

Riqueza y distribución de las diatomeas epilíticas indicadoras de contaminación en el río Angulo afluente del río Lerma, México

Richness and distribution of epilithic diatoms as indicators of pollution in the Angulo river, a tributary of the Lerma river, Mexico

Arcaeli Gabriela Andrade-Servín¹✉; Isabel Israde-Alcántara²✉

Recibido: 23 de octubre de 2020.

Aceptado: 10 de diciembre de 2020.

Publicado: abril de 2021.

RESUMEN

Antecedentes. El río Angulo ha estado expuesto a un deterioro ambiental como consecuencia de las descargas industriales a su afluente. **Objetivo.** Determinar las especies de diatomeas indicadoras de contaminación y su distribución en el río Angulo afluente del río Lerma. **Métodos.** Se seleccionaron 12 sitios incluyendo 2 manantiales durante los periodos de estiaje y post lluvias del año 2005. Las muestras se obtuvieron raspando las rocas para separar las diatomeas adheridas. Estas se limpiaron oxidando la muestra con ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno; se elaboraron preparaciones permanentes con la resina *Naphrax*®, para su revisión con microscopía óptica. **Resultados.** Se identificaron 50 taxones pertenecientes a 20 géneros de los cuales 5 especies pertenecen a formas centrales y 45 a las pennadas. Los taxones presentes en ambos periodos fueron *Achnanthydium minutissimum*, *Amphora pediculus*, *Luticola geoppertiana*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia dissipata* var. *dissipata*, *Pleurosira laevis*, *Stausosira pinnata* y *Ulnaria ulna*. La temperatura, pH, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales en el río Angulo presentaron variaciones espaciales y con ello los registros de las especies. **Conclusiones.** A lo largo del afluente, se encontraron taxones representativos de ambientes eutrofizados y no eutrofizados como *Nitzschia palea* y *Amphora pediculus*. Este estudio aporta información relevante en cuanto a la presencia y distribución de especies de diatomeas que pueden ser utilizadas como bioindicadores de condiciones ambientales específicos.

Palabras clave: contaminación, ambientes eutrofizados, especies bioindicadoras.

ABSTRACT

Background. The Angulo River has been subject to environmental deterioration as a result of agriculture practices and industrial discharges to its tributary. **Goal.** Determine the species of diatoms that indicate contamination and their distribution in the Angulo river, a tributary of the Lerma river. **Methods.** Twelve sites including 2 springs were selected during the low-water and post-rain periods of 2005. The samples were obtained by scraping the rocks to separate the attached diatoms. These were cleaned by oxidizing the sample with hydrochloric acid and hydrogen peroxide; permanent preparations were made with *Naphrax*® resin, for review with light microscopy. **Results.** 50 taxa belonging to 20 genera were identified, of which 5 species belong to central forms and 45 to pennate species. The taxa present in both periods were *Achnanthydium minutissimum*, *Amphora pediculus*, *Luticola geoppertiana*, *Nitzschia amphibia*, *Nitzschia dissipata* var. *dissipata*, *Pleurosira laevis*, *Stausosira pinnata* and *Ulnaria ulna*. The temperature, pH, dissolved oxygen and total dissolved solids in the Angulo river presented spatial variations and with it the species records. **Conclusions.** Representative taxa of eutrophic and non-eutrophic environments were found throughout the tributary, such as *Nitzschia palea* and *Amphora pediculus*, respectively. This study has provided relevant information regarding the presence and distribution of diatom species that can be used as bioindicators of environmental conditions. specific.

Key words: pollution, eutrophic environments, bioindicator species.

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica s/n a Col. Felicitas del río, Morelia, Michoacán, 58040. México

² Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. Francisco J. Múgica s/n Col. Felicitas del río, Morelia, Michoacán, 58040. México

***Corresponding author:**

Isabel Israde-Alcántara: e-mail: isabel.israde@umich.mx

To quote as:

Andrade-Servín, A. G. & I. Israde-Alcántara. 2021. Riqueza y distribución de las diatomeas epilíticas indicadoras de contaminación en el río Angulo afluente del río Lerma, México. *Hidrobiológica* 31 (1): 43-52.

DOI: 10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/Andrade

INTRODUCCIÓN

En la cuenca del medio río Lerma se ubica la subcuenca del río Ángulo que recorre un área sujeta a múltiples presiones antrópicas, entre las cuales destacan la contaminación por vertidos domésticos agrícolas e industriales, el abatimiento de los mantos acuíferos, la desecación y canalización de cauces y manantiales. A pesar de estas presiones ambientales, algunos grupos taxonómicos nativos como la ictiofauna aún están bien representados (Medina *et al.*, 2005; Zubieta *et al.*, 2005).

En los ríos se llevan a cabo una gran cantidad de procesos y relaciones ecológicas entre distintos grupos taxonómicos y las propiedades físicas y químicas de este. Entre dichas relaciones destacan las representadas por las comunidades algales, las cuales son consideradas como indicadores del estado ecológico de los diferentes cuerpos de agua, y que pueden verse afectadas o beneficiadas por variaciones estacionales o las interacciones entre las variables geomorfológicas, hídricas y bióticas mismas que determinarían en gran medida la estructura comunitaria algal *i.e.* composición de especies, variación temporal, etc. (Martínez & Donato, 2003; Díaz & Rivera, 2004).

Uno de los bioindicadores ecológicos más utilizados por su abundancia y diversidad son los que están representados por las algas microscópicas del grupo Bacillariophyceae conocidas comúnmente como diatomeas, las cuales son universalmente reconocidas como uno de los componentes biológicos de los sistemas lóticos más adecuados para el monitoreo de la calidad del agua, en términos de la contaminación orgánica y eutrofización (Barber & Haworth, 1981; Sabater *et al.*, 1991).

En México existe una gran abundancia de sistema lóticos, destacando la cuenca del río Lerma-Chapala, considerado uno de los ríos más extensos y contaminados del país debido a la intensa actividad industrial desarrollada a lo largo de sus márgenes. Cabe mencionar que se han realizado algunos estudios en la parte oeste y alta de la cuenca para conocer la calidad del agua, utilizando como base a las comunidades de diatomeas epilíticas y su relación con el ambiente (Abarca, 2010; Segura *et al.*, 2012). En ambas investigaciones se concluye que se observan variaciones ambientales de ambientes mesotróficos-eutróficos en periodo de lluvias a hipereutróficos en el periodo de estiaje, además de especies no identificadas a nivel taxonómico con potencial para ser referidas como indicadoras de calidad del agua.

Con el objeto de conocer si en la cuenca las condiciones del río Angulo son semejantes a las del río Lerma y aportar información específica sobre la distribución de especies bioindicadoras, en este estudio se determinaron las especies de diatomeas epilíticas asociadas a contaminación del río Angulo afluente del río Lerma en la época de estiaje y post lluvias. Así mismo, se contribuye con el inventario diatomológico de la Cuenca del Lerma.

MATERIALES Y MÉTODOS

El río Angulo tiene una superficie de 2,079 km² y fluye de sur a norte, con un recorrido total de 64km, que inicia en la laguna de Zacapu y desemboca en el río Lerma. Administrativamente, pertenece a la región del medio Lerma de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago (20°13'12" N - 102°36'0" W y 19°36'36" N - 101°18'36" W) (Fig. 1). Su cauce

presenta canalizaciones con fines agrícolas desde la cabecera hasta la boca (Medina, 1997).

Se seleccionaron doce sitios de muestreo: manantial Zarcita (1,990 msnm), río Zacapu (1,980 msnm), río Tarejero (1,975 msnm), río Estación 3 (1,966 msnm), río Lienzo Charro (1,925 msnm), río El Ranchito (1,860 msnm), río Panindicuaro (1,820 msnm), río El Salto (1,755 msnm), río Presa El Rosario (1,740 msnm), manantial El Rosario (1,720 msnm), río San Francisco Angamacutiro (1,683 msnm) y río Santiago Conguripo (1,675 msnm). En cada sitio se realizó un muestreo en temporada de estiaje (junio) y post lluvias (diciembre) en el año 2005.

En cada uno de los sitios mencionados se midieron parámetros fisicoquímicos que incluyen la temperatura, la conductividad específica (K25) y el pH, con un potenciómetro conductivo (PC-18). Los sólidos disueltos fueron registrados utilizando un medidor multiparamétrico HORIBA y la concentración de oxígeno disuelto, con un medidor portátil YSI (51-B), ambos instrumentos previamente calibrados. En cuanto al análisis de las diatomeas, las muestras se obtuvieron a parir de un raspado superficial de los sustratos rocosos (siguiendo el criterio de Rumeau & Coste; 1988; Kelly *et al.*, 1998). Por cada sitio de muestreo se rasparon dos a tres rocas que presentaran cubiertas algales, a través del cepillado con un cepillo dental de cerdas medianas por cada sitio, cubriendo un área aproximada de 10 cm². Las muestras se almacenaron en frascos de plástico herméticos debidamente etiquetados con fecha y lugar de muestreo. 50 mililitros y se fijaron *in situ* con 10 mililitros de formaldehído diluido al 4 %. Para eliminar la materia orgánica al interior y exterior de las diatomeas, las muestras se oxidaron con peróxido de hidrógeno (40%) para eliminar la materia orgánica y con ácido clorhídrico (37%) para disolver el carbonato de calcio presente en cada muestra. Posteriormente, se realizaron tres lavados de las muestras para neutralizarlas y se montaron por triplicado de cada sitio de muestreo laminillas permanentes con Naphrax (IR = 1.74). Las observaciones se realizaron con un microscopio óptico (MO) Olympus Bimax 50, y se obtuvieron imágenes mediante una cámara digital de torre integrada Olympus DP12. Algunos taxones fueron observados con un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM 6400). Finalmente, la determinación taxonómica fue realizada según los criterios de Krammer & Lange-Bertalot (1997a, b), Lange-Bertalot (2000, 2001), Krammer & Lange-Bertalot (2004a, b). Para obtener la abundancia relativa de los taxones se realizó un conteo promedio de 400 valvas por una laminilla en cada sitio de muestreo (Kelly *et al.*, 1998). En cuanto al análisis para determinar las relaciones entre las especies y los parámetros físico-químicos del agua, se aplicó un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) con el software MVSP (Multi-Variate Statistical Package) versión 3.0, por medio del cual se relacionó la abundancia de especies con las variables ambientales medidas (Ter Braak, 1990) y la prueba de Monte Carlo para conocer la probabilidad entre la relación entre la abundancia de los taxones y las variables ambientales.

Para la generación y manejo de la información espacial se utilizó el sistema ILWIS (Integrated Land and Water Information System) versión 3.1. Así mismo se obtuvo la digitalización de la cuenca del río Angulo y se observaron a detalle los rasgos geomorfológicos de las diferentes localidades.

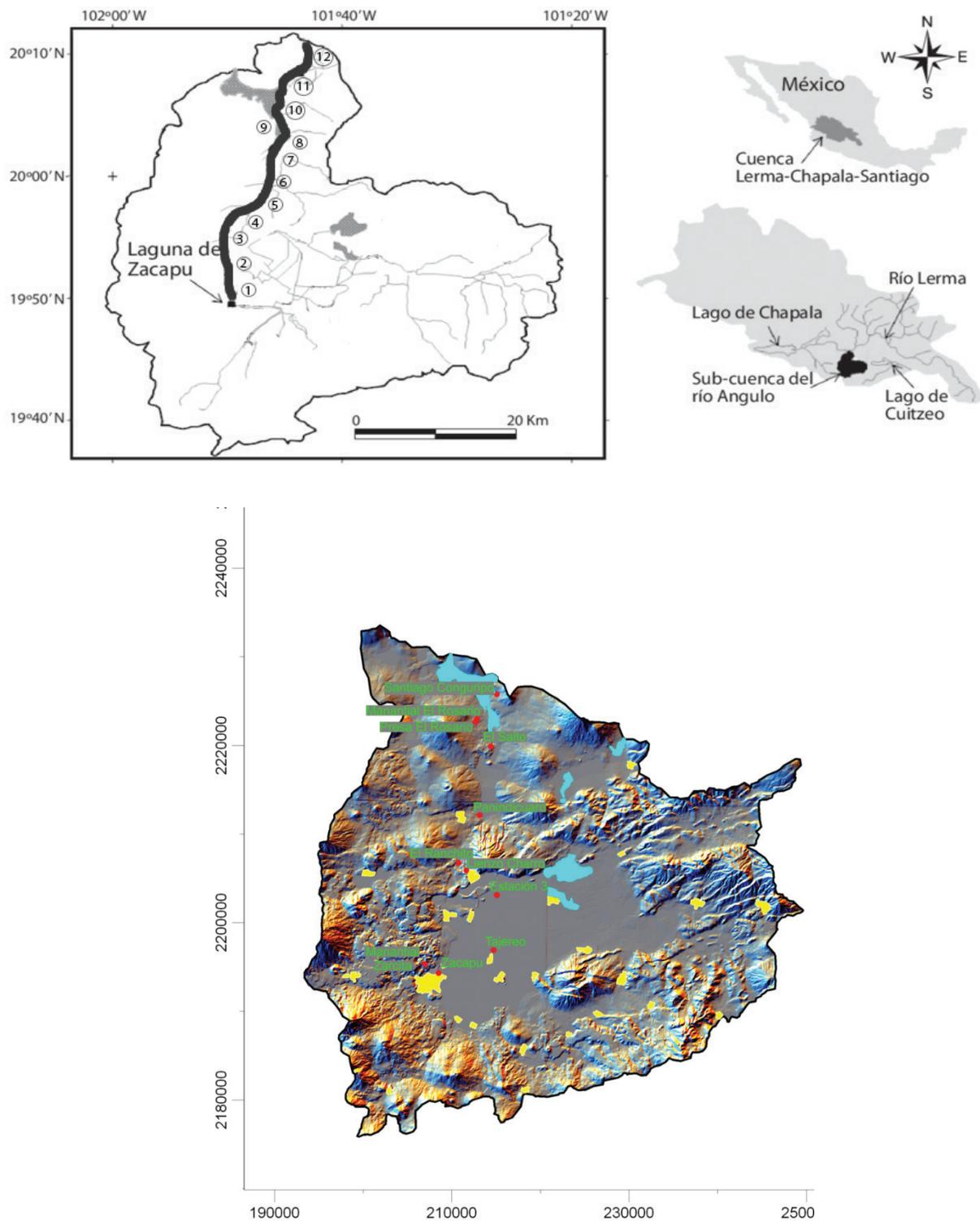


Figura 1. a. Localización de los sitios de estudio en la subcuenca del río Angulo, afluente del Lerma, México. **b.** Morfología de la cuenca y sitios de muestreo 1) Manantial Zarcita; 2) Zacapu; 3) Tarejero; 4) Estación 3; 5) Lienzo Charro; 6) El Ranchito; 7) Panindicuaro; 8) El Salto; 9) Presa El Rosario; 10) Manantial El Rosario; 11) San Francisco Angamacutiro; 12) Santiago Conguripo.

RESULTADOS

Análisis fisicoquímicos

En la tabla 1 se presentan los valores de las variables fisicoquímicas por sitio y época de muestreo. Los intervalos de temperaturas del río Angulo van de 15 a 19.6 °C en la época de estiaje, y entre 17-22 °C en post lluvias definiéndolo como un cuerpo de agua templado. El pH va de 6.2 a 8.0 en época de estiaje y de 7.2 a 8.8 en época de post lluvias, mientras que los valores de conductividad fluctuaron entre 0.4 a 1.2 y 137 a 566 $\mu\text{S cm}^{-1}$ entre época de estiaje y post lluvias. Por otra parte, las variaciones en la concentración de oxígeno disuelto (OD mg L^{-1}) y de sólidos disueltos totales (SDT) son representativos de condiciones hipóxicas (1.4 mg L^{-1} y 0.3 SDT%) en la época de estiaje, en cambio, en post lluvias representan condiciones de eutrofización, con aguas altamente oxigenadas (11.7 mg L^{-1} y 295 SDT%) debido principalmente a las variaciones geomorfológicas del río, mismas que favorecen el aumento de la velocidad de la corriente y por lo tanto de la oxigenación.

Riqueza y variación temporal de diatomeas

Se identificaron 50 especies de diatomeas epilíticas, incluidas en 20 géneros de los cuales 5 especies son formas centrales y 45 especies son formas pennadas. En la tabla 2 se muestran las especies de mayor abundancia espacial en la época de estiaje y post lluvias en el río Angulo.

Las especies presentes en ambas épocas fueron *Achnanthydium minutissimum*, *Ulnaria ulna*, *Nitzschia amphibia*, *Luticola goeppertiana* y *Nitzschia dissipata* var. *dissipata*. Además, se registraron taxones como *Staurosirella leptostauron*, *Amphora pediculus*, y *Pleurosira laevi*, que son característicos de variadas condiciones (Fig. 2). En la tabla 3 se muestran las características ambientales en la que se registraron los taxones más representativos del río Angulo.

Cabe mencionar que debido a la geomorfología del río Angulo, presenta una autodepuración y buena oxigenación del sistema lótico observándose a *Amphora pediculus*. Esta oxigenación es más notoria en zonas donde existen diferencias altitudinales como en la localidad de El Salto que produce aumentos de velocidad de la corriente, dando lugar a cambios en la riqueza de diatomeas.

Análisis de correspondencia canónica

El análisis del CCA se llevó a cabo en los 12 sitios de muestreo, usando 6 parámetros ambientales y 50 especies de diatomeas (>3% de abundancia relativa). Las correlaciones entre diatomeas y parámetros fisicoquímicos (conductividad, pH, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales y velocidad de la corriente) para la época de estiaje en el eje 1, 2 y 3 fueron altos, con valores de 0.54, 0.86 y 0.95 respectivamente, indicando una estrecha relación entre las especies de diatomeas y los parámetros fisicoquímicos. Para la época de post lluvias se obtuvieron valores altos, en el eje 1 se obtuvo 0.63, para el eje 2 un valor de 0.86 y en el eje 3 un valor de 0.93. La prueba de Monte Carlo mostró relaciones altamente significativas entre las especies y las variables elegidas ($p = 0.002$).

En la figura 3a se observan las especies *L. goeppertiana* y *N. dissipata* var. *dissipata* que están relacionadas con altos valores de velocidad de la corriente y abundante oxigenación. Para el caso de *U. ulna* ubicada en el primer cuadrante, *A. pediculus* en el segundo cuadrante, *N. amphibia* en el tercer cuadrante y *S. medius* en el cuarto cuadrante, se registró que interactúan con valores bajos en conductividad, temperatura, pH y sólidos totales disueltos en la época de estiaje.

En la figura 3b se observa que las especies *S. leptostauron*, *U. ulna* y *L. goeppertiana* se asocian a valores altos de velocidad de la corriente, mientras que *N. amphibia* y *A. veneta* se caracterizan por presentarse en zonas con valores bajos de oxígeno disuelto y *P. laevi* en zonas

Tabla 1. Variables fisicoquímicas medidas en los sitios de estudio durante la época de estiaje y post lluvias en el año 2005.

Sitios	Temperatura (°C)		Conductividad (μScm^{-1})		pH		Oxígeno disuelto (mgL^{-1})		Sólidos disueltos totales (mgL^{-1})	
	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
1. Manantial Zarcita	17.5	17.0	0.4	154.0	7.0	7.3	7.2	7.0	0.3	86.0
2. Zacapu	18.0	21.0	1.2	440.0	8.0	7.3	6.6	7.8	1.2	228.0
3. Tarejero	19.5	21.0	0.5	243.0	6.7	7.4	2.7	1.6	0.4	122.7
4. Estación 3	19.6	20.0	0.7	217.0	6.8	7.4	2.5	2.5	0.5	115.0
5. Lienzo Charro	19.3	21.0	0.7	237.0	6.9	7.2	2.1	1.4	0.5	129.9
6. El Ranchito	17.7	21.0	0.5	237.0	7.0	7.6	8.6	8.7	0.4	126.6
7. Panindicuaro	17.3	20.0	0.6	234.0	6.9	7.4	4.2	4.2	0.4	125.7
8. El Salto	16.9	18.0	0.6	249.0	7.0	7.6	8.7	8.3	0.5	137.0
9. Presa El Rosario	19.0	20.0	0.6	137.2	7.6	8.8	10.7	9.2	0.4	137.2
10. Manantial El Rosario	19.2	22.0	0.6	566.0	7.4	6.8	11.7	1.5	0.4	298.0
11. San Francisco Angamacutiro	15.0	17.0	0.8	351.0	6.2	7.2	7.2	5.5	0.6	199.2
12. Santiago Conguripo	15.7	19.0	1.0	436.0	6.3	8.0	4.1	5.8	0.7	234.0

Nota: E, época de estiaje; P, época de post lluvias.

con valores bajos de pH, temperatura, conductividad y sólidos totales disueltos para la época de post lluvias.

DISCUSION

Los resultados presentan marcadas variaciones en cuanto a la distribución y abundancia de algunos taxones para las épocas de estiaje y post lluvias. Para la época de estiaje, se registró a *Achnanthisidium minutissimum* como especie dominante en el Manantial Zarcita. Este taxón es considerado como un buen indicador de altas concentraciones de oxígeno en aguas alcalinas e indiferente a las concentraciones de calcio y hierro (Alarcón & Peláez, 2014). Otro taxón indiferente al calcio, pero que no es buen indicador ecológico, independientemente que se considera una especie tolerante a altas concentraciones de materia orgánica, es *Ulnaria ulna*, la cual se registró en Zacapu y Manantial El Rosario. En Tarejero, se registró a *Staurosirella leptostauron*, una especie indicadora de altos intervalos de contaminación relacionados con la concentración de nutrientes. *Stephanodiscus medius* predominó en la estación 3, dicho taxón es un componente común en los depósitos

Pleistocénicos del antiguo Lago de Zacapu (Israde *et al.*, 2010). Al no observarse organismos vivos de dicha especie, se infiere que ha sido transportada dentro del río proveniente de los depósitos antes mencionados.

Un taxón resistente a altos grados de contaminación orgánica es *Luticola goeppertiana*, la cual se encontró como especie dominante en los sitios de Lienzo Charro y el Salto. En Panindicuaro, dominó *Pleurosira laevis*, taxón que ha sido considerado como tolerante y resistente a la contaminación y a la alta concentración de nutrientes (Calizaya-Anco *et al.*, 2013). Para San Francisco Angamacutiro, la presencia de *Aulacoseira granulata* var. *granulata* resultó sobresaliente, ya que dicho taxón es considerado como planctónico, tolerante a la contaminación y que se ha sido registrado en ambientes de alta turbidez, con altos intervalos de materia orgánica (Licursi & Gómez, 2003). Una especie que soporta ambientes ricos en nutrientes, tolerante a la contaminación de materia orgánica y que prefiere las aguas de media a alta conductividad, es *Nitzschia dissipata* var. *dissipata* que se registró en los sitios del Ranchito y Santiago Conguripo (Almanza *et al.*, 2016).

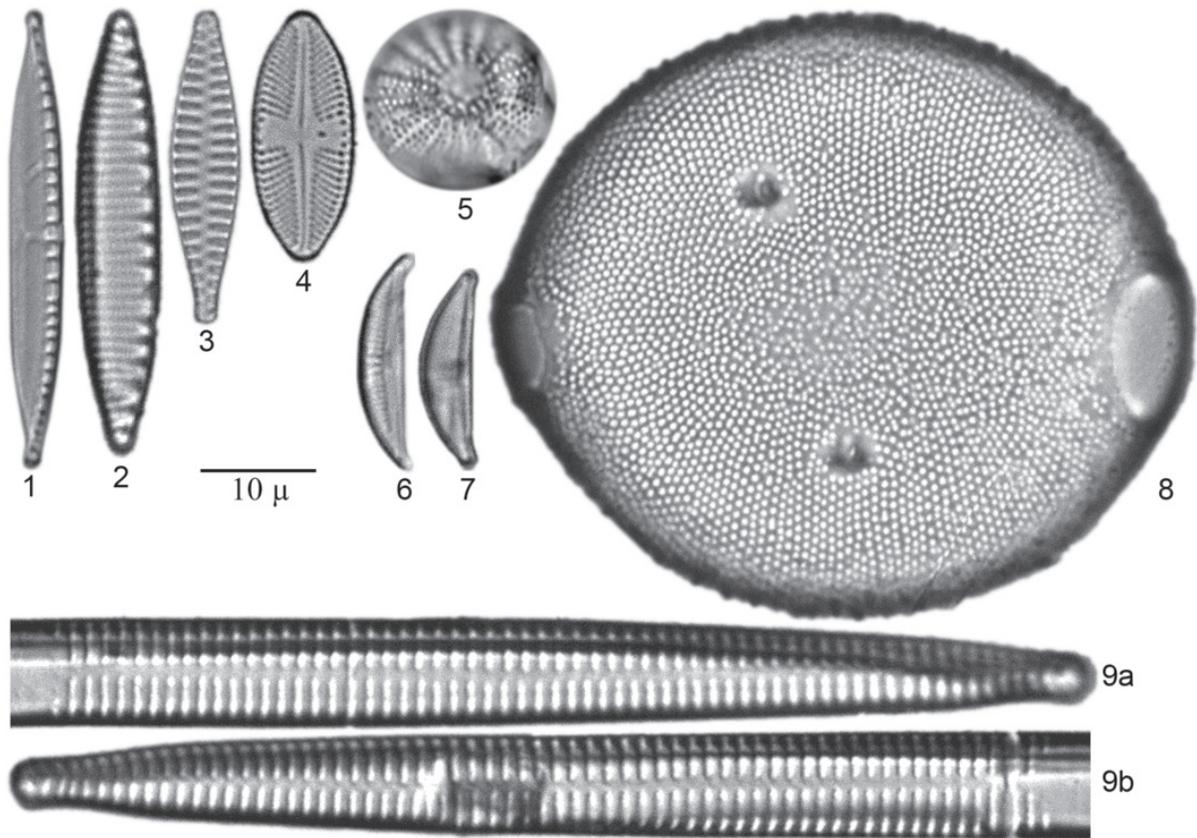


Figura 2. Muestra iconográfica de algunas especies representativas en el río Angulo. 1. *Nitzschia dissipata* (Kützing); 2. *Nitzschia amphibia* (Grunow); 3. *Staurosirella leptostauron* (Ehrenberg); 4. *Luticola goeppertiana* (Hustedt); 5. *Stephanodiscus medius*; 6. *Amphora veneta* (Kützing) Levkov; 7. *Amphora pediculus* (Kützing) Grunow; 8. *Pleurosira laevis* (Ehrenberg); 9a. *Ulnaria ulna*.

Tabla 2. Especies de diatomeas epilíticas presentes en estiaje y post lluvias del río Angulo.

Localidad	Estiaje	Post lluvias
Manantial Zarcita	<i>Amphora pediculus</i> , <i>Achnanthes minutissima</i> , <i>Nitzschia dissipata</i> var. <i>dissipata</i> y <i>Nitzschia palea</i>	<i>N. dissipata</i> var. <i>dissipata</i> , <i>A. minutissima</i> y <i>Staurosirella leptostauron</i>
Zacapu	<i>Ulnaria ulna</i> , <i>Nitzschia amphibia</i> y <i>Navicula cryptotenella</i>	<i>N. amphibia</i> , <i>S. leptostauron</i> y <i>Navicula cryptotenella</i>
Tarejero	<i>S. leptostauron</i> , <i>U. ulna</i> y <i>Cyclostephanos invisitatus</i>	<i>L. mutica</i> , <i>A. exigua</i> y <i>U. ulna</i>
Estación 3	<i>Stephanodiscus medius</i> , <i>U. ulna</i> y <i>S. leptostauron</i>	<i>Luticula goeppertiana</i> y <i>S. leptostauron</i>
Lienzo Charro	<i>U. ulna</i> , <i>L. goeppertiana</i> y <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>granulata</i>	<i>A. exigua</i> , <i>S. leptostauron</i> y <i>N. amphibia</i>
El Ranchito	<i>N. dissipata</i> var. <i>dissipata</i> , <i>N. amphibia</i> y <i>Pleurosira laevis</i>	<i>L. goeppertiana</i> , <i>S. leptostauron</i> y <i>A. granulata</i> var. <i>granulata</i>
Panindicuaro	<i>U. ulna</i> , <i>P. laevis</i> y <i>S. leptostauron</i>	<i>U. ulna</i> , <i>S. leptostauron</i> y <i>N. amphibia</i>
El Salto	<i>L. goeppertiana</i> , <i>L. mutica</i> y <i>Cyclotella meneghiniana</i>	<i>P. laevis</i> , <i>N. dissipata</i> var. <i>dissipata</i> y <i>N. amphibia</i>
Presa el Rosario	<i>S. medius</i> , <i>C. invisitatus</i> y <i>U. ulna</i>	<i>N. amphibia</i> , <i>N. palea</i> , <i>Fragilaria gouldii</i> y <i>G. parvulum</i>
manantial el Rosario	<i>C. invisitatus</i> , <i>C. meneghiniana</i> , y <i>N. palea</i>	<i>A. veneta</i> , <i>N. cryptotenella</i> y <i>N. palea</i>
San Francisco Angamacutiro	<i>Amphora veneta</i> , <i>A. granulata</i> var. <i>granulata</i> , <i>C. invisitatus</i> y <i>S. medius</i>	<i>N. palea</i> , <i>U. ulna</i> , <i>N. dissipata</i> var. <i>dissipata</i> y <i>N. amphibia</i>
Santiago Conguripo	<i>N. palea</i> , <i>N. dissipata</i> var. <i>dissipata</i> y <i>Gomphonema parvulum</i>	<i>Sellaphora pupula</i> , <i>Bacillaria paradoxa</i> y <i>N. palea</i>

Para la época de post lluvias dominó *Staurosirella leptostauron* en manantial Zarcita, Estación 3 y El Ranchito, siendo considerada como una especie tolerante a las altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes. *Ulnaria ulna*, un taxon tolerante a la presencia de contaminación orgánica moderada y baja velocidad de corriente (Martínez *et al.*, 2003), se ubicó en Zacapu, Lienzo Charro y Panindicuaro, sitios asociados a niveles altos de DBO y caracterizados por baja perturbación ambiental. En el Salto se registró a *Pleurosira laevis*, una especie cosmopolita característica en sitios con altos niveles de contaminación (Calizaya-Anco *et al.*, 2013); en este sitio específico se observa un alta turbidez y alto DQO. Para Tarejero dominó *Achnanthes exigua*, taxón característico por soportar altos intervalos de contaminación; en el punto de muestreo se detectó que esta especie se asocia a los más bajos niveles de oxígeno disuelto y de DQO. Para Manantial El Rosario se registró a *Amphora veneta*, taxón que se caracteriza por ser muy tolerante a la contaminación (Daruich *et al.*, 2017) y se localizó en un sitio de alta turbidez y niveles altos de oxígeno disuelto. En San Francisco Angamacutiro dominó *Nitzschia palea* considerada como una especie indicadora de eutroficación que, en efecto, se encuentra en esta localidad asociado a altos niveles de fósforo, con una DQO alta y con bajos niveles de oxígeno disuelto. Esta especie se ha encontrado también en ríos con altas concentraciones de nitratos y fosfatos cerca de tierras agrícolas en la cuenca del río Lerma (Abarca, 2010; Segura *et al.*, 2012). En Presa El Rosario y Santiago Conguripo, dominó *Nitzschia amphibia*, un taxón muy tolerante a los altos intervalos de materia orgánica (Alarcón & Peláez, 2014).

Además, *Nitzschia amphibia*, *N. dissipata* var. *dissipata* y *N. palea* son especies tolerantes a ambientes eutróficos, condiciones que se han observado en varios cuerpos lénticos llamados “bordos” en el estado

de Guanajuato cerca del río Lerma (Cantoral & Mora, 2012). *Aulacoseira granulata* var. *angustissimase* presentó en la parte más ancha y profunda del sitio Angamacutiro en un ambiente de alta turbidez; se ha observado que es un taxón muy común en ambientes planctónicos de lagos y presas y cuerpos de agua profundos (Istrate *et al.*, 2002).

Mora *et al.* (2015) encontraron como especie dominante a *Nitzschia amphibia* en los ríos Laja y Querétaro, considerados como referentes para condiciones altamente perturbadas, donde existe una baja diversidad de especies y dominio de especies que prefieren concentraciones altas de materia orgánica.

Nitzschia dissipata var. *dissipata*, *L. goeppertiana*, *S. leptostauron*, y *U. ulna*, son taxones registrados como tolerantes a desechos industriales que están presentes y han sido registrados en ríos altamente contaminados (Germain, 1981; Cox, 1996; Cantoral, 1997; Krammer & Lange-Bertalot, 1997b; Novelo, 1998; Lange-Bertalot, 2001; Dere *et al.*, 2006; Ndiritu *et al.*, 2006; Novelo *et al.*, 2007). A pesar de que no hay grandes industrias textiles en la región (*e.g.*, Celanese, establecida en Zacapu desde 1948), los dos primeros taxones se observaron en ambientes con una tendencia a bajas temperaturas, mayores niveles de OD comparado con las demás localidades.

Por último, *A. minutissimum* es un taxón sensible a la contaminación, y se asocia a hábitats sombreados (Ndiritu *et al.*, 2006; Sczepocka & Szulc, 2006), además de que es indicadora de altas concentraciones de oxigenación (Krammer & Lange-Bertalot, 2004b; Segura *et al.*, 2012); en este estudio se ubicó en el manantial Zarcita, Tarejero, Est. 3 y El Ranchito, donde las condiciones ambientales son sitios con abundante vegetación, baja turbidez, sin embargo muy cercanos a actividades antrópicas (asentamientos humanos y zonas de cultivos).

Tabla 3. Características ambientales asociadas a las especies más representativas registradas en las épocas de estiaje y post lluvias en el año 2005.

Taxón	Características ambientales	Presencia	Autor
<i>Achnanthes exigua</i> (Grunow)	Es una especie considerada como cosmopolita, registra un pH alcalifilo, se asocia a temperaturas de tipo eurihalobia.	P	Krammer & Lange-Bertalot (1991)
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (Kützing) Czarniecki	Es un taxón planctónico, epilítico, metafítico, perifítico. Registra un pH alcalifilo, mesotrófico, se encuentra en ambientes oligohalobios, mesosaprobios, es una especie, con temperaturas de tipo euritermal, mesotermal, es un taxóneutópico, aguas bastante mineralizadas buen indicador de altas concentraciones de oxígeno en aguas alcalinas, indiferente al calcio y hierro.	E	Cantoral (1997); Novelo <i>et al.</i> (2007)
<i>Amphora pediculus</i> (Kützing)	Es un taxón perifítico, epifíticos, eutrófica, oligohalobia, eurihalobia, polisaprobia, mesosaprobia, reófila. Representa un pH alcalifilo, alcalibióntico, en cuanto a la temperatura se considera mesotermal, se le ubica en aguas con alta conductividad.	E	Cantoral (1997)
<i>Amphora veneta</i> (Kützing) Levkov	Es una especie considerada como cosmopolita, muy común en ambientes perifíticas, metafíticas y epilíticas. Se asocia con un pH alcalifilo, y una temperatura eurihalobia.	P	Novelo <i>et al.</i> (2007); Levkov (2009); Segura (2011)
<i>Aulacoseira granulata var. angustissima</i> (O. Müller)	Esta variedad planctónica, metafítica, perifítica, tolera aguas con un alto porcentaje de turbidez. Sus condiciones óptimas de vida son las aguas con una conductividad media (500-1200 μScm^{-1}) y un pH alrededor de 8 a 8.5, con una alcalinidad de 7 a 10 meq.l-1 y en aguas ricas en sodio.	E	Novelo <i>et al.</i> (2007)
<i>Cyclostephanos invisitatus</i>	Representa un pH alcalifilo-alcalibióntico; se ubica en ambientes eutrófico, oligotrófico; mesohalobio, oligohalobio, halofilo, polisaprobio, α -mesosaprobico; es un taxón planctónico, béntico, epifito y metafítico común en ríos, lagos, pozos, manantiales, por su temperatura es eurihalino, soporta aguas semiduras, indiferente al calcio. Se asocia con una conductividad de 400-20,000 $\mu\text{s/cm}$.	E	Lowe (1974)
<i>Luticola goeppertiana</i> (Bleisch)	Es un taxón eutrófilo, oligohalobio, polisaprobio, α -mesosaprobio. Registra un pH alcalifilo, se le encuentra muy comunmente en sitios con baja conductividad.	E	Cantoral (1997)
<i>Nitzschia amphibia</i> (Grunow)	Esta especie es cosmopolita como forma epilítica, perifítica y metafítica, planctónica, con distintas tolerancias a condiciones de temperatura. Registra un pH de alcalifilo a alcalibiontico, en ambientes eutróficos, hipertróficos, oligohalobias, α -mesosaprobio. Es común su ubicación con alta conductividad.	P	Cantoral (1997); Novelo <i>et al.</i> (2007)
<i>Nitzschia dissipatavar. dissipata</i> (Kützing)	Es un taxaperifítico, presenta un pH alcalifilo, alcalibióntico, por su forma de vida, epifito, epilítico, béntico eutrófico, mesotrófico, oligohalobio, β -mesosaprobio, reofilo, se asocia a las aguas de media a alta conductividad.	E	Cantoral (1997)
<i>Nitzschia palea</i> (Kützing)	Es una especie epipélica, epilítica, planctónica, Perifítica, se encuentra en aguas alcalinas, con un amplio rango de conductividad, se le ha observado en lugares ricos en oxígeno, su pH óptimo es de 8.4, es una especie indicadora de eutroficación.	P	Cantoral (1997); Novelo <i>et al.</i> (2007)
<i>Pleurosira laevis</i> (Ehrenberg)	Es una especie epifita, perifítica, epilítica, se asocia a temperaturas entre 25-25.5°C; con un pH alcalifilo, alcalibiontico, mesohalobio, oligohalobio, mesosaprobio, oligosaprobio, con una conductividad 400-20,000 $\mu\text{s/cm}$.	E/P	Lowe (1974)
<i>Staurosirella leptostauron</i> (Ehrenberg)	Es una especie cosmopolita, aparece en aguas moderadamente distróficas hasta en pantanos ácidos. Principalmente se le ha observado en aguas continentales oligosaprobias, con un contenido mineral de mediano a alto, aunque se llega a mantener por debajo de los 100 $\mu\text{S/cm}$ y se llega a presentar hasta en un pH de 9.3.	E/P	Krammer & Lange-Bertalot (1991)
<i>Stephanodiscus medius</i> (Håkansson)	Registra un pH alcalibióntico, por su forma de vida es una especie ticoplanctónica, perifítica, se asocia a una temperatura mesotérmica, y se encuentra en ambientes oligohalobios.	E	Novelo <i>et al.</i> (2007); Krammer & Lange-Bertalot (1991)
<i>Ulnaria ulna</i> Compère	Es una especie de amplia distribución, es epifítica, perifítica, epilítica. Se registra en manantiales con una velocidad de corriente de media a baja, con una temperatura de 20 a 27°C, un pH de 7 a 8, y con una conductividad de 300 a 1500 $\mu\text{s/cm}$. Es indiferente al calcio y no es un buen indicador ecológico.	E/P	Cantoral (1997)

Nota: E, época de estiaje; P, época de post lluvias.

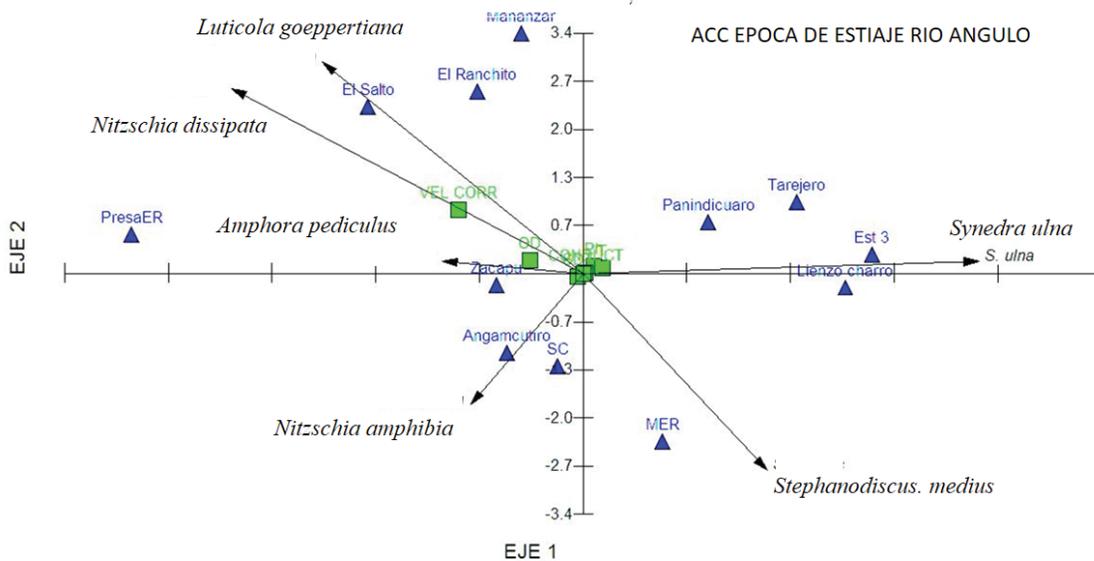


Figura 3a. Análisis de Correspondencia Canónica de los taxa y variables ambientales correspondiente a la época de secas del río Angulo.

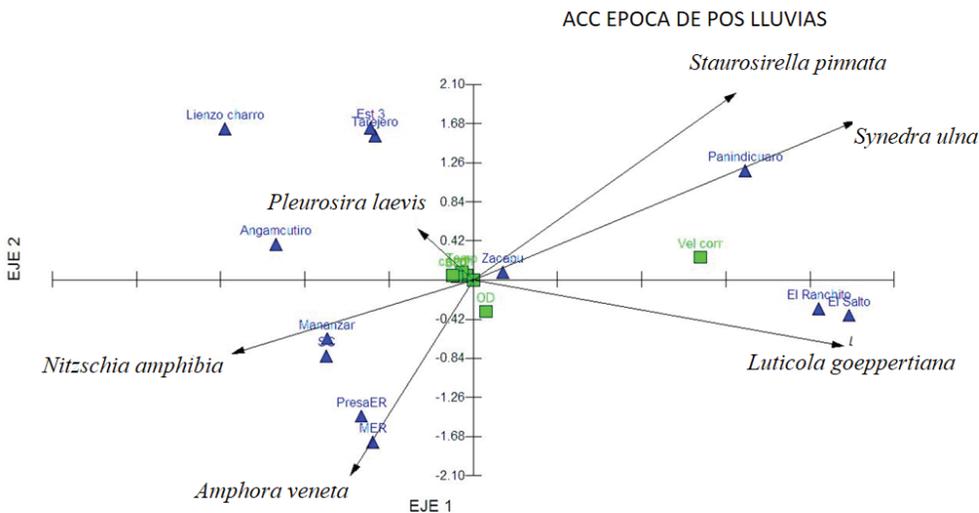


Figura 3b. Análisis de Correspondencia Canónica de los taxa y variables ambientales correspondiente a la época de post lluvias.

CONCLUSIONES

A lo largo del río Angulo se registró que las diatomeas se distribuyen de acuerdo con la gradiente altitudinal, espacial y de impactos originados por actividades antrópicas. La morfología del cauce del río, con sus saltos permiten la autodepuración y el aumento del oxígeno disuelto, mismo que favorece la presencia de ciertas especies como *Amphora pediculus*. La existencia de zonas agrícolas a lo largo del río Angulo favorece la presencia de taxones representativos de ambientes eutro-

fizados e.g. *Nitzschia palea*. Además, el análisis de correspondencia mostró que la distribución y riqueza de las diatomeas a lo largo del afluente del río Angulo están estrechamente vinculadas a las características químicas y físicas del agua, así como a las condiciones geomorfológicas a lo largo de dicho río. La información ambiental y taxonómica de este estudio será de ayuda para futuras investigaciones, así como de carácter florístico o propuestas relacionadas con el monitoreo y conservación ambiental en el río Angulo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por los fondos otorgados por CONACYT proyecto SEP2003-C02-44693 a cargo de Isabel Israde Alcántara. A Salvador Almanza por la edición de imágenes de diatomeas al Dr Manuel Mendoza por la edición del mapa y sus comentarios. A los revisores que contribuyeron a mejorar la presentación de esta investigación.

REFERENCIAS

- ABARCA, D.N. 2010. Diatom community analysis and quality assessment of the polluted tropical Lerma River (Mexico). Tesis doctoral, Freie-Universität Berlin, Germany. 418 p.
- ALARCÓN, N. & F. PELÁEZ. 2014. Calidad del agua del río Sendamal (Celdín, Cajamarca, Perú): determinación mediante uso de diatomeas, 2012. *Rebiol* 34(2): 29-37.
- ALMANZA, J., I. ISRADE & V. SEGURA. 2016. Diatomeas perifíticas del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Hidrobiológica* 26 (2): 161-185.
- BARBER, H. & E. HAWORTH. 1981. *A guide to the morphology of the diatom frustule with a key to the British freshwater genera*. Wareham, Dorset. Freshwater Biological Association. N.44. Estados Unidos de América. 112 p.
- CALIZAYA-ANCO, J., M. AVENDAÑO-CÁCERES & I. DELGADO-VARGAS. 2013. Evaluation of the quality of river water with diatoms (Bacillariophyceae): an experience in Tacna, Peru. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública* 30(1): 58-63. DOI:10.1590/s1726-46342013000100012
- CANTORAL, E. 1997. Diatomeas (Bacillariophyceae) de ambientes lóticos en la cuenca baja de la Huasteca Potosina. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX, México. 201 p.
- CANTORAL, E. & L. MORA. 2012. Diatomeas en bordos de la subcuenca San Miguel Allende, Guanajuato. In: Zorilla, M., M. Cecaira, O. Baez, L. Terrones & S. Zamudio (eds.). *La biodiversidad en Guanajuato: estudio de Estado sobre la Biodiversidad de Guanajuato*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONA-BIO)-Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. pp. 241-253.
- COX, E. 1996. *Identification of freshwater diatoms from live material*. Chapman & Hall, Oxford. 158 p.
- DARUICH, G. J., M. A. GIL & L. E. MORENO. 2017. Diatomeas empleadas en la evaluación de la calidad del agua en 3 cuencas de la provincia de San Luis (Argentina). *Natura Neotropicalis* 48(1/2): 19-35.
- DERE, S. N., N. DALKIRON, D. KARACAĞLU, A. ELMACI, B. DÜLGER & E. ŞENTÜRK. 2006. Relationship among epipellic diatom taxa, bacterial abundances and water quality in a highly polluted stream catchment, Bursa- Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 112:1-22. DOI:10.1007/s10661-006-0213-7
- DÍAZ, C. & C. RIVERA. 2004. Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia* 26 (2): 381-394.
- GERMAIN, H. 1981. *Flore des Diatomées, Diatomophycées, eaux douces et saumâtres du Massif Armoricaïn et des contrées voisines d'Europe occidentale*. Collection "Faunes et Flores Actuelles". Société Nouvelle des Éditions Boubée, Paris. 444 p.
- ISRADE, I., V. GARDUÑO & O. ORTEGA. 2002. Paleo ambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológica* 12(1): 61-78.
- ISRADE, I., W. MILLER, V. GARDUÑO, J. BARRON & M. RODRIGUEZ. 2010. Palaeo environmental significance of diatom and vertebrate fossils from Late Cenozoic tectonic basins in west-central México: A review. *Quaternary International* 219(1-2): 79-94. DOI:10.1016/j.quaint.2010.01.012
- KELLY, M.A., E. CAZAUBON, A. CORING, A. DELL'UOMO, L. ECTOR, B. GOLDSMITH, H. GUASCH, J. HÜRLIMANN, A. JARLMAN, B. KAWECKA, J. KWANDRANS, R. LAUGASTE, A. LINDSTROM, M. LEITAO, P. MARVAN, J. PADISÁK, E. PIPP, J. PRYGIEL, E. ROTT, S. SABATER, H. VAN DAM & J. VIZINET. 1998. Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe. *Journal of Applied Phycology* 10: 215-224. DOI:10.1023/A:1008033201227
- KRAMMER, K. & H. LANGE-BERTALOT. 1997a. *Bacillariophyceae* 2/1. Teil: *Naviculaceae*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, Germany. 876 p.
- KRAMMER, K. & H. LANGE-BERTALOT. 1997b. *Bacillariophyceae* 2/2. Teil: *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. In: H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, Germany. 437p .
- KRAMMER, K. & H. LANGE-BERTALOT. 2004a. *Bacillariophyceae*. 2/3. Teil: Centrales, *Fragilariaceae, Eunotiaceae*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, Germany. 598 p .
- KRAMMER, K. & H. LANGE-BERTALOT. 2004b. *Bacillariophyceae*. 2/4. Teil: *Achnantheae Kritische Ergänzungen zu Achnanthes* s. l., *Navicula* s. str., *Gomphonema*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, Germany. 468 p.
- LANGE-BERTALOT, H. 2000. *Iconographia Diatomologica. Annotated diatom micrographs*. Vol.9 (Koeltz). Scientific books. A. R. G. Gantner Verlag K. G. Germany. 672 p.
- LANGE-BERTALOT, H. 2001. *Diatoms of Europe. Diatoms of the European inland waters and comparable habitats. Navicula sensu stricto; 10 genera separated from Navicula sensu lato Frustulia*. Vol. 2. Gantner Verlag. K. G. Germany. 526 p.
- LICURSI, M. & N. GÓMEZ. 2003. Aplicación de índices bióticos en la evaluación de la calidad del agua en sistemas lóticos de la Llanura Pampeana Argentina a partir del empleo de diatomeas. *Biología acuática* (21): 31-49.
- MARTÍNEZ, L. & J. DONATO. 2003. Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un río de alta montaña tropical (Boyacá, Colombia). *Caldasia* 25(2): 337-354.
- MARTÍNEZ, D. F., N. MAIDANA, N. GÓMEZ & S. SABATER. 2003. Distribution patterns of benthic diatoms in a Pampean river exposed to seasonal floods: the Cuarto River (Argentina). *Biodiversity & Conservation* 12(12): 2443-2454.

- MEDINA, M. 1997. Ictiofauna de la subcuenca del río Angulo, cuenca Lerma Chapala. Michoacán. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. *Zoología Informa* 35: 25-52.
- MEDINA, M., J. LYONS, T. ZUBIETA, E. SOLORIO, J. RAMÍREZ & R. GALVÁN. 2005. Conservation of two sites in central Mexico with a high diversity of live-bearing fishes. *In: Uribe, M. C. & H. J. Grier (eds.). Viviparous Fishes, New Life Publications*, Florida, EEUU, pp. 499-504.
- MORA, D., J. CARMONA & E. CANTORAL. 2015. Diatomeas epilíticas de la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 86(4): 1024-1040. DOI:10.1016/j.rmb.2015.09.004
- NDIRITU, G., N. GICHUKI & L. TRIEST. 2006. Distribution of epilithic diatoms in response to environmental conditions in an urban tropical stream, Central Kenya. *Biodiversity and Conservation* 15: 3267-3293.
- NOVELO, E. 1998. Floras ficológicas del Valle de Tehuacán, Puebla. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX, México. 599 p.
- NOVELO, E., R. TAVERA & C. IBARRA. 2007. *Bacillariophyceae from karstic wetlands in Mexico*. Bibliotheca Diatomologica. Vol. XX. J. Cramer. Germany. 136p.
- RUMEAU, A. & M. COSTE. 1988. Introduction into the systematics of freshwater diatoms for a useful generic diatom index. *Bulletin Francais de la Pêche et de la Pisciculture (France)* 309: 1-69.
- SABATER, S., J. ARMENGOL, E. MARTI, F. SABATER & H. GUASCH. 1991. Benthic diatom communities as descriptors of discontinuities in the River Ter, Spain. *In: Whitton, B., E. Rott & G. Friedrich. (eds.). Use of Algae for Monitoring Rivers*. Institut für Botanik, Universität Innsbruck. pp. 157-163.
- SCZEPOCKA, E. & B. SZULC. 2006. Benthic diatoms in the central section of the Pilica river and Sulejów reservoir. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology* 35(2): 171-178.
- SEGURA, V., E. CANTORAL, I. ISRADE & N. MAIDANA. 2012. Epilithic diatoms (Bacillariophyceae) as indicators of water quality in the Upper Lerma River, Mexico. *Hidrobiológica* 22 (1): 16-27.
- TER BRAAK, C. 1990. *CANOCO-a Fortn program for canonical community ordination by partial, detrended, canonical correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (versión 3.11)*. Agricultural Mathematics Group, Wageningen, The Netherlands.
- ZUBIETA, T., M. MEDINA & V. SEGURA. 2005. *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar: Laguna de Zacapu*. Informe inédito. 17p.