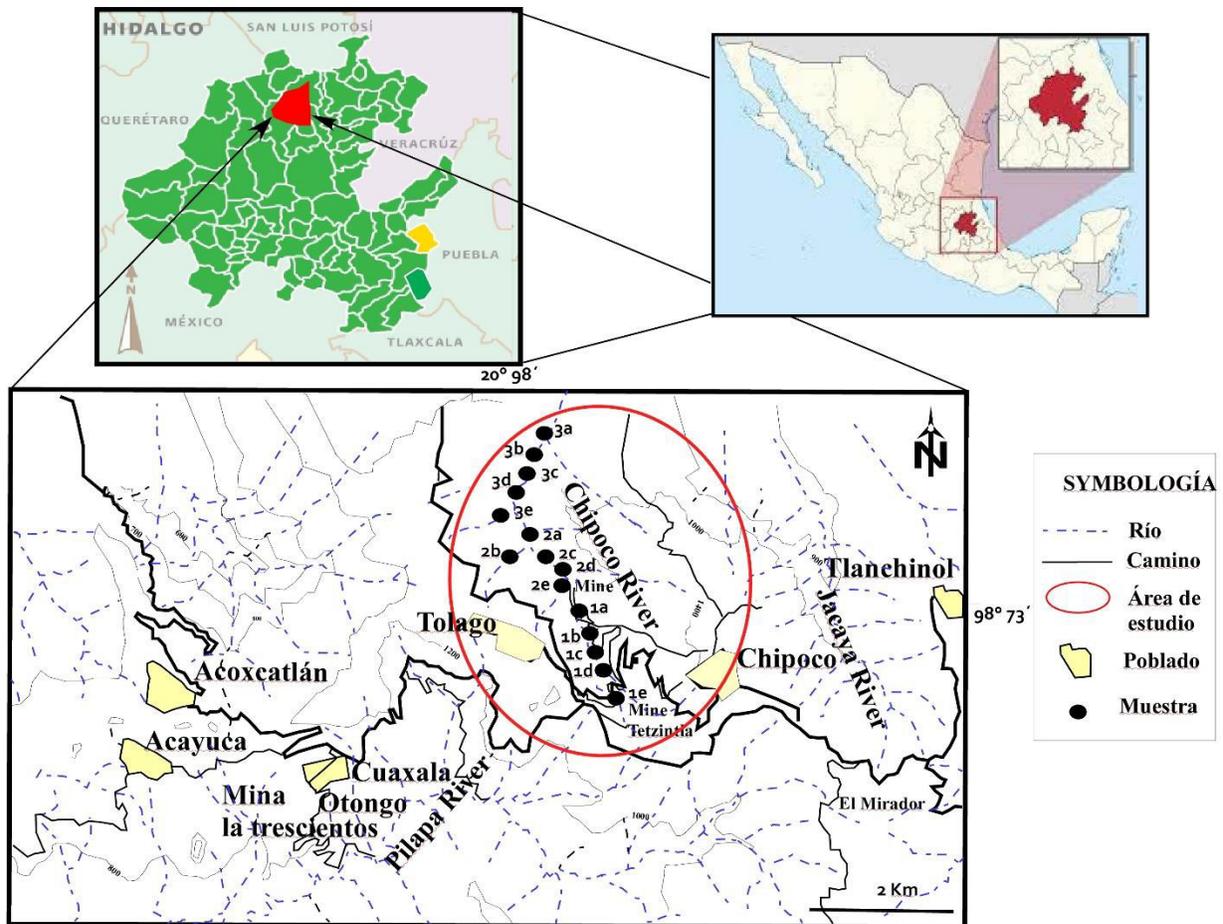


Figura 1. Localización del área de estudio del río Chipoco, Hidalgo.

II.3. Contexto Tectónico

La historia tectónica de la región es compleja, ya que inicia en el Proterozoico medio con el desarrollo de un arco magmático, el cual fue posteriormente metamorfoseado durante la Orogenia Grenville, originando el complejo metamórfico denominado Gneis Huiznopala. En el Triásico-Jurásico inferior, se desarrolla una fase principal de rift, que origina un levantamiento general y fracturamiento de la corteza, lo que permite la generación de fosas y pilares, que al ser invadidas por el mar constituyen cuencas, donde se depositó la Formación Huayacocotla. A finales del Jurásico inferior, se generan movimientos distensivos provocando la retirada de los mares y bajo estas condiciones,

durante el jurásico medio se depositan los lechos rojos de la formación Cahuastas. A fines del Jurásico medio y hasta fines del Cretácico, el continente empieza a ser invadido por los mares, como consecuencia de la apertura del Golfo de México. Durante el Calloviano y hasta finales del Thitoniano, el fondo irregular de las cuencas fue nivelándose y se depositan las formaciones Tepexic, Santiago, Chipoco y Pimienta. En el Cretácico inferior, una lenta subsidencia aumento la profundidad del piso oceánico y regulo la precipitación de los carbonatos de la formación Tamaulipas inferior; en el Albiniano-Cenomaniano, se tuvo el máximo desarrollo de plataformas (Formación El Abra) y el aporte de sedimentos calcáreos-arcillosos (Formación Tamaulipas superior); a fines del Turoniano se deposita la Formación Agua Nueva. Entre el Cretácico inferior y el Eoceno superior, como consecuencia de la Orogenia Laramide, todo el paquete rocoso es levantado y plegado, formando un sistema de pliegues y cabalgaduras que constituyen el Anticlinorio de Huayacocotla. Durante el Eoceno tuvieron lugar las intrusiones de tipo granodiorítico, diorítico y monzonítico con formación de diques que están afectando a las rocas preexistentes, provocando metamorfismo de contacto y mineralización.

En el Mioceno superior y el Plioceno inferior, comienza una intensa actividad volcánica correspondiente al eje neovolcánico correspondiente al Eje Neovolcánico, con emisión de rocas predominantemente de composición básica, que en algunos lugares obstruye el drenaje, formando cuencas endorreicas. En el Pleistoceno se originaron una serie de fallas que dieron origen al desarrollo del graben de Molango.

II.4. Geología estructural Regional

El distrito manganesífero de Molango se encuentra ubicado sobre la porción noroccidental del levantamiento denominado Anticlinorio de Huayacocotla, que es una de las grandes estructuras que forman la Sierra Madre Oriental. Esta estructura tiene aproximadamente 400 km de longitud, estableciéndose sus límites desde el sur de Cd. Victoria, Tamaulipas., hasta el SE de Huachinango, Pue., y se encuentra orientada con rumbo NW 45°; su eje pasa al E de la población de Molango, Hidalgo y al Este de Huayacocotla, Veracruz. El plegamiento se considera principalmente como consecuencia de esfuerzos complexionales de origen tectónico, resultado de los disturbios ocurridos durante la Orogenia Laramide. La cuenca manganesífera se encuentra sobre un gran levantamiento del basamento que ha sido denominado Anticlinorio de Huayacocotla (Erben 1956). Para esta área se consideran tres eventos tectónicos. Una fase de extensión que se inició en el Jurásico Temprano y terminó a finales del Jurásico Medio. Este evento propició la formación de pilares y fosas tectónicas, que están delimitados por fallas normales de orientación NNW-SSE y N-S. Todas las fallas del Jurásico Temprano observadas se encuentran delimitando afloramientos del zócalo cristalino. Durante el Jurásico Medio continuó la deformación distensiva, que propició en parte la formación de fosas nuevas y pilares tectónicos. El paquete sedimentario de rocas jurásicas y cretácicas fue plegado entre el Cretácico Superior y el Eoceno tardío (Orogenia Laramídica) formando un complejo de pliegues y cabalgaduras llamado anticlinorio de Huayacocotla, muy complejo, causada por la disposición estructural preexistente del basamento Precámbrico. Otro fenómeno

laramídico es la reactivación de las fallas normales Jurásicas como fallas inversas, que delimitan al horst jurásico de Huiznopala. La mina de manganeso de Molango está ubicada en la zona de mayor complejidad estructural. El último elemento tectónico es por extensión pos-pliocénica, evidenciada por fallas normales de rumbo NW-SE, que están delimitando al graben de Molango. El graben presenta una longitud de más de 10 km y un salto de más de 200 m (Ochoa-Camarillo, 1998).

El frente tectónico de la sierra Madre Oriental, es un cinturón de pliegues y cabalgaduras que se detecta desde las inmediaciones del Parral, Chih., y se extiende hacia Teziutlán, Pue., pasando por las referencias de Torreón, Saltillo, Monterrey, Cd. Victoria y Tamazunchael; está cubierto al sur por la Faja volcánica Transmexicana y puede continuar al SE entre Córdoba y Tuxtepec, donde pierde una deformación característica y predomina una deformación más compleja, modificada por diferentes edades de deformaciones. Eguiluz (2000).

La evolución geológica del sureste mexicano es analizada en el contexto regional del Golfo de México que inicia su apertura con la fragmentación y dispersión de la Pangea. La sedimentación en esta depresión empieza con el depósito de lechos rojos continentales durante el Triásico Tardío y el Jurásico Temprano, después de lo cual, durante el Calloviano, se produce una invasión por aguas marinas provenientes del Pacífico que cubren una extensa zona con poca circulación, poco tirante de agua y alta evaporación, condiciones que favorecen el depósito de grandes volúmenes de sal en la zona central de la cuenca. Desde el Jurásico Tardío hasta el Cretácico Tardío la sedimentación estuvo dominada por carbonatos, cambiando a clásticos a principios del Paleógeno a causa de la Orogenia Laramide, evento tectónico que formó la Sierra Madre Oriental.

La evolución tectónica y sedimentaria del Golfo de México se caracterizó por una subsidencia lenta que comenzó desde el Jurásico Medio y continúa hasta hoy. Durante el Jurásico y el Cretácico se depositaron varios kilómetros de espesor de sedimentos carbonatados en las extensas plataformas someras que bordeaban la cuenca. A inicios del Paleógeno, la Orogenia Laramide deformó las rocas de la parte occidental del Golfo, formando los pliegues y fallas de las Sierras Madre Oriental y la de Zongolica, mientras que en el sureste mexicano continuaba la sedimentación de carbonatos sobre la parte norte del macizo de Chiapas y sobre el Bloque Yucatán. Padilla (2007).

II.5. Geología Regional

El área de estudio corresponde a la provincia Sierra Madre Oriental, donde las rocas que afloran son principalmente sedimentarias continentales y marinas, siendo las calizas la roca de mayor distribución y constituyendo la mayor parte de la Sierra Madre Oriental. Afloramiento de rocas del Jurásico Inferior, Medio y Superior en el área de Molango. La columna estratigráfica regional está representada por el basamento precámbrico, paleozoico y Mesozoico que a su vez fueron cubiertos por productos volcánicos de rocas basálticas-andesitas del terciario y material aluvial reciente. A continuación, se realiza una descripción de las formaciones más antiguas a la más reciente:

Precámbrico

- *Gneis Huiznopala (Meso-Neoproterozoico)*

Definido por Frías (1966) como Gneis Huiznopala expuesto en el núcleo del Anticlinorio de Huayacocotla. Se describe como gneises bandeados de facies granulita mientras que Ochoa-Camarillo (1996) lo define una exposición como un ortogneis (granítico y gabroico) y un paragneis (calcáreo, pelítico y psamítico). Lawlor et al (1999) consigna la presencia de metanortositas y gneises gabroicos al NW de la comunidad Chipoco. El Gneis Huiznopala se correlaciona con el Gneis Novillo, de la región de Ciudad Victoria, Tamaulipas y ambos se consideran parte del basamento del bloque Oaxaquia. El protolito se considera formado a partir de un arco magmático de edad 1200-1150 Ma., mientras que la deformación dúctil que le da la facies granulita se presenta 1000-950 Ma.

Pérmico

- *Formación Tuzancoa (Wolfcampaniano-Leonardiano)*

Rosales-Lagarde (2005), la define cercana a la comunidad de Tuzancoa en el Noreste de Hidalgo como interstratificación submarinas de flujos de lava andesítico-basáltico con turbiditas siliciclásticas, turbiditas volcanoclásticas, flujos y escombros calcáreos y lentes conglomeráticos. Esta unidad contiene abundantes fósiles del Pérmico, dándole una edad Wolfcampaniano-Leonardiano y un ambiente relacionando con subducción. Son afloramientos que habían sido comúnmente asignados a la Formación Guacamaya, anteriormente considerada como un ensamble de flysch orogénico asociado a la colisión de Norte y Suramérica durante la formación de Pangea. El contacto y único afloramiento observado en campo es el que se encuentra en la vía hacia Totonicapa, suprayaciendo a la exposición granítica del Gneiss Huiznopala siendo la menor discontinuidad registrada entre las rocas grenvillianas y las unidades que se encuentran en contacto con éstas.

Triásico superior

- *Formación Huizachal (Nórico-Hettangiano)*

EL nombre de Formación Huizachal se ha aplicado a una secuencia, en ocasiones de más de 2000 m de espesor, de lutitas, lutitas arenosas, areniscas y conglomerados de color rojo, verde y gris verdoso (predominando el color rojo) con flora del Triásico Superior, que cubren en discordancia angular en el Anticlinorio de Huizachal Peregrina a sedimentos paleozoicos o a rocas de probable edad precámbrica. Esta formación fue descrita originalmente por Imlay (1948), tomada como localidad tipo una sección situada al SO del valle de Huizachal, aproximadamente a 20 km al S-SO de ciudad Victoria, Tamaulipas. La columna tipo se encuentra en los alrededores del rancho Huizachal en el estado de Tamaulipas, donde más de 1500 m de espesor de una secuencia de areniscas, lodolitas, lutitas, y conglomerados de color rojizo y verde se encuentran aflorando. (Peralta, 1985). Se le ha asignado una edad del Triásico Superior debido a la fauna de pelecípodos y plantas fósiles que se han encontrado (Silva, 1981). En el área del distrito manganesífero de Molango, no aflora la Formación Huizachal.

Jurásico inferior

- *Formación Huayacocotla (Sinemuriano-Pliensbaquiano)*

Imlay (1948), establece su localidad tipo a lo largo del Río Vinasco, al sur de Huayacocotla, Veracruz. De igual forma, propone que la Formación Huayacocotla está constituida por lutita oscura con intercalaciones de arenisca, conglomerado y escasos lentes de caliza con un contenido fósil de plantas hacia la cima. Ochoa Camarillo et al. (1996) distinguen tres miembros dentro de esta Formación: (1) formado por conglomerado, arenisca, limolita, lutita con exo-clastos que contienen fósiles retrabajados de fusulínidos y crinoides, (2) constituido por conglomerado, arenisca, limonita y lutita, con amonites, y la parte superior (3) está conformado por arenisca, limolita, lutita y conglomerado y se caracteriza por la presencia de plantas continentales. Esta Formación es importante, desde el punto de vista tectónico porque se considera una formación pre-rift o sin-rift. La Formación Huayacocotla se encuentra siempre discordante, está suprayaciendo al Gneis Huiznopala en la mayoría de sus afloramientos, a excepción de los de San Cristóbal y Tuzancoa; se presenta su miembro basal en las exposiciones del paragneis y del gneis gabro-anortosítico mientras que, relacionado al cuerpo charnokítico se presenta el miembro superior con fósiles de plantas continentales. Suprayaciendo a esta unidad generalmente se presentan la unidad calcárea del Jurásico medio, en contacto discordante con la Formación Tamaulipas indiferenciada, por medio de la falla Tlatzintla; también infrayace a los basaltos de la Formación Tlanchinol sobre gran parte de la Carretera Federal 105 desde Ixtlahuaco hasta Tlanchinol.

Jurásico medio

- *Formación Cahuwasas (Bajociano-Calloviano)*

Esta Formación descrita por Carrillo Bravo (1965) en la ranchería Cahuwasas al NW del estado de Hidalgo. Constituida por una secuencia de arenisca, conglomerado y limonita de color rojo que aflora en gran porción central de la Sierra Madre Oriental y al Sur de la región petrolera de Pánuco – Ébano: La constituye una potente secuencia de capas rojas hasta de 2000 metros de espesor y se infiere una edad Jurásico medio, Caloviano. En el Distrito manganesífero de Molango, la tasa de sedimentación de esta formación es muy rápida en periodos geológicos relativamente cortos (25 millones de años), también, permitió establecer los criterios para un ambiente tectónico de rift. La Formación Cahuwasas sobreyace discordantemente a la Formación Huayacocotla y su contacto superior es concordante con la Formación Tepexic, marcando el inicio de las rocas carbonatadas. Se le asigna una edad Jurásico Medio basándose en su posición estratigráfica. Los afloramientos característicos de la localidad se presentan en cabalgadura en los flancos Norte y Sur del cuerpo gabro-anortosítico.

Jurásico superior

- *Formación Tepexic (Bathoniano – Oxfordiano)*

Descrita por Erben (1956), cercana a la planta hidroeléctrica de Tepéxic, perteneciente a la presa de Necaxa en el norte del Estado de Puebla, como una secuencia de caliza

de color gris a gris oscuro, caliza del mismo color de grano grueso y con bastantes granos de cuarzo, así como de calcarenita de color gris hasta gris oscuro. Esta Formación se considera por Rosales Lagarde (2002) de edad Caloviana, consta principalmente de caliza arenosa, marga y limolita, caracterizándose por su abundancia de fósiles, principalmente del género *Gryphaea*. Su base está representada por un conglomerado de cuarzo con matriz calcárea. Sus características litológicas indican un ambiente de depósito continental con una fuente de suministro constituida principalmente de rocas ígneas, con períodos de actividad volcánica, erosión y transporte contemporáneos, como un reflejo de la inestabilidad tectónica. La Formación Tepéxic sobreyace concordantemente a la Formación Cahuwasas y, de igual forma, a la Formación Huayacocotla, mientras que el contacto superior es concordante con las Formaciones Santiago, Tamán y Chipoco del Jurásico Superior

- *Formación Santiago (Caloviano-Oxfordiano)*

Propuesta originalmente como "Lutita Santiago" por Reyes (1964) con localidad tipo en el Arroyo Santiago que desemboca en el Río Moctezuma, dentro el poblado Tamán, San Luís Potosí; el mismo la consideró como miembro arcilloso de la Formación Tamán. Fue definida formalmente por Cantú-Chapa (1971) quien demostró con base en amonitas, su edad y sentó las bases para establecer el mecanismo de las transgresiones neojurásicas y la formación del golfo de México. Esta formación está constituida de: lutita de color gris oscuro con intercalaciones de caliza arcillosa en capas hasta de 40 cm de espesor, que se intemperizan a café pardo o rojizo, presentan clivaje diagonal a los planos de estratificación. En el área de Chipoco, la Formación Santiago comprende micritas limo-arcillosas hasta peletoides, con materia carbonosa y pirita; con poco contenido faunal, comprende foraminíferos, bentónicos equinodermos, microbraquiópodos, algas laminares y ostrácodos; también se tienen lutitas calcáreas con abundante limo, fragmentos de gran tamaño. La Formación Santiago sobreyace concordantemente a la Formación Tepéxic, y subyace transicional y concordantemente a la Formación Chipoco en las secciones de superficie Chipoco-Otongo, en el área situada entre los afloramientos de Gneis gabroico y charnokítico.

- *Formación Chipoco (Oxfordiano-Tithoniano)*

Definida por Hermoso y Martínez al oeste del rancho Chipoco (1972), Hidalgo, en la inmediación del Tajo Tetzintla de la Compañía Minera Autlán como una mezcla de diversas litologías. Está constituida por grainstones y mudstones de color gris oscuro que alternan con lutita calcárea. En algunas capas clásticas se observa sedimentación graduada y estratificación lenticular; la Formación Chipoco constituye un conjunto de rocas sedimentarias, dispuestas en una alternancia de caliza cristalina (grainstone), y lutita calcárea de color gris oscuro que en el subsuelo han sido denominadas Tamán Mixto, y las cuales representan la zona de transición entre depósitos de cuenca y de plataforma, los que rodean a los altos paleogeográficos del Jurásico Superior. Esta formación es conocida porque contiene el miembro manganesífero que es explotado por la compañía minera Autlán y sus afloramientos pueden ser observados en algunos tramos sobre la desviación de Tlanchinol, Chinconcoac, hasta Tetlapaya, donde se encuentra en contacto discordante con la Formación Cahuwasas por medio de una

cabalgadura. Este horizonte de Mn forma parte de la Formación Chipoco y se encuentra subyaciendo de manera concordante por la Formación Santiago. Según Ochoa Camarillo (1996), dividió la Formación Chipoco en cuatro unidades de acuerdo con su litología y estratigrafía detalla en la cual tiene como base el manganeso: unidad 1. Caliza manganesífera intercalada con lutita calcárea, unidad 2. Compuesta por arenisca calcárea con intercalaciones de lutita calcárea arenosa, Unidad 3. La unidad tres está compuesta de limolita y lutita calcárea y caliza arcillosa intercaladas, Unidad 4. Por último, una unidad calcárea arcillosa constituida por estratificación rítmica de caliza con lutita negra. El horizonte de manganeso se presenta como carbonato de manganeso. El estrato de mineral de carbonato consta de rodocrosita de grano fino y materia orgánica dispersa, magnetita y maghemita con pequeñas cantidades de pirita (Okita, 1992). Este autor sugirió un ambiente deposicional marino restringido. De acuerdo con Alexandri y Martínez Pérez (1988), los óxidos son productos de la meteorización secundaria de los horizontes de carbonato de Mn.

- *Formación Pimienta (Tithoniano-Berriasiano)*

Heim (1926), la define en el Rancho Pimienta situado aproximadamente a 300 metros al Oeste de la carretera México – Laredo, en San Luis Potosí como: series de caliza densa en capas finas de color negro y blanco, con intercalaciones de pedernal negro; Aguilera (1972) describe esta misma secuencia para la región de Tampico. Hermoso y Martínez (1972) describen para la parte superior de la unidad como caliza arcillosa de color pardo oscuro, con intercalaciones de lutita y nódulos de pedernal negro; y para la parte inferior: caliza negra arcillosa de estratificación delgada, que alternan con capas de lutita de color negro, así como con capas de bentonita y pedernal negro. El ambiente de depósito de la Formación Pimienta es de carácter transgresivo, varía de plataforma externa a cuenca, con muy baja energía. En la mayoría de sus exposiciones, ésta descansa concordantemente sobre la Formación Chipoco o discordantemente sobre el basamento. Debido a su incompetencia litológica se encuentra muy plegada. Sobre ésta, transicionalmente, se encuentra la Formación Tamaulipas Inferior. Algunos afloramientos de fácil acceso se encuentran en el trayecto mencionado anteriormente para la Formación Chipoco, y en la Carretera Federal 105 en el tramo entre Zacualtipán y Molango.

Terciario

- *Formación Tlanchinol (Neógeno, Mioceno Tardío)*

Arcillosa de color pardo oscuro, con intercalaciones de lutita y nódulos de pedernal negro; y para la parte inferior: caliza negra arcillosa de estratificación delgada, que alternan con capas de lutita de color negro, así como con capas de bentonita y pedernal negro. El ambiente de depósito de la Formación Pimienta es de carácter transgresivo, varía de plataforma externa a cuenca, con muy baja energía. En la mayoría de sus exposiciones, ésta descansa concordantemente sobre la Formación Chipoco o discordantemente sobre el basamento. Debido a su incompetencia litológica se encuentra muy plegada. Sobre ésta, transicionalmente, se encuentra la Formación Tamaulipas Inferior. Algunos afloramientos de fácil acceso se encuentran en el trayecto mencionado anteriormente

para la Formación Chipoco, y en la Carretera Federal 105 en el tramo entre Zacualtipán y Molango Sobre la carretera Federal 105 en la desviación a Tepehuacán de Guerrero, está constituida por basaltos de color gris oscuro, observándose vesículas con aspecto vítreo, intercalado con una serie de depósitos extrusivos. En su base se ha evidenciado una serie de brechas de aspecto tobáceo riolítico, sus componentes son principalmente basaltos y algunas riolitas; la forma de las partículas son sub-angulosas y angulosas, unidos por una matriz tobácea. Le sobreyace un horizonte de toba fina semi compacta color rojizo. También, puede ser observable en trayecto de Ixtlahuaco a Huiznopala, a la altura de la comunidad de Acatepec, donde se dispone como secuencias de diferentes derrames basálticos con formas prismáticas, y material tobáceo entre ellas evidenciando piro-metamorfismo entre cada colada. El vulcanismo activo junto con la orogenia Laramide provocó cambios en la topografía y la formación de cuencas y lagos, permitiendo una gran diversidad de peces de agua dulce

Cuaternario Aluvión (Q)

Se trata de sedimentos formados por actividad fluvial, acumulándose en los ríos y arroyos y en ocasiones han podido formar suelos aptos para establecer cultivos. La mayor parte son depósitos conglomeráticos mono y oligomícticos, que forman abanicos aluviales no consolidados, su matriz areno-arcillosa comúnmente saturada evoluciona a suelos muy fértiles. Son observables en algunas partes del Río Claro y Arroyo Chipoco. Durante el Cuaternario se observan efectos de glaciaciones derivados del cambio climático, provocando cambios en la vegetación. A finales del Plioceno (2-4 ma) se manifiesta el vulcanismo máfico que obstruye el drenaje de las cuencas y genera paleo-lagos (López Ramos, 1972).

II.6. Geología Local

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias Jurásicas, las cuales se describen en la columna estratigráfica, así como las cuatro unidades de la Formación Chipoco propuesta por Ochoa Camarillo (1996). El yacimiento de manganeso se presenta en la base de la Formación Chipoco de edad Jurásico superior perteneciente al kimeridgiano-titoniano asignada con base en determinaciones paleontológicas, siendo esta Formación el objeto de estudio.

- *Formación Huayacocotla*

En la región de Molango se identificó, en la cima de la unidad, la secuencia lito estratigráfica denominada por Erben (1956) "lutita con plantas" y se señaló una composición siliciclástica con ausencia de carbonato.

Dado a sus características litológicas, esta formación pudo ser observada en el área de estudio durante el levantamiento de columnas estratigráficas en algunas zonas cerca del viejo tajo Tetzintla y en el tajo Naopa. Originalmente su nombre fue dado por Imlay et al. (1948) a una sección constituida en su parte inferior por conglomerado, arenisca y lutita,

cementadas por material arcillo-arenoso gris oscuro. Hacia la parte superior está formada por calizas arenosas con pelecípodos y sobre éstas se encuentran 500 m de lutita gris oscuro, carbonosa, alternadas con capas delgadas de arenisca gris oscuro. Su localidad tipo se encuentra en el río de Vinasco, en las cercanías del poblado de Huayacocotla.

En General, dentro del distrito Molango se han reconocido tres unidades bien diferenciadas:

1. La unidad de la base consiste en conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas, con algunos intervalos de brecha. Se caracteriza por la ausencia de fósiles autóctonos, y que únicamente se encuentran fósiles re TRABAJADOS. Los fragmentos del conglomerado se encuentran redondeados y son de areniscas, rocas volcánicas y calizas. En la parte más baja de esta unidad se encuentra una secuencia rítmica de areniscas y lutitas con un horizonte de caliza de unos 5 m de ancho. Aparentemente, en esta unidad es más característica la presencia de conglomerados y areniscas de cuarzo.
2. La unidad intermedia es muy semejante a la unidad inferior, pero con la característica de que presenta fósiles de amonitas en las lutitas.
3. La unidad superior consiste en lutitas y limolitas ligeramente verdosas y presencia de fósiles de helechos. También se presentan, aunque no comúnmente, estratos de areniscas y conglomerados. Modificado por Méndez García (2009).

El conjunto pertenece a una cuenca epicontinental intra-arco, evidenciado por estructuras sedimentarias flaser y hummocky, de un ciclo de marea débil donde un centímetro de sedimento representa aproximadamente un año de sedimentación (Esquivel-Macías et al., 2005).

Los elementos principales y traza tienen un patrón idéntico en todos los afloramientos, lo que indica su deposición y origen comunes. Además de estos datos, existe una anomalía positiva en las concentraciones de isótopos del europio encontradas. Aquí, confirmando la reducción de las condiciones ambientales. Esta anomalía también es consistente con el alto valor de pH, que favoreció la disolución de las conchas.

Según sus fósiles y sus respectivas asociaciones tafonómicas, la mayoría de los afloramientos sinemurianos representan una zona paleo ambiental medio proximal/nerítico. Esta cuenca estaba habitada por organismos nektónico, bentónico-epifaunal, así como hábitos de infauna poco profundos. Los sedimentos eran de naturaleza inestable con alto índice de sedimentación siliciclástica. (Esquivel-Macías et al., (2017).

- *Formación Tepéxic*

Fue descrita originalmente por Erben (1956) como calcarenita gris oscuro, con intercalaciones de lutita calcárea en estratos delgados gris oscuro; ambas se intemperizan a color amarillento. Está constituida por calizas arcillosa de textura arenosa, con intercalaciones de lutita calcárea, ambas gris oscuro; presentan abundantes fósiles

de las familias de los Ostrácodos y Rudistas. Se distingue por presentar pequeños acantilados y por el color pardo amarillento que presenta al intemperizarse. Al norte de la mina de Acuatitla presenta espesor de 35 m.

La formación Tepexic se depositó en un ambiente de plataforma muy somero, cercano a la costa, evidenciando por la presencia de horizontes oncolíticos y estratificados por la presencia de horizontes oncolíticos y estratificación ondulada, así como abundantes ostreidos y trigonidos. La presencia de oolitos indica un medio de sedimentación cercano a la línea de costa, mientras que las ostreaeas y gryphaeas se desarrollaron en sustratos duros, donde viven adheridos, lo que hace suponer la existencia de barras y pequeños islotes, dentro de lagunas someras fangosas donde abundaban las tragonías. Los sedimentos marinos de la formación Tepexic están indicando el inicio de la sedimentación de carbonatos, observándose en el área de estudio un cambio notable en la naturaleza química de los sedimentos del jurásico inferior y los del jurásico medio. Este cambio señala el hundimiento de la región y el inicio de una transgresión marina, posiblemente relacionada con la apertura del Golfo de México. Ochoa C. (1998).

Las unidades que se distinguen, descritas de abajo hacia arriba, son:

- 1) Unidad conglomerática que se encuentra en la base de la formación, está constituida por un conglomerado de gránulos y guijarros de cuarzo dentro de una matriz calcárea. El espesor de este conglomerado calcáreo puede ser de 25 m.
- 2) Unidad arenosa que está constituida por una secuencia de areniscas calcáreas que gradualmente cambia hacia arriba a calizas arenosas grises. La estratificación varía de 1.4 a 1.2 m y su espesor en promedio es de 60 m.
- 3) Unidad pisolítica que está constituida por calizas pisolíticas gris oscuro en estratos de 0,2 a 0,4 m de espesor. En esta unidad se presentan en forma abundante los fósiles de *Gryphaea sp* y amonites del género *Reineckeia sp*. El espesor de esta formación es de unos pocos metros, no llegando a los 20 m.
- 4) La unidad margosa que se encuentra en la parte superior de la formación, y está constituida por margas y limolitas calcáreas gris oscuro. Son abundantes los fósiles de *Gryphea sp* y *Ostrea sp*. y *trigonias*. El espesor no se ha determinado.

El contacto inferior de la formación Tepexic es concordante y abrupto con la formación Cahuassas, aunque existen localidades donde descansa directamente sobre la formación Huayacocotla. El contacto superior de esta formación es con la formación Santiago. El espesor total de la Tepexic varía de 40 a 350m y tiende a acuñarse hacia el oriente hasta desaparecer. Méndez García (2009).

- *Formación Santiago*

Fue propuesta originalmente como miembro de la Formación Tamán; posteriormente fue estudiada por Cantú-Chapa en 1971 y elevada a la categoría de formación cantú (1969 y 1976), encontró en esta localidad macrofauna que indica una edad del Oxfordiano tardío. Esta formación consiste de una secuencia de limolita calcárea carbonoso gris

oscuro a negro, con intercalaciones de caliza en espesores de medianos a gruesos. Contiene pirita diseminada y se intemperiza a color pardo amarillento, presenta, además, crucero diagonal a los planos de estratificación. Su nombre se deriva del arroyo de Santiago, que desemboca en el río Moctezuma, en el pueblo de Tamán, S.L.P., designándose en esta región su localidad tipo. Está constituida por limolitas calcáreas carbonosas gris oscuro a negro, con pirita diseminada y fractura subconcoidea. Contiene concreciones calcáreas que se localizan hacia la cima de la formación, así como amonites piritizadas. Presenta crucero en dos direcciones, uno diagonal y otro perpendicular al rumbo de los estratos. Su espesor en el área no ha sido medido. Se encuentra distribuida ampliamente en todo el distrito y es de gran interés en la exploración regional, ya que subyace al horizonte manganesífero. Se encuentra sobreyaciendo en contacto transicional a la Formación Tepexic y subyace concordantemente al horizonte manganesífero contenido por la Formación Chipoco.

Encima de la formación Santiago se halla la formación Chipoco, en contacto concordante y abrupto. Las relaciones estratigráficas de esta formación se pueden observar en los afloramientos artificiales del tajo Tetzintla de la Compañía Minera Autlán. El espesor de la formación Santiago es muy variable respecto al área de estudio en este trabajo de tesis.

Ambiente de depósito la composición limolítica calcárea de la formación Santiago y la ausencia de fósiles, sobre todo en la parte media, señalan que se depositó bajo condiciones marinas tranquilas y reductoras, en facies de cuenca (pedrazzini y Basañez, 1978; Okita, 1987; Maynard y colaboradores, 1988).

- *Formación Chipoco*

Anteriormente se le ha denominaba Formación Tamán mixta. Actualmente se define como unas secuencias de caliza y limolita calcáreas alternadas, ambas gris oscuro, presentándose en estratos delgados y medianos. El horizonte manganesífero está integrado en esta formación; dicho horizonte se encuentra en la base, constituida por una secuencia de caliza manganesífera de grano fino, gris oscuro a negro, que se intemperizan a color pardo, de estratificación laminar. Ocasionalmente presenta laminaciones de 1 a 2 mm; presenta fracturas rellenas de cuarzo, calcita y en ocasiones rodocrosita. Su localidad tipo se encuentra en el poblado de Chipoco, Hgo. En las zonas donde aflora el horizonte manganesífero se presenta la transformación de carbonatos a óxidos producida por procesos de meteorización, originándose el enriquecimiento secundario del horizonte manganesífero. De acuerdo con Hermoso-de la Torre y Martínez-Pérez (1972), la Formación Chipoco tiene espesor de 207 m.

Aguayo-Camargo (1977) propuso que la formación Chipoco se depositara en un ambiente sedimentario, marino, somero de plataforma. Maynard y colaboradores (1990) consideran a esta unidad como un depósito de facies de talud, y Ochoa-Camarillo (1996), basándose en la presencia súbita de manganeso que se interpreta como un cambio brusco en las características fisicoquímicas del agua, relacionado con la posible comunicación de la fosa de Huayacocotla y el protogolfo de México, considera que el depósito ocurriera en un ambiente de cuenca.

Ochoa C (1996), distingue cuatro unidades litológicas con base en núcleos de sondeo y estratificación detallada. miembro 1 constituido por caliza manganesífera con intercalaciones de lutita calcárea; miembro 2 caracterizado por arenisca calcárea con intercalaciones de lutita calcárea arenosa; miembro 3 constituida por limonita y lutita calcárea con intercalaciones de caliza arcillosa; miembro 4 está constituido por una secuencia de caliza interestratificada en forma rítmica con lutita negra.

La formación Chipoco fue definida originalmente como un conjunto de rocas sedimentarias dispuestas en una alternancia de calizas de textura “grainstone” y lutitas calcáreas gris obscuro. Se han diferenciado cuatro unidades de esta formación, a saber, de su base hacia arriba:

1. La unidad u horizonte manganesífero que está constituida por calizas arcillosas negras en estratos de 10 a 20 cm, con intercalaciones de lutitas calcáreas, y cuya característica principal es la presencia de carbonatos de manganeso, principalmente rodocrosita, que constituyen la roca. Cuando el contenido de manganeso es muy alto, es de decir, arriba del 25%, la roca se presenta como una caliza negra, laminar, con brillo vítreo y al meteorizarse adquiere aspecto ferroso. El contenido de manganeso siempre es mayor en la base, inmediatamente arriba del contacto normal con las limolitas calcáreas de la formación Santiago. El contenido máximo que llega a tener es de 28% de Mn en un espesor no mayor a los 8.0 m, y gradualmente decrece hacia arriba. Una característica de esta unidad es la presencia de pirita epigenética finamente diseminada y en delgadísimas bandas dentro de los estratos. El horizonte manganesífero llega a tener cerca de los 20 m de espesor y el contenido de manganeso en la parte más alta no sobrepasa 5%. Espesor 40 a 80 m.
2. La unidad arenosa está constituida por areniscas calcáreas gris obscuro en estratos de 1.2 a 0.6 m de espesor intercaladas con lutitas calcáreas. El espesor de esta unidad es de 20 a 30 m.
3. La unidad limolítica que se caracteriza por el predominio de limolitas y lutitas calcáreas gris obscuro con intercalaciones de calizas arcillosas negras. El espesor varía de 20 a 40 m.
4. La unidad rítmica de calizas negras recristalizadas en estratos de 0,1 a 0,4 m, interestratificadas con lutitas negras delgadas. Esta unidad es la superior y manifiesta el cambio transicional hacia la formación pimienta. Espesor de 20 a 40 m. En base a Ochoa C (1996), modificado por Méndez García (2009).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOLOGÍA

III.1 Recopilación bibliográfica

Se comenzó con la búsqueda bibliográfica de los estudios previos de la Formación Chipoco y depósitos de tufas calcáreas, se consultaron libros, artículos, tesis de la zona de estudio, sitios web relacionados con la zona del caso de estudio, cartas geológicas y topográficas del INEGI y Servicio Geológico Mexicano (SGM). Posteriormente se organizó la información por carpeta para cada artículo, específicamente de la Formación Chipoco y para depósito, geoquímica y origen de los depósitos de tufas calcáreas.

III.2 Toma de muestras de agua

Se tomaron 15 muestras de agua a lo largo del río Chipoco. Cinco se tomaron en el sector norte (3a,3b,3c,3d,3e), cinco muestras en el sector central (2a,2b,2c,2d,2e) y cinco muestras en el sector sur (1a,1b,1c, 1d,1e). Los muestreos de agua se realizaron en los meses de febrero y julio del año 2022. Para el muestreo, conservación y manejo de las muestras se siguió la Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. Las muestras tomadas se colocaron en hieleras con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo cerradas para su traslado al laboratorio, a una temperatura entre 4 y 10°C, cuidando de no congelar las muestras.

III. 3 Características físicas del agua

La temperatura se midió con un termómetro de mercurio con una precisión de 1°C. El pH se determinó con un potenciómetro Corning modelo 610 A. La conductividad eléctrica (CE) se midió con un conductímetro 850037 SPER SCIENTIFIC. Los sólidos totales disueltos (TDS) se midieron con un TDS PURIKOR PK-TDS3, y la dureza del agua se calculó a partir del contenido de sales de calcio y magnesio.

III. 4 Análisis químico del agua

Para el análisis de metales se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X y el difractor de rayos X (el análisis se realizó en el laboratorio LICAM, del Departamento de Minería, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato).

III. 5. Muestreo de macrófitos y plantas vasculares

Los macrófitos engloban diferentes grupos de comunidades vegetales (briofitas, microalgas y cianobacterias). Su recolección es fácil debido a su tamaño y localización en la masa de agua (orillas). El muestreo de briófitos se realizó de forma cualitativa, incluyendo la observación visual y la recolección de los tipos más representativos de la zona de estudio, siendo la especie más común *Plagiomnium cuspidatum*.

Las diatomeas estudiadas se encuentran en las muestras de briófitos. Estas briófitas se encuentran creciendo en depósitos de tufas calcáreas de edad Holoceno que afloran en el río Chipoco dentro del distrito manganeso de Molango Hidalgo. Las muestras de

briofitas fueron analizadas mediante análisis petrográfico y Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS).

Para el análisis petrográfico, las muestras se cortaron en secciones delgadas con un cortador circular de roca y se montaron en portaobjetos de vidrio con resinas epóxicas. Las muestras se esmerilaron y pulieron con granalla de carburo hasta alcanzar un espesor de 0,3 mm. A continuación, las secciones se cubrieron con portaobjetos de vidrio para poder caracterizar la textura y los minerales de la piedra mediante análisis microscópico. La identificación y caracterización de los minerales se realizaron con el microscopio petrográfico BX41, utilizando luz plana como luz polarizada cruzada.

Los aspectos morfológicos de las muestras de briofitas y plantas vasculares se investigaron mediante observación por SEM sin ningún recubrimiento metálico. Para ello, se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS), modelo (JEOL, JSM-6010 PLUS/LA), que funcionó a 15 kV en bajo vacío, mientras que el espectrómetro de barrido de dispersión de energía medida (EDS), acoplado al SEM, se obtuvo para el análisis químico semicuantitativo. Todos los análisis se realizaron en el laboratorio LICAMM de la Universidad de Guanajuato. Para la identificación de las especies de briofitas se utilizó el manual de briofitas (Delgadillo, 1990).

III. 6. Observación de Diatomeas al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), Clasificación

Los aspectos morfológicos de las diatomeas se investigaron mediante observación (SEM) con recubrimiento de oro. El instrumento SEM (JEOL, JSM- 6010 PLUS/LA) funcionó a 15 kV en bajo vacío, mientras que el espectrómetro de barrido por dispersión de energía (EDS), se acopló al SEM, y se utilizó para el análisis químico semicuantitativo. Los análisis SEM-EDS se realizaron en el laboratorio LICAMM de la Universidad de Guanajuato. Para su observación se utilizó el protocolo de [15], describiéndolo a continuación:

1. La muestra se filtró con un filtro que no se disuelve con solvente orgánico.
2. Los filtros se colocaron en recipientes adecuados para su secado en puntos críticos.
3. Se fijaron con una solución de glutaraldehído al 2,5% en tampón fosfato 0,1M preparada con agua de mar filtrada.
4. Para eliminar las sales, las muestras se transfirieron a concentraciones decrecientes de agua de mar.
5. Después de la fijación se deshidrataron en una serie de etanol creciente.
6. Finalmente, la muestra se secó hasta el punto crítico en el desecador. La determinación taxonómica se realizó siguiendo los criterios de Mora Hernández (2017), Salinas Camarillo (2018) y Bahls et al. (2018).

III. 7 Análisis del índice de Shannon-Weiner

El índice de diversidad de Shannon-Weiner es un índice utilizado para cuantificar la biodiversidad, que engloba la riqueza de especies y sus componentes, determinando el

estado de contaminación de una masa de agua. Se considera un buen indicador del impacto que el medio ambiente tiene sobre las especies. El índice muestra la heterogeneidad de una comunidad teniendo en cuenta dos factores, el número de especies presentes y su abundancia relativa. Según Margalef (1972) el índice de Shannon-Weiner varía de 1 a 5, interpretando los valores inferiores a 2 como baja diversidad, de 2 a 3,5 media y superiores a 3,5 como alta diversidad.

Para determinar el índice de diversidad de Shannon Weiner se aplicó la ecuación 1

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \times \ln(p_i) \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde H es el índice de Shannon Weiner; p_i , es la proporción total de números de individuos; $\ln(p_i)$ logaritmo natural de p_i .

III. 8 El índice de Simpson (D)

El índice de Simpson (D) también se conoce como índice de diversidad de especies o índice de dominancia. Es uno de los parámetros que permite evaluar qué especies se encuentran en mayor proporción en una muestra. En realidad, es un índice de dominancia y riqueza. Se utiliza desde un punto de vista ecológico para cuantificar la biodiversidad de un hábitat. El índice de Simpson representa la probabilidad de que individuos tomados al azar dentro de un hábitat pertenezcan a la misma especie. Es decir, cuanto más se acerque su valor a la unidad, mayor será la posibilidad de dominancia de una especie o población. Cuanto más se acerque el valor a cero, mayor será la biodiversidad de un hábitat.

La fórmula del índice de Simpson se representa en la ecuación 2.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^S n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde S es el número de especies; N es el número total de organismos presentes (o unidades cuadradas); n es el número de especímenes por especie.

III. 9 Análisis estadístico

Se utilizó el análisis descriptivo (RStudio versión 3.6) para calcular la media y la desviación estándar de las variables fisicoquímicas de las estaciones de muestreo. Los datos experimentales entre estaciones de muestreo se compararon mediante ANOVA de una vía. Se realizó la prueba de rangos múltiples de Duncan para distinguir las estaciones de muestreo. Las correlaciones diatomeas-ambiente y ambiente se calcularon mediante la prueba de correlación de Spearman para evaluar las relaciones entre la diversidad de especies, los índices de diatomeas y los factores ambientales. Los porcentajes de los conjuntos de diatomeas se utilizaron en análisis multivariantes. Se aplicó la prueba de permutación de Monte Carlo para obtener qué factores explicativos determinan

significativamente la distribución de la composición de diatomeas. Se calcularon los niveles óptimos y de tolerancia de las especies de diatomeas a los estresores fisicoquímicos utilizando el modelo de regresión de promedios ponderados (Juggins y Ter Braak 1992).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

IV. 1 Características fisicoquímicas del agua

Las características fisicoquímicas del agua se muestran en la *Tabla 1*.

El agua del tramo norte (3a,3b,3c,3d,3e) del río Chipoco presenta una temperatura de 24,5°C, clasificando estas aguas como mesotermales. En cuanto al pH, el agua presentó un pH de 7,9 (alcalina). La Conductividad Eléctrica fue de 130 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que el Total de Sólidos Disueltos fue de 230 ppm. La dureza era de 500 ppm, lo que indica la presencia de agua dura. La alcalinidad era de 240 y no se registraron concentraciones de cloro.

El sector central (2a,2b,2c,2d,2e) presentó una temperatura de 22,1°C, clasificando estas aguas como mesotermales. En cuanto al pH, el agua presentó un pH de 8,2 (alcalina). La conductividad eléctrica fue de 530 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que el total de sólidos disueltos fue de 187 ppm. La dureza era de 500 ppm, lo que indica la presencia de agua dura. La alcalinidad fue de 120, no se registraron concentraciones de cloro.

El sector sur (1a,1b,1c,1d,1e) presentó una temperatura de 22,1°C, clasificando estas aguas como mesotermales. En cuanto al pH, el agua presentó un pH de 8,2 (alcalina). La conductividad eléctrica fue de 535 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que el total de sólidos disueltos fue de 197 ppm. La dureza era de 500 ppm, lo que indica la presencia de agua dura. La alcalinidad era de 120 y no se registraron concentraciones de cloro. De acuerdo con lo anterior, las aguas superficiales del río Chipoco fueron clasificadas como bicarbonatadas cálcicas (*Tabla 1*).

Ninguno de los tres sectores presentó presencia de nitritos y amonio. Altas concentraciones de Al, Mg, Ca, Cu, Sn, Cl y S se observaron en el sector central y sur del río Chipoco, mientras que en el sector norte del río Chipoco los elementos que presentaron las mayores concentraciones fueron Al, Ca, Mg y S.

Muestras	Sector sur de la Río Chipoco (1a,1b,1c,1d,1e)	Sector central de la Río Chipoco (2a,2b,2c,2d,2e)	Sector norte de la Río Chipoco (3a,3b,3c,3d,3e)
Coordenadas	20°98'57'' 98°72'12''	20°98'10'' 98°72'29''	21°00'37'' 98°73'84''
Altitud (m)	1100	1000	1069
pH	8.2	8.2	7.9
Temperatura (°C)	22.1	22.1	24.5

Alcalinidad	120	120	240
Dureza (ppm)	500	500	500
Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	535	530	130
Sólidos disueltos totales (ppm)	197	187	230
CO ₂ (ppm)	8.2	8.2	8.0
Cloro (ppm)	ND	ND	ND
Na ₂ O(%)	ND	ND	ND
MgO(%)	42.9	39.85	23.6
CaO(%)	0.126	0.23	6.58
K ₂ O(%)	0.65	0.45	0.98
Al ₂ O ₃ (%)	24.2	22.4	9.92
SiO ₂ (%)	20.6	19.94	21.7
S ₂ O ₃ (%)	25.75	42.74	50
NO ₃ (%)	ND	ND	ND
NH ₄ (%)	ND	ND	ND
P ₂ O ₅ (%)	12.5	9.3	8.39
Fe ₂ O ₃ (%)	15.64	11.54	0.087
Si (ppm)	16	16.9	17.1
Na (ppm)	ND	ND	ND
Al (ppm)	642	763	765
Mg (ppm)	210	235	340
Ca (ppm)	257	259	359
K (ppm)	0.20	0.25	0.33
Cl (ppm)	68.8	70.2	32.2
S (ppm)	1190	1105	1121
Cu (ppm)	3.77	2.10	0.078
Sn (ppm)	12.2	6.5	0.067

Tabla 1. Características fisicoquímicas de las muestras obtenidas en el río Chipoco

IV. 2 Ensamblajes de briófitos y diatomeas

La especie de briófito donde se observaron las diatomeas corresponde a la especie *Plagiomnium cuspidalum* del género *plagiomnium* de la familia *Mniaceae*. *P. cuspidalum* se caracteriza por ser un musgo pequeño con brotes de 1.5-4 cm de altura y hojas de aproximadamente 3 mm de longitud (Wyatt y Odrzykoski, 1998). Las hojas de *P. cuspidalum* se estrechan gradualmente hacia la punta, más que otras especies del género. Los márgenes de las hojas tienen dientes afilados y están ausentes en la mitad inferior de las hojas, mientras que se ve el nervio central. Las hojas están dispuestas en pseudo verticilos, donde la disposición de las hojas se origina en diferentes niveles, sus hojas miden alrededor de 2,5 a 3,5 mm de largo (*Figura 2*).

P. cuspidalum no se reproduce asexualmente, pero es dioica (tiene anteridios y

arquegonios en plantas separadas) y sinoica (tiene arquegonios y anteridios en la misma planta). Desde el pie de la planta, puede haber múltiples setae que elevan las cápsulas por encima de la planta. Las cápsulas suelen tener un sombrero cónico. Las esporas miden entre 18 y 40 μm y son numerosas dentro de la cápsula (*Figura 2*).

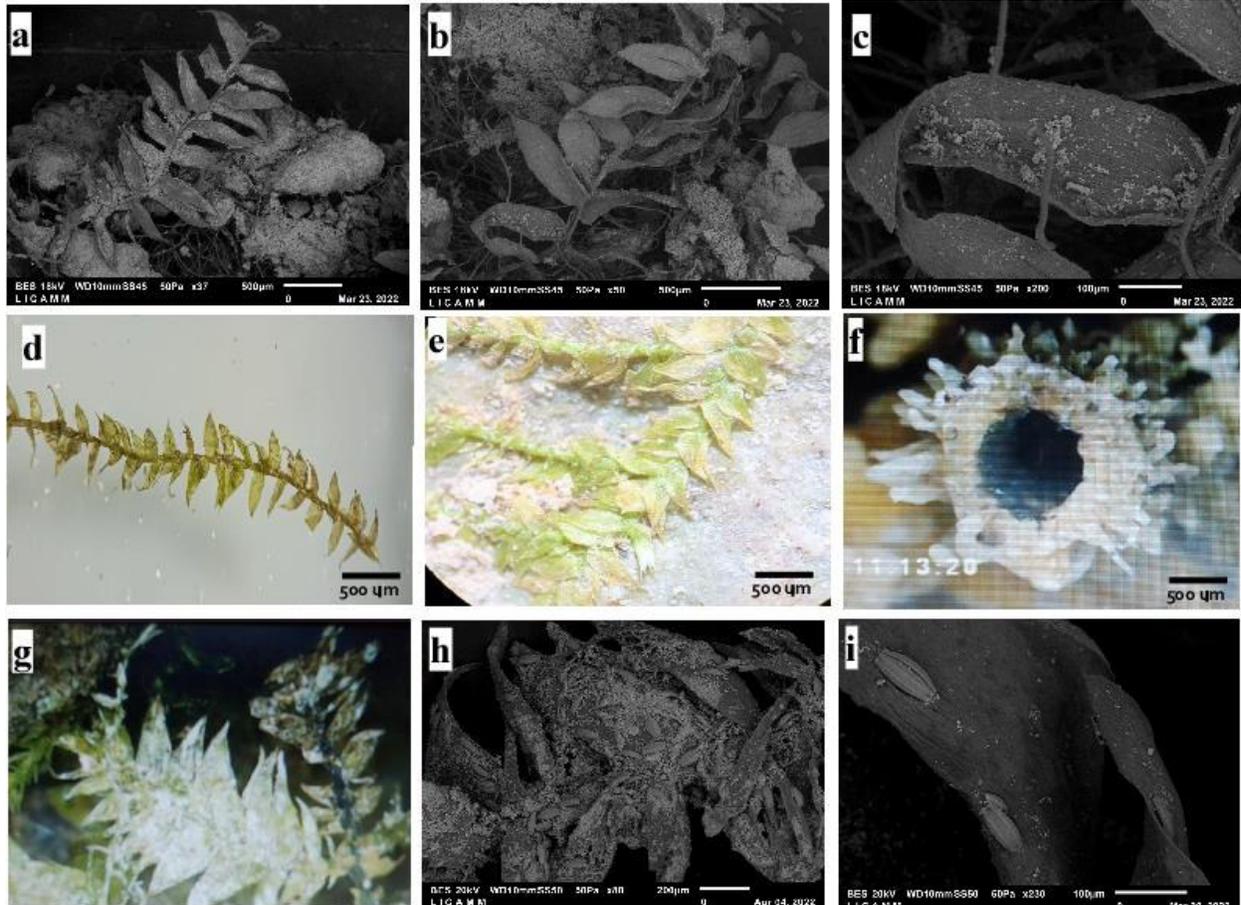


Figura 2. (a, b, c, d, e, g) P. Cuspidalum, hojas con dientes afilados, la disposición de las hojas se origina en diferentes niveles; f) Cápsula y tapa cónica; h,i) Diatomeas en la hoja de P. Cuspidalum

En los tres sectores del río Chipoco se obtuvo un total de diez géneros de diatomeas (*Amphora*, *Achnantheidium*, *Epithemia*, *Simonsenia*, *Rophadolia*, *Nitzschia*, *Rhoicosphenia*, *Pinnularia*, *Caloneis* y *Cyclotella*). Todas corresponden a diatomeas penales y centrales (*Tabla 2*). Entre las diatomeas penales, todas corresponden a la clase *Bacillariophyceae*. Las diatomeas generadas se presentan en la *Figura 3*.

Taxa	ID	Hábitat	Río Chipoco Norte (3a, 3b,3c, 3d,3e)	Río Chipoco Central (2a, 2b,2c, 2d,2e)	Río Chipoco Sur (1a,1b,1c, 1d,1e)
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (C.Agardh) Lange-Bertalot 1980	1	fw	25.64%	44.55%	43.25%
<i>Epithemia turgida</i> (Ehrenberg) Kützing 1844	1	fw	18.31%	34.65%	32,15%
<i>Caloneis bacillum</i> (Grunow) Cleve 1894	1	fw/mb	14.65%	0.0%	0.0%
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kützing) Czarnecki 1994	1	fw	9.15%	4.9%	4.7%
<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O.Müller 1895	1	fw/m	7.32%	0.0%	0.0%
<i>Amphora pediculus</i> (Kützing) Grunow in Schmidt 1875	1	fw	5.49%	4.9%	4.7%
<i>Pinnularia sp</i>	1	fw	2.56%	1.98%	1.95%
<i>Amphora sp</i>	1	fw/m	9.15%	1.98%	1.95%
<i>Nitzschia linearis</i> Smith 1853	1	fw/m	2.56%	4.9%	4.7%
<i>Simonsenia delognei</i> (Grunow) Lange-Bertalot 1979	1	fw/m	2.56%	1.98%	1.95%
<i>Cyclotella sp</i> (Kützing) Brébisson 1838	1	fw/m	2.56%	0.0%	0.0%

Tabla 2. Listado de especies de diatomeas identificadas del río Chipoco estudiadas y su abundancia con respecto al número total de especies. ID (1) especie cosmopolita conocida; Hábitat (**fw** agua dulce; **mb** marino salobre; **m** marino).

El sector norte del río Chipoco presenta una mayor riqueza de especímenes de diatomeas en comparación con los del sector central y sur, siendo las más abundantes *Rhoicosphenia abbreviata* con 25,64% de especímenes, *Epithemia turgida* con 18,31% de especímenes, *Caloneis bacillum* con 14,65%. de especímenes, *Achnantheidium minutissimum* con 9,15% de especímenes y *Rhopalodia gibberula* con 7,32% de especímenes. La diatomea central está representada por el género *cyclotella sp.* y se observa en el sector norte, representado por la clase *coscinodiscophyceae*, este género representa sólo el 2,56%. Las especies más abundantes en el sector central y sur del río Chipoco fueron *Rhoicosphenia abbreviata* con 44,55 % de los especímenes, *Epithemia turgida* con 34,65 % de los especímenes y *Achnantheidium minutissimum* con 4,9% de los especímenes. No se observaron las especies *Caloneis bacillum*, *Rhopalodia gibberula*. y *Cyclotella sp.*

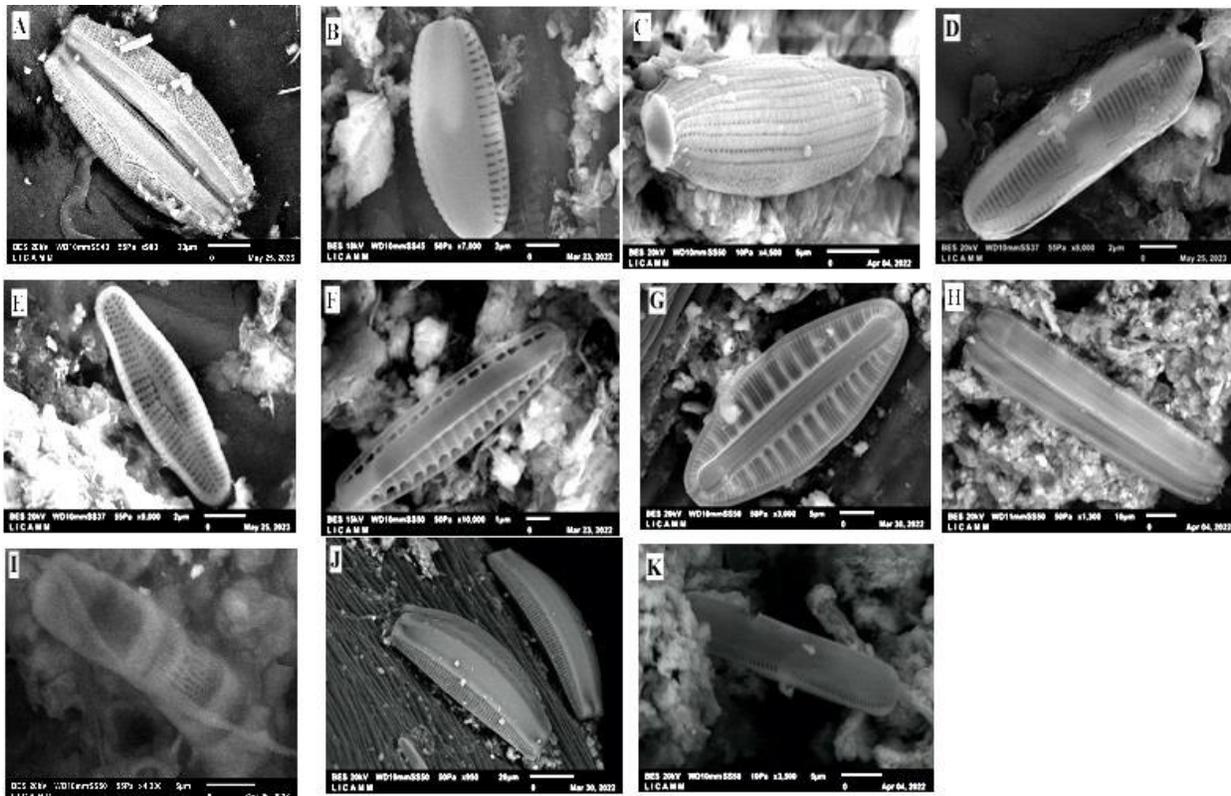


Figura 3. Fotografías con microscopio electrónico de barrido de diatomeas encontradas en el río Chipoco: **A)** *Epithemia turgida* (Ehrenberg) Kützing 1844; **B)** Pedículo de ánfora; **C)** *Amphora* sp.; **D)** *Caloneis bacillum*; **E)** *Achnantheidium minutissimum*; **F)** *Simonsenia delognei*; **G)** *Rhopalodia gibberula*; **H)** *Nitzschia linearis*; **I)** *Cyclotella* sp.; **J)** *Rhoicosphenia abbreviata*; **K)** *Pinnularia* sp.

Teniendo en cuenta lo anterior, los géneros con mayor número de especies en los tres sectores del río Chipoco fueron *Rhoicosphenia abbreviata* (70 a-45 especies), *Epithemia turgida* (50 a-35 especies), *Achnantheidium minutissimum* (25 a 5) y *Caloneis bacillum* (40 especies), dominando las especies cosmopolitas y dulces, y los hábitats de aguas salobres. El sector septentrional se caracterizaba por especies como *Rhoicosphenia abbreviate*, *Achnantheidium minutissimum* y *Nitzschia linearis* que preferían condiciones de mayor concentración de Mg y Ca.

IV. 3 Índice de Shannon-Wiener (H') e índice de Simpson (D)

El número de especies (S) en los sectores muestreados del río Chipoco se muestran en la *tabla 3*. La diversidad específica medida a través del índice de Shannon-Wiener (H') presentó los valores más altos en el sector norte en comparación con los del sector central y sur (*tabla 3*). Los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener varían entre 1,40 y 2,10, lo que significa que existe una mayor diversidad en el sector norte en comparación con los sectores centro y sur. Esto puede deberse a que las condiciones fisicoquímicas y el sustrato rocoso por donde pasa el agua del río Chipoco varían a lo largo de los tres tramos estudiados.

En cuanto al índice de Simpson (D), mostró un comportamiento similar al índice de Shannon-Wiener, en el cual el sector norte presentó mayor diversidad y dominancia que los otros dos sectores, ya que el valor del índice (D) fue más cercano a cero en comparación con el sector central y sur cuyo valor es más cercano a 1. Según Potapova y Charles (2002), la distribución, riqueza y dominancia de las comunidades de diatomeas es resultado de los factores fisicoquímicos del agua más que de los factores geológicos o climáticos, por lo que la química del agua es considerada el principal elemento para la composición de las especies (Solninen, et al 2004).

Muestra	Especies	Riqueza específica (s)	PI	H= PI X LN(PI)	PI ²	1/∑ PI ²
Sector Norte del río Chipoco (3a,3b,3c,3d,3e)	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	70	0.25	-0.34	0.065	
	<i>Epithemia turgida</i>	50	0.18	-0.31	0.033	
	<i>Caloneis bacillum</i>	40	0.14	-0.28	0.021	
	<i>Achnanthydium minutissimum</i>	25	0.09	-0.21	0.008	
	<i>Rhopalodia gibberula</i>	20	0.07	-0.19	0.005	
	<i>Amphora pediculus</i>	15	0.05	-0.15	0.003	
	<i>Amphora sp</i>	25	0.09	-0.21	0.008	
	<i>Simonsenia delognei</i>	7	0.02	-0.09	0.0006	
	<i>Nitzschia lineari</i>	7	0.02	-0.09	0.0006	
	<i>Pinnularia sp.</i>	7	0.02	-0.09	0.0006	
	<i>Cyclotella sp</i>	7	0.02	-0.09	0.0006	
Total	11	273	1	H=2.105	0.1485	D= 6.7319
Sector Central del río Chipoco (2a,2b,2c,2d,2e)	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	57	0.42	-0.36	0.17	
	<i>Epithemia turgida</i>	39	0.28	-0.35	0.08	
	<i>Achnanthydium minutissimum</i>	10	0.07	-0.19	0.005	
	<i>Amphora pediculus</i>	7	0.05	-0.15	0.002	
	<i>Amphora sp</i>	7	0.05	-0.15	0.002	
	<i>Simonsenia delognei</i>	5	0.03	-0.12	0.001	
	<i>Nitzschia lineari</i>	5	0.03	-0.12	0.001	
	<i>Pinnularia sp</i>	5	0,03	-0.12	0.001	
Total	8	135	1	H= 1.588	0.276	D= 3.613
Sector Sur del río Chipoco (1a,1b,1c,1d,1e)	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	45	0.44	-0.36	0.1985	
	<i>Epithemia turgida</i>	35	0.34	-0.36	0.120	
	<i>Achnanthydium minutissimum</i>	5	0.04	-0.14	0.002	
	<i>Amphora pediculus</i>	5	0.04	-0.14	0.002	
	<i>Amphora sp</i>	2	0.01	-0.07	0.0003	
	<i>Simonsenia delognei</i>	2	0.01	-0.07	0.0003	
	<i>Nitzschia lineari</i>	5	0.04	-0.14	0.002	
	<i>Pinnularia sp</i>	2	0.01	-0.07	0.0003	
Total	8	101	1	H= 1.40	0.3271	D= 3.0569

Tabla 3. Índice de Shannon-Weiner (H) e índice de Simpson (D).

Sin embargo, en esta investigación, el comportamiento que presenta el sector norte con respecto a los sectores centro y sur en cuanto a la diversidad y dominancia de diatomeas se debe a las condiciones del sustrato (depósitos de tobas calcáreas) que influyen en las características fisicoquímicas del agua, diferencia de los sectores centro y sur, donde la influencia radica en los desechos vertidos por las comunidades rurales y minas cercanas que provocan una disminución en la diversidad y dominancia de diatomeas.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Las aguas estudiadas del Río Chipoco se clasifican en aguas bicarbonatadas cálcicas, las cuales derivan de la disolución del sustrato por donde fluye el agua. Este sustrato está conformado por depósitos de tufas calcáreas de edad Holoceno, siendo su principal componente mineral el carbonato de calcio.

Estas aguas presentan un bajo nivel de nutrientes para estimular la fotosíntesis, pero a pesar de ello la variedad y diversidad de su flora es alta. Sobre los depósitos de tufas calcáreas crecen macrófitas específicamente briofitas de la especie *Plagiomnium cuspidatum*, albergando en sus estructura una diversidad de diatomeas penales y centrales. En las aguas superficiales del Río Chipoco las diatomeas proliferan debido a la luz solar, el dióxido de carbono y los nutrientes encontrados en las macrófitas.

Desde el punto de vista hidroquímico los sectores estudiados del río Chipoco se encuentran bien diferenciados, estableciendo dos grupos, el primero corresponde al sector norte, enriquecido por iones de calcio, magnesio y bicarbonatos los cuales son aportados por el basamento en el que predominan calizas, lutitas y dolomitas, sin influencia directa de desechos inorgánicos, ya que se encuentra alejado de los vertimientos de las minas y de las comunidades.

La baja conductividad eléctrica (130 $\mu\text{s}/\text{cm}$) evidencia bajos valores de iones metálicos, mientras que el segundo grupo (sector Central y Sur), se encuentra enriquecido por iones metálicos como el cobre (Cu) y el estaño (Sn), y por carbonatos, los cuales son aportados por las minas y el basamento rocoso que caracteriza al yacimiento de manganeso. Este grupo se encuentra impactado por residuos inorgánicos y mineros, su conductividad eléctrica es alta (530 $\mu\text{s}/\text{cm}$), evidenciada por los contaminantes metálicos y sales disueltas.

Con respecto al Potencial de Hidrógeno el sector Norte presentó un pH de 7.9, medianamente básico influenciado por un terreno alcalino (rico en Ca_2CO_3) por donde pasan los efluentes, mientras que el sector central y Sur, el pH es de 8.2 considerándose básico disminuyendo la disponibilidad del fósforo y Boro. En cuanto a los elementos químicos, en ninguna de las tres secciones se observó de nitritos y amonio, lo que representa aguas bien oxigenadas (Wetzel, 2001). Se observaron altas concentraciones de Al, Mg, Ca, Cu, Sn, Cl y S, en el tramo central y sur del río Chipoco, derivadas de la composición química de la roca (tobas calcáreas) y del vertimiento de desechos y agua ácida de las minas. Mientras que en el sector norte del río Chipoco los elementos que

presentan mayores concentraciones son Al, Ca y Mg derivados de la química de la roca (caliza, lutita y dolomita).

Estas diferencias se vieron reflejadas en los grupos de especies de diatomeas presentes en las briofitas que crecen en las orillas del río, observándose que en los sectores Central y Sur la flora diatomológica fue de carácter más alcalófilo ya que se desarrollaron en ambientes de pH elevado (8.2) en comparación con las del sector Norte. La alta riqueza de especies de diatomeas encontrada en el sector norte del río Chipoco podría deberse a varios factores como la variedad de macrófitas y plantas vasculares encontradas en las orillas de dicho río, como a las condiciones fisicoquímicas del agua e hidroquímicas del sustrato. La menor riqueza se muestra en el sector central y sur del río Chipoco, probablemente debido a la contaminación que presenta por el vertimiento de residuos por el proceso de urbanización de las comunidades y aguas ácidas provenientes de las minas.

En cuanto a las diatomeas identificadas éstas responden a la concentración de iones mayoritarios, observándose una flora relacionada a ambientes ricos en Ca, y Mg representada por *Rhoicosphenia abbreviata*, *Amphora pediculus*, y *Achnanthydium minutissimum*, similar a la reportada por Gauss (1986), Patrick and Reimer (1966), y Martínez de Fabricius et al (2003). Mientras que el sector Central y Sur no se observaron diatomeas de las especies *Caloneis bacillum*, *Rhopalodia gibberula*, and *Cyclotella* sp.

La especie *Rhoicosphenia abbreviata* y *Nitzschia lineari* se observó en las tres secciones del río Chipoco, dichas diatomeas han sido reportadas como sensible a la contaminación por (Cox, 1996; Krammer and Langer-Bertalot, 2004). La presencia de dichas diatomeas a lo largo del Río Chipoco pueda deberse según Montoya y Espinosa (1985), al transformar la materia orgánica a sales inorgánicas (nitratos, fosfatos y sulfatos), los cuales son fácilmente absorbidos por las algas y macrófitas, originando un significativo incremento de su biomasa en los cuerpos de agua. De igual manera la presencia de *Caloneis* en el sector Norte indica que dicho sector empieza a tener influencia de actividad agrícola, ya que tomando en cuenta a Reynolds (1996), dicha taxa se encuentra estrechamente relacionada con ambientes que presentan intensa actividad agrícola.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Los ríos son sistemas complejos en los que algunos factores ambientales varían en tiempo y espacio debido a ciertos factores como las condiciones climáticas, características geomorfológicas de la cuenca, diversidad geológica, influencia antropológica, que sumadas intervienen en la riqueza y distribución de las diatomeas.

En el área estudiada se identificaron diez géneros de diatomeas que se encontraban en briófitos de la especie *Plagiomnium cuspidatum* que crecen en las riberas de dicho río. Corresponden a diatomeas pennadas y centrales. Del tipo pennado, los géneros más abundantes fueron *Amphora*, *Achnanthydium*, *Epithemia*, *Simonsenia*, *Nitzschia*, *Rhoicosphenia* y *Pinnularia*. Del tipo central, los géneros más abundantes fueron

Cyclotella. A lo largo del estudio se destacó la presencia constante de un grupo de ocho especies *Rhoicosphenia abbreviata*, *Epithemia turgida*, *Achnanthydium minutissimum*, *Amphora pediculus*; *Amphora sp.*, *Simonsenia delognej*, *Nitzschia lineari*, *Pinnularia sp.*

La presencia de diatomeas tolerantes a la contaminación como *Rhoicosphenia abbreviata*, *Achnanthydium minutissimum*, y *Nitzschia lineari* fueron observadas en todas las secciones del río Chipoco, lo cual concuerda con lo reportado por (Cattaneo, et al., 1998; Sabater, 2000; Lobo, et al., 2004).

La abundancia y riqueza de diatomeas a lo largo de los tres sectores del río Chipoco puede estar influenciada por las características fisicoquímicas e hidroquímicas del agua, por la presencia de materia orgánica (briófitas y plantas vasculares), la naturaleza del sustrato, las actividades agrícolas y por los desechos que provienen de las comunidades y minas aledañas. En el sector norte, la diversidad y dominancia está regida por factores fisicoquímicos, la naturaleza del sustrato y las actividades agrícolas, mientras que en los sectores centro y sur está condicionada por los residuos que provienen de las comunidades y minas aledañas, que alteran la hidromorfología del río, y su condición hidroquímica.

Las tasas de diatomeas presentes reflejaron el deterioro de la calidad del agua condicionado por las actividades socioeconómicas (agrícola, minera), y urbanización, mostrando una disminución gradual de la diversidad, número de especies y dominancia.

REFERENCIAS

Abarca-Mejía N.C., 2010. Diatom community analysis and quality assessment of the polluted tropical Lerma River (Mexico). Tesis doctoral. Berlin: Freie Universität.

Ajuaba, S., Arenas, C., Capezzuoli, E. (2021). Sedimentología de las tobas palustres pleistocenas y depósitos asociados del Valle del Ebrón (Cordillera Ibérica, España). *Estudios Geológicos*, 77(1), e137-e137.

Alonso-Zarza, A.M., 2003, Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record: *Earth-Science Reviews*, v. 60, p. 261–298.

Álvarez-Blanco, I., Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C., Bécares, E. 2013. The Duero Diatom Index (DDI) for river water quality assessment in NW Spain: design and validation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 185: 969-981

Beraldi-Campesi, H., Arenas-Abad, C., Auque-Sanz, L., Vázquez-Urbez, M., Pardo-Tirapu, G. (2016). Benthic diatoms on fluvial tufas of the Mesa River, Iberian Range, Spain. *Hidrobiológica*, 26(2), 283-297.

Bojorge-García, M.G., Cantoral-Uriza, E.A., 2007. Estructura comunitaria de diatomeas asociadas a talos de *Prasiola mexicana* (Chlorophyta) en el río Magdalena, D.F. *Hidrobiológica*, 17:11p.

Bojorge-García, M., Carmona, J., Beltrán, Y., & Cartajena, M. 2010. Temporal and spatial distribution of macroalgal communities of mountain streams in Valle de Bravo Basin, central Mexico. *Hydrobiologia*. 641: 159-169.

Bojorge-García, M.G., Carmona, J., Ramírez, R., 2014. Species richness and diversity of benthic diatoms communities in tropical mountain streams of Mexico. *Inland Waters*, 4:279p

Brugam R., (1983) The relationship between fossil diatom assemblages and limnological conditions. *Hydrobiologia* 98: 223-235.

Carmona-Jiménez, J., Ramírez-Rodríguez, R., Bojorge-García, M. G., GonzálezHidalgo, B., Cantoral-Uriza, E. A. 2016. Estudio del valor indicador de las comunidades de algas bentónicas: una propuesta de evaluación y aplicación en el Río Magdalena, Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32(2): 139-152.

Cattaneo A., Asioli A., Comoli P. & Manca M., 1998. Organisms' response in a chronically polluted lake supports hypothesized link between stress and size. *Limnology and Oceanography* 43 (8): 1938-1943.

Çelekli, A., Lekesiz, Ö. (2020). Eco-assessment of West Mediterranean basin's rivers (Turkey) using diatom metrics and multivariate approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 27796-27806.

Çelekli A, Toudjani AA, Gümüş EY, Kayhan S, Lekesiz HÖ, Çetin T (2019). Determination of trophic weight and indicator values of diatoms in Turkish running waters for water quality assessment. *Turk J Bot* 43:90–101.

Cox, E.J., 1996. Identification of freshwater diatoms from live material. Londres: Chapman & Hall.

Delgadillo, C. (1990). Manual de briofitas (Vol. 8). Unam.

Field, CB., Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Sci* 1998 (281): 237-240.

Gasse F., 1986.- East African diatoms: Taxonomy, ecological distribution. *Bibliotheca Diatomologica*, Band 11. Ed: J. Cramer. 203 p

Ghozzi, K., Zemzem M, Dhiab RB, Challouf R, Yahia A, Omrane H, Ouada HB. Screening of thermophilic microalgae and cyanobacteria from Tunisian geothermal sources. *J Arid Environ*

2013 (97): 14-17.

Kociolek, J.P., Blanco S, Coste M, Ector L, Liu, Y, Karthick B, Kulikovskiy M, Lundholm N, Ludwig T, Potapova M, Rimet F, Sabbe K, Sala S, Sar E, Taylor J, Van de Vijver B, Wetzel CE., Williams DM, Witkowski A, Witkowski J. Diatom Base. 2021. Accessed at <http://www.diatombase.org> on 2021-08-13. doi:10.14284/504.

Lobo E.A., Callegaro V.L.M., Hermany G., Bes D., Wetzel C.A., Oliveira M.A., 2004. Use of epilithic diatoms as bioindicators from lotic systems in southern Brazil, with special emphasis on eutrophication. *Acta Limnologica Brasileria* 16 (1): 25-40.

Lobo, E. A. 2013. O perifiton como indicador da qualidade da água. p. 205-233. In: Schwarzbald, A., Burliga, A. L., & Torgan, L. C. (Eds.). *Ecologia do Perifiton*. São Carlos: RiMa Editora.

Lobo, E. A., Wetzel, C. E., Schuch, M., & Ector, L. 2014. Diatomáceas epilíticas como indicadores da qualidade da água em sistemas lóticos subtropicais e temperados brasileiros. EDUNISC: Santa Cruz do Sul.

Lobo, E. A., Schuch, M., Heinrich, C. D., Costa, A. B., Düpont, A., Wetzel, C. E., & Ector, L. 2015. Development of the Trophic Water Quality Index (TWQI) for subtropical temperate Brazilian lotic systems. *Environmental Monitoring Assessment*. 187: 354-366.

López Fuente, F.O. 2010. Diversidades alfa y beta de diatomeas epilíticas en oasis de Baja California Sur (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).

López Fuente, F.O., 2009. α -diversidad de diatomeas epilíticas del oasis de San Ignacio Baja California Sur, México. *CICIMAR Oceanídes*, 24(2), 101-110.

Margalef, R., 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona. 1010 p.

Martínez de Fabricius A.L., Maidana N., Gómez N. & Sabater S., 2003. Distribution patterns of benthic diatoms in a Pampean river exposed to seasonal floods: the Cuarto River (Argentina). *Biodiversity and Conservation* 12: 2443-2454.

Montejano, G., Carmona-Jiménez, J., & Cantoral-Uriza, E. 2000. Algal communities from calcareous springs in La Huasteca, central Mexico: a synthesis. En: M. Munawar, S. G. Lawrence, I. F. Munawar, & D. F. Malley (eds.), *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*, (pp. 135-149). Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.

Montejano-Zurita, G., Cantoral-Uriza, E. A., & Carmona-Jiménez, J. 2004. Algas de ambientes lóticos en la cuenca baja del río Pánuco. En: I. Luna, J. J. Morrone, & D. Espinosa (eds.), *Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental* (pp. 111-126), Las Prensas de Ciencias, México, D.F.

Mora, D., Carmona, J., Cantoral-Uriza, E.A. 2015. Diatomeas epilíticas de la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(4), 1024-1040.

Mora, D., Carmona, J., Jahn, R., Zimmermann, J., Abarca, N. 2017. Epilithic diatom communities of selected streams from Lerma-Chapala Basin, Central Mexico, with the description of two new species. *PhytoKeys*. 88: 39-69.

Mora, D. 2018. An integrative approach to epilithic diatom diversity analysis in tropical streams from the Lerma-Chapala Basin, Central Mexico. Dissertation, Freie Universität Berlin, Germany

Patrick R., Reimer C.W., 1966. The Diatom of the United States, exclusive of Alaska & Hawaii. Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Vol I N°13. 668 p

Platt, N. H., Wright, V. P. (1992). Palustrine Carbonates and the Florida Everglades: Towards an Exposure Index for the Fresh-Water Environment? *Journal of Sedimentary Petrology*. 62. 1058-1071.

Potapova, M.G., Charles D.F., 2002. Benthic diatoms in USA rivers: distribution along spatial and environmental gradients. *Journal of Biogeography*, 29:167p.

Ramachandra, T.V., Madhab- Mahapatra, D., Karthick B, Gordon R. Milking Diatoms for Sustainable Energy: Biochemical Engineering versus Gasoline-Secreting Diatom Solar Panels. *Ind. Engine. Chem Res* 2009 48 (19), 8769-8788.

Ramírez-Vázquez, M., Beltrán-Magos, Y., Bojorge-García, M., Carmona-Jiménez, J., Cantoral-Uriza, E.A., Valadez-Cruz, F., 2001. Flora algal del río La Magdalena, Distrito Federal, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 68:45p.

Ramírez-Vázquez, M., Cantoral-Uriza, E.A., 2003. Flora algal de ríos templados en la zona occidental de la cuenca del Valle de México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*, 74:143p.

Reynolds C.S., 1996. Algae. En: Geoffrey P. & P. Calow (eds.) *River Biota: Diversity and Dynamics*. Blackwell Science. 257 p.

Rimet F. (2012). Diatoms: an ecoregional indicator of nutrients, organic matter and micropollutants pollution. Tesis doctoral. Universidad de Grenoble.

Sabater S., 2000. Diatom communities as indicators of environmental stress in the Guadiamar River, S-W. Spain, following a major mine tailings spill. *Journal of Applied Phycology* 12: 113-124.

Sanz Rubio, E., Hoyos, M., Cañaveras, J. C., Sánchez Moral, S., Calvo, J. P. (1996).

Caracterización sedimentológica de los sistemas fluviolacustres y tobáceos del Mioceno Superior-Plioceno de la Cuenca de Calatayud (Zaragoza).

Segura-García, V., Israde-Alcántara, I., Maidana, N. I. (2010). The genus *Navicula* sensu stricto in the upper Lerma Basin, Mexico. I. *SDiatom research*, 25(2), 367-383.

Segura-García, V., Cantoral-Uriza, E. A., Israde, I., Maidana, N. (2012). Diatomeas epilíticas como indicadores de la calidad del agua en la cuenca alta del río Lerma, México. *Hidrobiológica*, 22(1), 16-27.

Segura-García, V., Almanza Álvarez, J.S., Ponce-Saavedra, J. 2016. Diversidad en comunidades de diatomeas epilíticas con relación a los parámetros fisicoquímicos en la cabecera del río Zinapécuaro, México. *Hidrobiológica*, 26(2), 187-202.

Siqueiros-Beltrones, D. A., Argumedo-Hernández, U., Hernández-Almeida, O.U. 2013. Diagnósis prospectiva sobre la diversidad de diatomeas epilíticas en la laguna Bacalar, Quintana Roo, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84(3), 865-875.

Smol J., Cumming, B (2000) Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments. *Journal of Phycology* 36: 986-1011.

Solninen J, Paavola R, Muotka T (2004) Benthic diatom communities in boreal streams: community structure in relation to environmental and spatial gradients. *Ecography* 27:330–342.

Tavera R., Elster J. y Marvan P. 1994. Diatoms from Papaloapan basin communities, Mexico. *Algological Studies* 74:35–65.

Tavera, R., Novelo, E., Orozco, C. 2018. Las diatomeas del Parque Ecológico de Xochimilco, México ¿ Qué tan importante es la flora de un grupo de un pequeño lugar? The diatoms from the Ecological Park of Xochimilco, Mexico. What is the importance of a one-group flora from a small place? *Cymbella: Revista de investigación y difusión sobre algas*, (1).

Vázquez, G., Aké-Castillo, J.A., Favila, M.E., 2011. Algal assemblages and their relationship with water quality in tropical Mexican streams with different land uses. *Hydrobiologia*, 667:173p.

Velázquez Bucio, M.M. 2007. Uso de las diatomeas para la evaluación de la calidad del agua del río Turbio, afluente del río Lerma, México.

Wyatt, R., Odrzykoski, I. J. 1998. On the origins of the allopolyploid moss *Plagiomnium cuspidatum*. *Bryologist*, 263-271.