



**Maestría Regional Centroamericana en
Ciencias del Agua**
Con énfasis en calidad del agua

Trabajo de tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua

**Reconstrucción cualitativa de algunos cambios limnológicos
recientes (últimos 130 años) del Lago Masaya, Nicaragua.**

Autor: Lic. H. Camilo Fuentes Peña

Tutor: M.Sc. Víctor Martínez

Asesores: PhD. John P. Smol

M.Sc. Silvia Hernández

M.Sc. Luis Moreno

Managua, Diciembre del 2015

Tesis patrocinada por el CIRA/UNAN-Managua, por la University of Calgary, a través del proyecto *Manejo Comunitario del Agua en Nicaragua y Centroamérica* ACDI-CIDA (UPCD 2010-2014), así como por el Paleocological Environmental Assessment and Research Laboratory (PEARL) de la Queen's University, Kingston ON, Canadá.



**Maestría Regional Centroamericana en
Ciencias del Agua**
Con énfasis en calidad del agua

Trabajo de tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua

**Reconstrucción cualitativa de algunos cambios limnológicos
recientes (últimos 130 años) del Lago Masaya, Nicaragua.**

Autor: Lic. H. Camilo Fuentes Peña

Tutor: M.Sc. Víctor Martínez

Asesores: PhD. John P. Smol

M.Sc. Silvia Hernández

M.Sc. Luis Moreno

Managua, Diciembre del 2015

Tesis patrocinada por el CIRA/UNAN-Managua, por la University of Calgary, a través del proyecto *Manejo Comunitario del Agua en Nicaragua y Centroamérica* ACIDI-CIDA (UPCD 2010-2014), así como por el Paleoeological Environmental Assessment and Research Laboratory (PEARL) de la Queen's University, Kingston ON, Canadá.



REF.: PMRCA / PGV – 20/ 2015

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA (UNAN-Managua)
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua
(CIRA/UNAN-Managua)
Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en
Calidad del Agua.

Acta de Defensa de Tesis de Postgrado No.20

De acuerdo con lo establecido por la **Ley No. 89 (Ley de Autonomía de las Instituciones de Educación Superior)** y en el Título VII del Reglamento de Educación Continua y Estudios de Postgrado de la UNAN–Managua, la Comisión del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua, conformó al **Tribunal Examinador** para el **Acto de Defensa de Tesis de Maestría** del Lic. **Hernaldo Camilo Fuentes Peña**, estudiante del IV Ciclo de estudio (2012-2014) con Carnet **No.02326559**, con los siguientes miembros:

MSc. Ninoska Chow Wong	Presidente
MSc. Martín Antonio Lezama	Secretario
MSc. Jorge Alberto Cuadra Leal	Vocal

Con el objetivo de evaluar el acto de defensa de la tesis titulada ***“Reconstrucción Cualitativa de algunos cambios Limnológicos recientes (últimos 130 años) del Lago de Masaya, Nicaragua”***.

Siendo las 14:00 horas del día miércoles 16 de diciembre del 2015, se encuentra reunido el **Tribunal Examinador** en el aula de Maestría del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), habiendo evaluado el documento de tesis escrito y escuchado la presentación y defensa del tema, y recibidas las respuestas a las preguntas formuladas por los miembros de este tribunal presente, le

¡A la libertad por la Universidad!



otorgamos la calificación cualitativa de **APROBADO**, correspondiendo a la calificación cuantitativa de **86 (Ochenta y seis)** con lo cual se dan por concluidos los requisitos para que el **Licenciado Hernaldo Camilo Fuentes Peña** obtenga el título de Máster en Ciencias del Agua.

El Tribunal Examinador asigna las siguientes recomendaciones a ser incorporadas al documento final de tesis. Una vez realizadas estas se le concede el Título de **Máster en Ciencias del Agua**.

Leída que fue la presente acta de defensa de tesis del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua, la encontramos conforme, ratificamos y firmamos en la ciudad de Managua, República de Nicaragua, a los dieciséis días del mes de diciembre del año dos mil quince.

MSc. Ninoska Fabiola Chow Wong
Presidente

MSc. Martín Antonio Lezama
Secretario

MSc. Jorge Alberto Cuadra Leal
Vocal

MSc. Luis Beltrán Moreno Delgado
Coordinador del Programa de Maestría
Regional Centroamericana en Ciencias del Agua
CIRA/UNAN-Managua

DEDICATORIA

A la memoria de las mujeres de tres generaciones que marcaron mi vida: María Elena Peña Chávez, María Elena Chávez Rivas y Teresa de Jesús Rivas González, mi mamá, abuela y la madre de mi abuela.

Este logro es para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a nuestra institución, el CIRA/UNAN-Managua que me dio la oportunidad de cursar y culminar mis estudios, así como de financiar mi tesis. Mil gracias por el apoyo brindado tanto por la actual directora la Maestra Selvia Flores Sánchez como la subdirectora de la administración pasada, así como de las compañeras del equipo de coordinación del Programa, en especial a la MSc. Valeria Delgado Quezada.

A mi asesor principal, el Profesor John P. Smol por sus consejos y contribuciones, gracias por su paciencia y su fe en mí. A los profesores Kathy Ryan y David Bethune, de la Universidad de Calgary, quienes con fondos de ACIDI, hicieron posible la beca que me permitió estudiar. A los investigadores y profesores del PEARL Lab: Dr. Neal Michelluti, Dra. Kathleen Rühland y Chris Grooms, quienes gentilmente y de manera desinteresada realizaron la detección de clorofila *a* en sedimentos y aportaron comentarios importantes a mi trabajo. Además a mis asesores internos Víctor y Silvia.

A mis primeros impulsores: Roberto Cano Espinoza, Katherine Vammen y Manuel E. Pedroza; a los profesores Francisco Picado Pavón, Selvia Flores Sánchez, quienes cuestionaron mis ideas con sugerencias y comentarios sólidos, tal a cómo yo espero de mis críticos; a quienes apoyaron mis gestiones: Yader Caballero Arbizú, también agradezco sus ideas; a Maryuri Martínez, Juan Ariel Jirón, Franklin Morales, Reyna Palma, doña Juanita y Gloria Vargas. De igual manera, a los técnicos de las alcaldías de la subcuenca del Lago Masaya y autoridades de la Alcaldía de Masaya (Concejales Reyna y Boris), así como a especialistas del INETER (Sergio Cordonero) y ENACAL (Benedicto Valdez).

A mi núcleo familiar: Berito, Lola, papá, sepan que este logro también es de ustedes y para ustedes, al igual que para mis amigos que esperaron más de 3 años para celebrar, gracias por su paciencia. Y, finalmente, a mi colega Raquel Izabá Ruiz, gracias por tu impulso, apoyo constante y excelentes consejos.

Gracias a todos y todas por acompañarme en este proceso.

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS	xv
RESUMEN	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Área de estudio	2
I.2. Antecedentes.....	3
I.3. Planteamiento del problema.....	4
I.4. Justificación	5
I.5. Objetivos.....	6
I.5.1. Objetivo general.....	6
I.5.2. Objetivos específicos.....	6
II. MARCO DE REFERENCIA	7
II.1. Calidad de agua	7
II.1.1. Definición.....	7
II.1.2. Deterioro de la calidad del recurso agua en Nicaragua.....	7
II.1.3. Estado trófico y calidad de agua en ecosistemas lacustres.....	7
II.2. Diatomeas	8
II.2.1. Clasificación y morfología.....	8
II.2.2. Las diatomeas como proxies ambientales.....	9
II.3. Sedimentación en ecosistemas lacustres.....	9
II.3.1. Técnicas nucleares para la determinación de ²¹⁰ Pb en perfiles de sedimentos	10
II.4. Caracterización de la subcuenca del Lago Masaya	10
II.4.1. Actores locales	16
II.4.1.1. Población.....	16
II.4.1.2. Instituciones.....	16
II.4.1.3. Proyectos actuales relacionados	17
II.4.2. Uso actual del Lago.....	17

II.4.3. Causas y aporte de sedimentos	18
II.4.4. Eutrofización	18
III. METODOLOGÍA	19
III.1. Tipo de estudio	19
III.2. Universo, población, punto de muestro y muestras	19
III.3. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	21
III.3.1. Búsqueda y selección de la literatura científica	21
III.3.2. Compilación de base de datos histórica sobre características ambientales, hidrometeorológicas y uso del Lago	21
III.3.3. Análisis de laboratorio	22
III.4. Tabulación, análisis y presentación de resultados	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
IV.1. Parámetros físico-químicos históricos (registrados) del Lago	31
IV.1.1. pH.....	31
IV.1.2. Temperatura y Oxígeno Disuelto.....	32
IV.1.3. Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno	34
IV.1.4. Turbidez, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica.....	35
IV.1.5. Nitrógeno.....	36
IV.1.6. Fósforo	38
IV.1.7. Relación NT:PT	39
IV.1.8. Cationes, aniones y tipo hidroquímico.....	40
IV.1.9. Alcalinidad y dureza	45
IV.1.10. Sílice disuelta	47
IV.1.11. Resumen de las tendencias ('60s hasta la actualidad)	48
IV.2. Actividad total del ²¹⁰ Pb y Tasa de Sedimentación.....	50
IV.3. Metales pesados en sedimentos	53
IV.3.1. Concentración de metales pesados	53
IV.4. Diatomeas	57
IV.4.1. Riqueza	57
IV.4.2. Abundancia relativa y especies representativas	59
IV.4.3. Biotopos	65

IV.4.4. Tipos según variables autoecológicas.....	68
IV.4.5. Diversidad biológica	70
IV.5. Clorofila a y productividad primaria	74
IV.5.1. Concentración de clorofila a	74
IV.5.2. Modelo de representación de la clorofila a.....	75
IV.6. Eventos naturales y Actividades Humanas	77
IV.6.1. Nivel del Lago y variables asociadas	77
IV.6.2. Eventos hidrológicos extremos	80
IV.6.3. Actividades humanas	82
IV.6.3.1. Población urbana de Masaya.....	82
IV.6.3.2. Historial de uso de la subcuenca.....	83
IV.6.3.2.1. Sector Suroeste.....	84
IV.6.3.2.2. Sector Sur y Este	84
IV.6.3.3. Historial de uso del Lago y de vertido de aguas residuales	86
IV.6.3.3.1. Previo a 1879 (ZND)	86
IV.6.3.3.2. 1879-1970 (Zona 3).....	86
IV.6.3.3.3. 1910-1940 (Zona 2).....	86
IV.6.3.3.4. 1940-2012 (Zona 1).....	87
IV.7. Síntesis ecológica	88
V. CONCLUSIONES	94
VI. RECOMENDACIONES.....	97
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXOS	110
i. Anexos de la metodología	110
ii. Anexos de Resultados	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características morfológicas selectas del Lago Masaya	14
Tabla 2. Taxa de Diatomeas Identificadas.....	57
Tabla 3. Datos generales sobre el punto de extracción y parámetros medidos en el Lago	110
Tabla 4. Parámetros medidos en la fase líquida de los núcleos sedimentarios..	111
Tabla 5. Estadísticos descriptivos del pH (1961-1970 al 2012)	113
Tabla 6. Estadísticos descriptivos de la temperatura (1988-2012) y el OD (1991-2012).....	113
Tabla 7. Estadísticos descriptivos del OD (1991-2012), DBO ₅ y DQO, de 1988 al 2012.	114
Tabla 8. Estadísticos descriptivos de la turbidez de 1988 al 2012, STD y CE de 1965 al 2012.	115
Tabla 9. Estadísticos descriptivos de NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ (1965-2012), de OD, NH ₄ ⁺ y NT (1990-2012).....	116
Tabla 10. Estadísticos descriptivos del fósforo total y fósforo disuelto total, de 1988 al 2012.	116
Tabla 11. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de los principales cationes: Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , de 1965 al 2012.	117
Tabla 12. Estadísticos descriptivos de los principales aniones: Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ (1960-2012).	118
Tabla 13. Estadísticos descriptivos de alcalinidad total (1988 al 2012) dureza total (60's al 2012) en relación a concentraciones de CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ y Mg ²⁺	120
Tabla 14. Estadísticos descriptivos de la concentración de sílice disuelta (1965-2012).....	120
Tabla 15. Estadística descriptiva de actividad de ²¹⁰ Pb y masa seca acumulada del core datado.	121
Tabla 16. Fechas obtenidas bajo el modelo CRS e interpoladas.	122

Tabla 17. Estadística descriptiva de la Tasa de Sedimentación.....	123
Tabla 18. Salidas de resultados asociados a los modelos de regresión de la variable Tasa de Sedimentación.	123
Tabla 19. Presencia de taxa de diatomeas en cada sección analizada.....	124
Tabla 20. Abundancia relativa de las especies de diatomeas, por zonas.....	126
Tabla 21. N° de especies de diatomea por biotopo y por zona y, recambio de especies.....	128
Tabla 22. Parámetros de biodiversidad: Riqueza, N° de valvas, Dominancia, Índices de Simpson y de Shannon, Uniformidad, Equidad, por cada zona, indicando el estado para cada sección datada.	128
Tabla 23. Estadística descriptiva de los parámetros de biodiversidad de la ZD completa (zonas 1-3 juntas) y la ZND en función de la zonificación realizada en base a las 8sp representativas.	129
Tabla 24. Resultados del ANOVA de un factor para los parámetros de biodiversidad entre zonas obtenidas en base a las 8 especies representativas.	129
Tabla 25. Resultados del ANOVA de un factor para parámetros de biodiversidad entre zonas obtenidas a partir de 32 especies identificadas en la zona datada.	131
Tabla 26. Estadísticos descriptivos de la variable clorofila a en sedimentos.....	133
Tabla 27. Resumen de los modelos de regresión lineal y estimaciones de los parámetros de la clorofila a (mg.g^{-1} peso seco) en sedimentos.....	134
Tabla 28. Concentración de Al, Cd, Cr y Pb en sedimentos obtenidos de un core del Lago Masaya.....	134
Tabla 29. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de la distribución de Al, Cd, Cr y Pb (concentración) en sedimento.	135
Tabla 30. Resultados de la prueba de correlación de Pearson entre la concentración de metales pesados (Al y Cd) y la profundidad en la fueron detectados.	135
Tabla 31. Resultados de la prueba de correlación Tau b de Kendall entre la concentración de metales pesados (Al y Cd) y la tasa de sedimentación.....	135
Tabla 32. Rangos y óptimos de referencia de algunas variables ambientales autoecológicas (Biotopo, pH, Salinidad y Saprobiedad), de las diatomeas identificadas.	136

ÍNDICE DE MAPAS E IMÁGENES

Figura 1. Localización de la subcuenca del Lago Masaya.	2
Figura 2. Representación de la red drenaje de la subcuenca	11
Figura 3. Mapa de pendientes.....	12
Figura 4. Mapa de elevaciones	13
Figura 5. Distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal.....	15
Figura 6. Distribución del uso actual del suelo	16
Figura 7. Localización del sitio de extracción de los núcleos sedimentarios	20
Figura 8. Hidroquímica de la subcuenca del Lago Masaya.....	41
Figura 9. Extracción de los núcleos sedimentarios (Cores) en el PC-01 del Lago Masaya	110
Figura 10. Seccionamiento del Core 01	112
Figura 11. Oxidación de la materia orgánica para facilitar extracción de diatomeas	112

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Valores promedio de pH de 1961-1970 al 2012	32
Gráfico 2. Valores promedio de temperatura (1988-2012) y OD (1991-2012) del Lago Masaya.....	33
Gráfico 3. Valores promedio de OD, DBO ₅ y DQO, de 1988 al 2012.....	34
Gráfico 4. Valores promedio de turbidez (1988-2012), STD y CE (1965-2012) ...	35
Gráfico 5. Valores promedio de nitratos, nitritos (1965-2012), amonio (1990-2012) y NT (2003-2012).....	37
Gráfico 6. Valores medios de fósforo total y fósforo disuelto total (1988-2012) ...	38
Gráfico 7. Relación NT/PT para 2003, 2004 y 2012.....	39
Gráfico 8. Distribución de la concentración de iones mayores y, tipo hidroquímico, entre 1961 y 2012.	42
Gráfico 9. Comportamiento temporal de las concentraciones de los cationes y aniones principales, entre 1961 y 2012.....	44
Gráfico 10. Comportamiento temporal de alcalinidad y dureza total en relación con CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Ca ²⁺ y Mg ²⁺ (1988-2012).....	45
Gráfico 11. Correlación entre dureza (A) y alcalinidad (B), con Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y HCO ₃ ⁻ (1988-2012).....	46
Gráfico 12. Valores promedio de la sílice disuelta ('60s al 2004).....	47
Gráfico 13. Decaimiento de la <i>actividad de ²¹⁰Pb en exceso</i> versus la <i>profundidad del core</i>	50
Gráfico 14. Fechas obtenidas con el modelo CRS.....	51
Gráfico 15. Curvas de mejor ajuste para la Tasa de Sedimentación.	52
Gráfico 16. Concentración de Al, Cd, Cr, Pb en sedimentos (Core 01) del Lago Masaya	54
Gráfico 17. Correlación entre la tasa de sedimentación y la concentración de Al y Cd	56

Gráfico 18. Número de especies de diatomeas por género.	58
Gráfico 19. Curva de rarefacción para las especies de diatomeas del Lago.	59
Gráfico 20. Número de valvas, abundancia relativa y secciones en las que se observó cada taxa de diatomea identificada.	60
Gráfico 21. Especies más abundantes en cada sección del core analizado	61
Gráfico 22. Sumatoria de las abundancias relativas de las 8 especies más abundantes para cada sección del Core 01.	62
Gráfico 23. Perfil: abundancia relativa de las especies más representativas (n:8) vs profundidad (25 secciones) del core analizado.	63
Gráfico 24. Especies más representativas y abundancias relativas por zona.	64
Gráfico 25. Esquema que refleja la presencia/ausencia de las taxa de diatomeas en los diferentes biotopos y zonas.	66
Gráfico 26. Número de taxa por biotopo en cada zona	67
Gráfico 27. Número de taxa según las variables autoecológicas: pH (A), salinidad (B), saprobiedad (C), por zona.	69
Gráfico 28. Parámetros de biodiversidad de los ensambles de diatomeas analizados.	71
Gráfico 29. Gráficos de las medias de parámetros de biodiversidad en zonas definidas en base a 32 taxa de diatomeas identificadas en la zona datada.	73
Gráfico 30. Distribución de la clorofila a inferida en sedimentos	75
Gráfico 31. Gráfico de dispersión y curvas de mejor ajuste de la clorofila a total.	76
Gráfico 32. Precipitación, nivel del lago, temperatura del aire, evaporación, velocidad del viento, C.E., S.T.D. y tasa de sedimentación	77
Gráfico 33. Curvas de acumulación: eventos hidrológicos extremos (1876-2011)	80
Gráfico 34. Cantidad de eventos hidrológicos extremos y fenómenos El Niño - La Niña.	81
Gráfico 35. Crecimiento poblacional de la ciudad de Masaya (~1870-2012)	82
Gráfico 36. Superficie que cada municipio ocupa en la subcuenca del Lago Masaya	83

Gráfico 37. Perfil paleolimnológico N°1 del Lago Masaya.....	89
Gráfico 38. Perfil paleolimnológico N°2 del Lago Masaya.....	90
Gráfico 39. Comportamiento temporal del OD	114
Gráfico 40. Comportamiento temporal de los STD, CE y Turbidez	115
Gráfico 41. Comportamiento temporal de los principales cationes.	118
Gráfico 42. Comportamiento temporal de los principales aniones.	119

ABREVIATURAS

AECID: Agencia Española de Cooperación para el Desarrollo.

AMICTLAN: Asociación de Municipios Integrados por la Cuenca y Territorios de la Laguna de Apoyo (Catarina, departamento de Masaya, Nicaragua).

CIRA/UNAN-Managua (CIRA): Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de la UNAN-Managua.

ENACAL: Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados.

INEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (de Nicaragua), hoy INIDE.

INIDE: Instituto Nacional de Información de Desarrollo (de Nicaragua).

INETER: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

INTUR: Instituto Nicaragüense de Turismo.

MARENA: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (de Nicaragua).

PEARL: Paleoecological Environmental Assessment and Research Lab.

MAG: Ministerio Agropecuario (antes Ministerio Agropecuario y Forestal: MAGFOR).

²¹⁰Pb: radioisótopo plomo-210.

CONISS: análisis de agrupamiento jerárquico y estratigráficamente restringido mediante suma de cuadrados progresivos o CONISS cluster analysis.

RESUMEN

Reconstrucción cualitativa de algunos cambios limnológicos recientes (últimos 130 años) del Lago Masaya, Nicaragua.

H. Camilo Fuentes Peña

El Lago Masaya, es un cuerpo de agua tropical, de origen volcánico, monomíctico y eutrofizado, localizado al suroeste de Managua, en una zona densamente poblada y con intensa actividad agrícola, utilizado como receptor de las aguas residuales de las poblaciones cercanas, desde aproximadamente 1920-1930. Recientemente ha emergido en la agenda ambiental y política de las autoridades locales, siendo prioritaria para su recuperación una mayor comprensión de su ecología y de sus procesos históricos. Para contribuir con este propósito, se pretendió una reconstrucción cualitativa de ciertos cambios limnológicos ocurridos en un período de 130 años, entre 1879 y 2012-2013, en base al análisis de proxies ambientales, del historial de uso del lago y su cuenca, así como de eventos hidro-meteorológicos que pudiesen haber determinado su dinámica y ecología. Por primera vez se presenta el comportamiento detallado de las tendencias cronológicas de ciertos parámetros físico-químicos selectos abarcando el registro de datos en toda su extensión, desde la década de los '60s hasta el 2012, destacándose su carácter alcalino, bicarbonatado sódico y recientemente el descenso del oxígeno disuelto en correspondencia con el incremento del amonio. La aceleración de la tasa de sedimentación e incremento del aluminio en correspondencia con el aumento en frecuencia e intensidad de eventos hidrológicos, insinúan un mayor arrastre de sedimentos desde los sectores sur y suroeste de la cuenca. El análisis del ^{210}Pb y de los proxies bioquímicos y biológicos evocan un proceso de incremento de los nutrientes, acelerando la productividad primaria del lago, lo que de forma simultánea se ha conjugado con vientos más veloces y mayor evaporación, provocando descensos en el nivel del Lago y como consecuencia alterando la concentración de sales y de la conductividad eléctrica, favoreciendo condiciones ideales para el desarrollo desproporcionado de unas pocas especies, siendo éstas esencialmente planctónicas-halófilas e, inevitablemente provocando la reducción de especies bentónicas y con ello un descenso de la biodiversidad. Pocas especies han dominado este ecosistema desde antes de 1879, siendo las principales *Cyclotella stelligera*, *Fragilaria acus*, *Nitzschia amphibia*, *Aulacoseira granulata*, *Nitzschia palea*, *Fragilaria ulna*, *Cyclostephanos dubius* y *Cyclotella meneghiniana*, representado todas ellas más del 98% de la abundancia relativa total. Los cambios cualitativos inferidos a partir de la autoecología de estas especies y del análisis de clúster CONISS, sugieren un momento marcado de cambio ocurrido posiblemente después de la década del '40, en concordancia con el historial de uso del cuerpo de agua. Conjuntamente, los datos indican una degradación acentuada del Lago Masaya, caracterizada por un estado eutrófico prolongado, siendo necesarias para su recuperación, medidas igualmente drásticas, pero de larga duración.

Palabras clave: Lago Masaya, reconstrucción cualitativa, paleolimnología, diatomeas.

I. INTRODUCCIÓN

El Lago Masaya, ubicado en una de las zonas más densamente poblada de Nicaragua y de intensa actividad agrícola, ha sido utilizado como receptor de las aguas residuales de la ciudad a la que debe su nombre, desde hace aproximadamente 60 años, aunque algunos reportes sugieren como inicio de las primeras descargas entre 1920 y 1930, provenientes del Hospital San Antonio.

Los esfuerzos recientes de instituciones del Estado, orientados a su recuperación, demandan esfuerzos de investigación que permitan entender de forma integral sus procesos limnológicos históricos. Por ello, se ha pretendido una reconstrucción cualitativa de ciertos cambios limnológicos ocurridos en éste durante al menos un siglo, inferidos a partir del estudio de ensamblajes de diatomeas, clorofila *a* en sedimentos y otros proxies medioambientales, así como de la relación entre éstos y el historial de uso tanto del lago como de la subcuenca, de los parámetros físico químicos y variables hidro-meteorológicas selectas.

Los resultados reflejan que el aporte creciente de sedimentos, en su mayoría desde el sector sur de la subcuenca, y de los nutrientes aportados desde la ciudad de Masaya han provocado un acelerado incremento de su productividad primaria, lo que en adición al aumento de eventos hidrológicos extremos, de la evaporación y la velocidad del viento, en contraposición con la disminución del nivel del agua y del oxígeno disuelto, han marcado su ecología favoreciendo cambios en los ensamblajes de diatomeas que incluyeron la pérdida de especies bentónicas y el dominio de muy pocas especies plantónicas y, determinando su estatus de lago eutrofizado, desde hace más de medio siglo.

Queda mucho por establecer y entender, sin embargo, se sugieren medidas preventivas de ordenamiento y protección en los sectores sur y suroeste de la subcuenca para reducir sustancialmente la carga de sedimentos, a la vez que se elogia los esfuerzos recientes para reducir la cantidad de nutrientes que ingresan desde el sector este, procedentes de la ciudad de Masaya.

I.1. Área de estudio

El Lago Masaya, popularmente llamado “Laguna de Masaya”, está localizado a unos 27 km al suroeste de Managua, Nicaragua, al sur de la ciudad de Nindirí y oeste de la ciudad de Masaya (Figura 1), entre las coordenadas 1326322N 596238E (límite norte), 1321062N 596074E (límite sur), 1324533N 597340E (límite este) y 1321634N 594739E (límite oeste). Información sobre la subcuenca de este Lago ha sido detallada en el acápite II.4 en el marco de referencia.

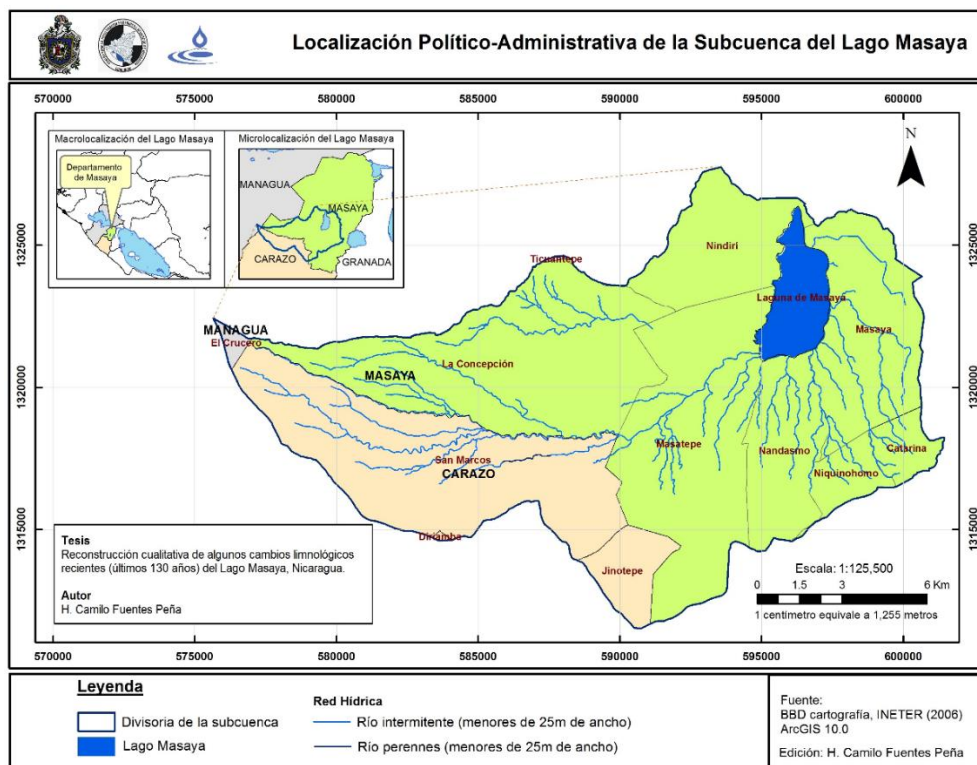


Figura 1. Localización de la subcuenca del Lago Masaya.

I.2. Antecedentes

Este lago ha sido estudiado desde hace aproximadamente 50 años por diversas instituciones internacionales, entre las cuales destaca la University of Nebraska, e instituciones nacionales, sobre todo ENACAL, INETER y especialmente CIRA/UNAN-Managua.

Por ejemplo, el INETER ha monitoreado su nivel, dando seguimiento a las fluctuaciones y, ha elaborado al menos dos mapas batimétricos, el último del 2006 (INETER, 2006a).

Por su parte el CIRA ha monitoreado algunos parámetros físicos, químicos y biológicos, enfocándose en la identificación de especies, distribución y fluctuaciones de zooplancton, fitoplancton, fitobentos, aunque en años diversos (series de tiempo no consecutivas) y períodos dispares de tiempo (series de diferente duración); además, los estudios de este tipo de finales de los '80s y principios de los '90s, han sido preliminares. Guerrero (1989), elaboró el primer trabajo sobre diatomeas del litoral.

Trabajos posteriores han valorado las características químicas y bacteriológicas del efluente de las lagunas de estabilización de la ciudad de Masaya. El informe más reciente realizado por esta institución fue un estudio de línea de base (2012-2013) con el propósito de generar información de soporte para la toma de decisiones vinculadas con el proyecto de modernización y ampliación del sistema de alcantarillados y tratamiento de aguas residuales de la ciudad referida, que actualmente ejecuta ENACAL (ENACAL, 2008; AECID, 2011).

I.3. Planteamiento del problema

La sedimentación es un proceso natural que puede influir en la dinámica, ecología y calidad de agua de los lagos, e incluye el transporte y acumulación de materiales orgánicos e inorgánicos como producto de procesos exógenos como actividades humanas o eventos naturales, ocurridos dentro de las cuencas de captación, así como de procesos endógenos (Benoit & Rozan, 2001; Smol, 2008). En este sentido, los sedimentos se consideran como el resultado de la integración de ambos procesos (Cohen, 2003; Smol, 2008).

Diversas actividades y eventos, tales como el crecimiento poblacional, inadecuado ordenamiento territorial, deforestación, malas prácticas agropecuarias, deficientes sistemas sanitarios y de tratamiento de aguas residuales, se han asociado a la generación de sedimentos, afectando directamente la calidad (ecológica) de las aguas, lo cual se refleja en las variables limnológicas (GWP-Centroamérica, 2011).

En este sentido, los Lagos Nicaragüenses han sido convertidos en grandes receptores de residuos líquidos y sólidos de las regiones más pobladas y económicamente activas (GWP-Centroamérica, 2011; Castillo-Hernández et al., 2006; Vammen, et al., 2011); tal es el caso del Lago Masaya, el cual desde la segunda mitad del siglo XX ha recibido sin interrupción sedimentos, nutrientes y contaminantes transportados a través de los grandes cauces (ejemplos: Venecia y Monimbó) que desaguan al mismo (CIRA/UNAN-Managua, 2013; Salinas, 2007a; López M. & Prado B., 2013). Sin embargo, el aporte más significativo de aguas residuales proviene de la ciudad de Masaya, que a pesar de tener seis lagunas de estabilización, su eficiencia de remoción ha disminuido debido a una sobrecarga de su capacidad máxima (Salinas, 2007a; Salinas, 2007b; Alcaldía de Masaya & AMICTLAN, 2009), sobrepasada desde hace años.

Por ello, para inferir los cambios y procesos históricos ocurridos en este tipo de ecosistemas es de suma importancia el estudio de sus sedimentos (Cohen, 2003; Smol, 2008; Smol, 2010), comparando los hallazgos con los registros históricos.

I.4. Justificación

La subcuenca del Lago Masaya está habitada fundamentalmente por habitantes de los departamentos de Masaya y Carazo, en una región de intensa actividad agrícola y alta densidad poblacional, con una de las mayores tasas de crecimiento a nivel nacional (INEC, 2006b).

Como tal, el Lago ha sido objeto de estudio desde hace décadas por instituciones enfocadas en los aspectos hidrológicos (INETER), limnológicos y de calidad de agua (CIRA, ENACAL), potencial turístico (Alcaldías, INTUR)¹ y protección de los recursos naturales (MARENA)², ofreciendo en algunos casos estudios de alta resolución con información detallada pero restringida a cortos períodos de tiempo (meses a años). De igual forma ha estado presente desde hace dos décadas en los planes municipales, aunque, hasta pocos años se ha constituido como punto de agenda prioritario para las autoridades de la subcuenca, reflejándose esto en los esfuerzos recientes conducidos por instituciones nacionales hacia a la modernización, tratamiento y control de los efluentes de las aguas residuales de la ciudad de Masaya.

Pese a ello y a la existencia de los estudios previos, se requiere de análisis que contribuyan al entendimiento de los cambios limnológicos históricos, a través de un enfoque que facilite la visualización de cambios temporales, que siendo de menor resolución espacial sean de mayor alcance cronológico, que en conjunto con los datos preexistentes contribuyan a mejorar nuestro entendimiento de su ecología.

Se espera entonces que los resultados de esta investigación sean una contribución más para la consecución de los propósitos planteados y para uso de las instituciones, al ser útiles como información de base o referencia, orientada a la mitigación de su deterioro y hacia una gestión integrada de su cuenca.

¹ Fundamentalmente las alcaldías de Masaya, Nindirí, Niquinohomo, Nandasmo y Masatepe.
INTUR: Instituto Nicaragüense de Turismo.

² MARENA: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales de Nicaragua

I.5. Objetivos

I.5.1. Objetivo general

Reconstruir cualitativamente algunos cambios limnológicos ocurridos en el Lago Masaya (Nicaragua) durante los últimos 130 años.

I.5.2. Objetivos específicos

- Analizar las tendencias cronológicas de parámetros físico-químicos selectos del Lago en Masaya, registrados desde 1960.
- Determinar cronológicamente, utilizando ^{210}Pb , la tasa de sedimentación de un núcleo sedimentario (core) extraído del Lago Masaya, correlacionándola con la concentración detectada de Al, Cd, Cr y Pb.
- Analizar la composición así como los parámetros de biodiversidad y ciertas características ecológicas de los ensambles de diatomeas obtenidas de un core extraído del Lago Masaya.
- Inferir la productividad de este cuerpo de agua a partir de la reconstrucción de la clorofila *a* en sedimentos.
- Contrastar los cambios limnológicos inferidos con los actividades humanas y evento naturales más significativos, fundamentalmente en la ciudad de Masaya, ocurridos durante el período datado.

II. MARCO DE REFERENCIA

II.1. Calidad de agua

II.1.1. Definición

‘Calidad de agua’ es un concepto que en su sentido práctico se refiere a las características físicas, químicas y biológicas de un cuerpo de agua. Características, que son medidas a través de parámetros, que determinan cómo y para qué puede ser utilizado dicho cuerpo. En esencia se distinguen dos grandes clasificaciones de calidad de agua, *para actividades humanas*: consumo, doméstico, agrícola, industrial, generación hidroeléctrica, navegación y *ecológica*: de modo que la selección de parámetros a medir y a evaluar dependerá del uso pretendido del agua (UNEP, 2006).

II.1.2. Deterioro de la calidad del recurso agua en Nicaragua

Igual que en otros países Centroamericanos, en Nicaragua la calidad de los cuerpos de agua continentales ha sido alterada por las actividades humanas, en parte debido al crecimiento urbano y concentración de la población, aumentando la presión sobre las fuentes de agua, sobre todo por la generación de aguas residuales que no reciben el tratamiento adecuado, pese a la reglamentación existente en la región (GWP-Centroamérica, 2011).

II.1.3. Estado trófico y calidad de agua en ecosistemas lacustres

La calidad del agua de un ecosistema lacustre puede expresarse en función de su ‘estado trófico’. En limnología, muy temprano se observó que los lagos grandes y profundos son usualmente menos productivos que los pequeños y someros. Existen razones para la relación entre el tamaño y la productividad de los lagos, una es el hecho de que los lagos reciben nutrientes desde su cuenca liberados

principalmente por procesos erosivos. En lagos grandes y profundos, una pequeña parte del epilimnion está en contacto con los sedimentos durante el verano, por lo tanto, la probabilidad que los nutrientes retornen a la zona eutrófica es baja (Lampert & Sommer, 2007).

II.2. Diatomeas

II.2.1. Clasificación y morfología

Las diatomeas son algas de la división (phylum) Bacillariophyta, muy distintas al resto de algas e identificables al microscopio óptico por su coloración amarillo-marrón (Bellinger & Sigeo, 2010) y por la presencia de una pared celular inorgánica compuesta de sílice (SiO_2 hidratado). Tienen una estructura denominada frústula, que consta de dos partes llamadas “valvas” o conchas. Estas paredes muy elaboradas de sílice reflejan los tipos de hábitat a los que cada especie en particular se ha adaptado (Spaulding et al., 2010).

Estos organismos consisten en células no flageladas individuales, colonias simples o cadenas de células y, están ampliamente distribuidas, encontrándose tanto en ambientes marinos como de agua dulce. Su éxito en colonizar y dominar gran variedad de hábitats acuáticos es similar a su diversidad genética, con un total mundial estimado de 285 géneros, que comprenden entre 10,000 a 12,000 especies. En agua dulce, son muy abundantes tanto en formas planctónicas como bentónicas, formando gran parte de la biomasa de algas, siendo importantes contribuyentes a la productividad primaria (Bellinger & Sigeo, 2010).

La mayoría de las diatomeas son microscópicas, con un rango de tallas de 2 a $500\mu\text{m}$ (0.5mm), con algunas pocas con un ancho equivalente a un cabello humano (Spaulding et al., 2010).

II.2.2. Las diatomeas como proxies ambientales

Los proxies paleoambientales consisten en restos o partes de organismos que pueden ser utilizados con el propósito de reconstruir condiciones ambientales pasadas. Existe una amplia gama de proxies paleolimnológicos, incluyendo diatomeas, polen, microfósiles, pigmentos, cladóceros y Chironomidae, así como datos sobre geoquímica (Buczko et al., 2009).

Las diatomeas han sido reconocidas como indicadores ambientales confiables y de gran alcance, así como de cambios ambientales a largo plazo, por ejemplo, para reconstruir acidez, fluctuaciones del nivel del agua, eutrofización, salinidad, pH, nutrientes y otras variables. Esta utilidad es atribuible a su alta diversidad y abundancia. Sus rápidas tasas de migración les permiten colonizar nuevos ambientes, por ello se han distribuido en una amplia gama de ambientes acuáticos, aprovechando los diferentes óptimos y rangos de tolerancia en las que pueden subsistir (Smol & Stoermer, 2010).

Sus conchas de silicio son duraderas y en general se conservan bien en los sedimentos, proporcionando así (con una debida extracción y tratamiento) una visión de la composición de especies, que puede ser utilizada para desentrañar el estado pasado de los ecosistemas lacustres. Es decir, los cambios de ensamblajes de especies siguen de cerca los cambios ambientales. (Dolgonosov & Moiseenko, 2006; Smol & Stoermer, 2010)

II.3. Sedimentación en ecosistemas lacustres

Los cuerpos de agua continentales como lagos y embalses acumulan sedimentos y tienden a rellenarse, siendo esto un proceso natural. Sin embargo, este proceso ha sido acelerado por las actividades humanas, que han derivado en un aumento de la tasa de sedimentos que ingresan a estos cuerpos. Por lo tanto, para la gestión de los lagos es importante determinar la tasa de relleno por sedimentos (Patterson, 1995).

Se ha estimado la tasa de sedimentación en zonas costeras, especialmente las marinas, en valores que oscilan entre 0.3 a 1.0 cm.año⁻¹, de modo que cada centímetro de core puede contener la información de 1 a 3 años. Un centímetro de espesor de un core de 8 cm de diámetro puede equivaler a unos 50 cm³ de sedimento (Ruiz-Fernández et al., 2012).

II.3.1. Técnicas nucleares para la determinación de ²¹⁰Pb en perfiles de sedimentos

El método de datación con ²¹⁰Pb se ha utilizado durante más de cuatro décadas para proporcionar la geo-cronología de sedimentos depositados anualmente y la reconstrucción de historias de contaminación (Benoit & Rozan, 2001).

El ²¹⁰Pb, es un radionúclido natural, de la serie radiactiva del ²³⁸U, con un período de semi-desintegración (vida media) $T_{1/2}=22.23 \pm 0.12$ años. Existen ciertas discrepancias del orden del 0.1% sobre este valor, siendo tan pequeñas que no perjudican de forma relevante los resultados de la datación (Koide, Soutar, & Goldberg, 1972; García-Orellana & Sánchez-Cabeza, 2012).

Se asume que el ²¹⁰Pb puede ser detectado hasta unas 5 veces su período de semi-desintegración, esperándose que pueda proporcionar información útil de al menos los 100 años previos al análisis, aunque esto depende de las técnicas analíticas utilizadas y la precisión del ensayo (García-Orellana & Sánchez-Cabeza, 2012).

El ²¹⁰Pb juega un papel importante en el estudio del medio ambiente ya que está presente tanto en la atmósfera, la litósfera como en la hidrósfera. Este trazador ambiental ha sido utilizado con éxito en el estudio de procesos biogeoquímicos en los océanos, depósito atmosférico y contaminación antropogénica.

II.4. Caracterización de la subcuenca del Lago Masaya

Nicaragua, posee una gran variedad de lagos de origen volcánico (Hooker, Chow, & Saavedra, 1992) incluyendo el lago Masaya (Incer-Barquero & Gutiérrez H., 1975;

Lightburn & Montenegro-Guillén, 1979) que al igual que otros lagos del mismo origen, es relativamente profundo (Tabla 1) a pesar de su pequeña superficie.

Cohen (2003), generalizando sobre los lagos cratéricos, indica que las grandes profundidades combinadas con refugio del viento, proporcionado por las escarpadas paredes del cráter, se combinan para inhibir o debilitar las fuerzas que activan la mezcla de la columna de agua. Cuando esto ha dado lugar a la anoxia en las aguas profundas, los sedimentos aquí encontrados pueden proveer registros paleolimnológicos de alta resolución. Además, sus áreas de drenaje típicamente pequeñas hacen que sean sensibles a las variaciones climáticas locales.

Por otro lado, recientemente Kutterolf et al (2007) han sugerido que no hay evidencia para refutar el planteamiento de Bice (1985), quien sugiere que el Lago tiene una edad entre 25 a 100 mil años.

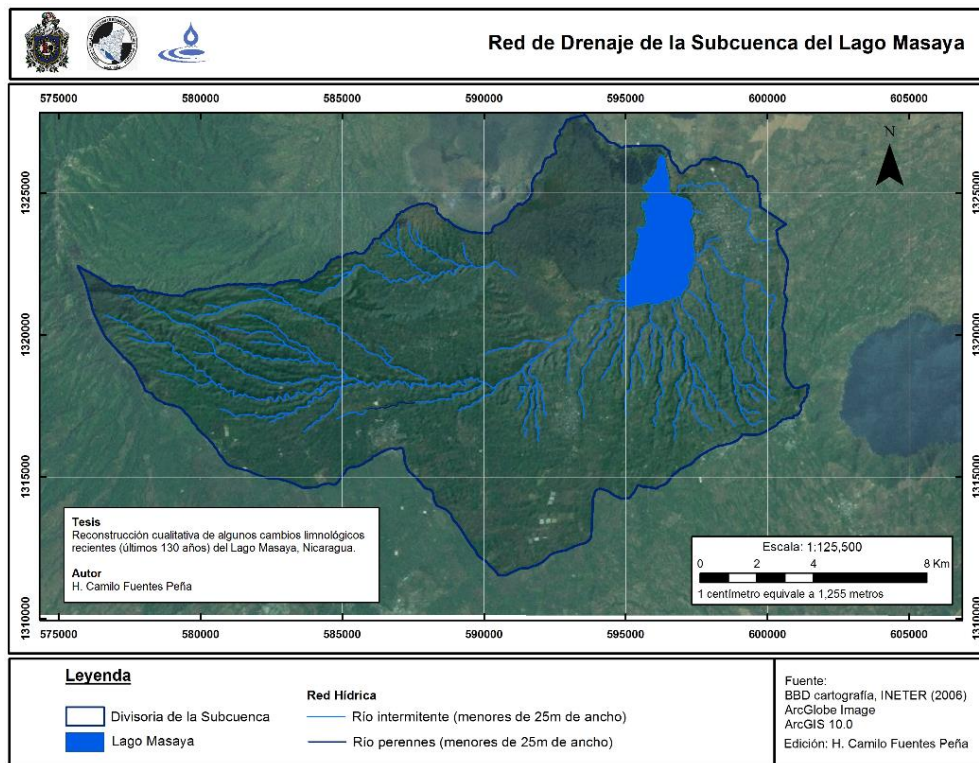


Figura 2. Representación de la red drenaje de la subcuenca

En la Figura 1 se ha detallado la ubicación geográfica del lago bajo estudio. La subcuenca que lleva su nombre, pertenece a la cuenca del Río San Juan, de los grandes lagos o Cuenca N°69 (MARENA, 2010) y es parte integral del Parque Nacional Volcán Masaya –PNVM (Incer-Barquero & Gutiérrez H., 1975).

Su área de drenaje es de aproximadamente 220 km² (~ 21689.88 ha) y presenta una cuenca subterránea de dimensión similar: cerca de 202 km² (Krásný & López, 1988). Aunque no tiene ríos perennes, las aguas superficiales escurren a través de una red de cauces, denominados ríos intermitentes en la Figura 2, que se forman en la zona noroeste y oeste de la subcuenca, en donde se observan las mayores pendientes (50 a 75%, Figura 3). El lago mantiene su nivel debido al escurrimiento superficial y al flujo subterráneo (Montgomery-Santos & Heileman-Chan, 1979).

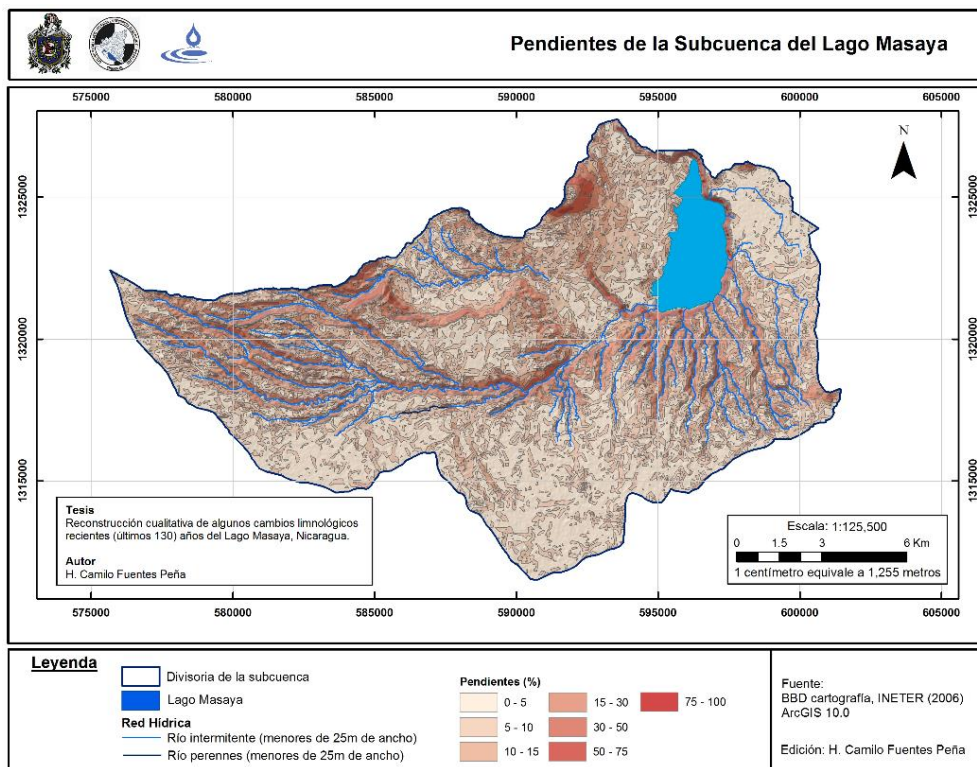


Figura 3. Mapa de pendientes

Las zonas planas están localizadas al sur y al este en el municipio de Masatepe y la ciudad de Masaya (Figura 3).

La subcuenca tiene elevaciones (Figura 4) que oscilan desde de los 120 msnm en la costa u orilla del lago hasta los 870 msnm en la zona oeste. Se pueden definir tres zonas: la de mayores elevaciones entre los 580 y 870 msnm en San Marcos y La Concepción al oeste y noroeste; la de elevaciones intermedias entre los 320 y 580 msnm en Nandasmo, Masatepe, Niquinohomo y Masaya al sur, suroeste y este y, la de menores elevaciones entre los 120 y 310 msnm desde el Volcán Masaya hasta la costa.

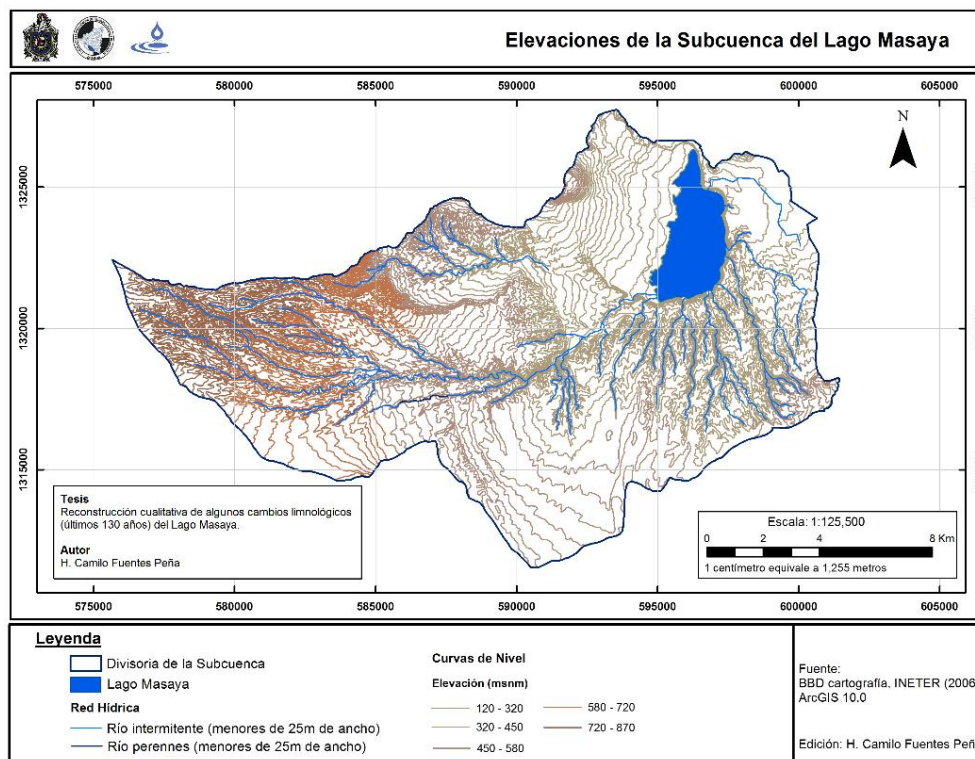


Figura 4. Mapa de elevaciones

Continuando con las características morfológicas del Lago, éste tiene un superficie de 8.38 km² (INETER, 2006b), aunque INIDE (2007; 2008) citando a INETER reporta una superficie de 8.54 km². Su longitud o diámetro norte-sur es de aproximadamente 5km y tiene un ancho o 'diámetro este-oeste' de 2km (Incer-Barquero & Gutiérrez H., 1975; INETER, 2006b), una profundidad media aproximada de 41.7m (BANIC, 1977) y una máxima que ha variado desde 82m (Barlow, 1976) hasta 76.4m (INETER, 2006a).

La Tabla 1 resume algunas de sus características principales del Lago:

Tabla 1. Características morfológicas selectas del Lago Masaya

Fuente	Característica					
	Edad (1 x 10 ³)	S. agua (km ²)	Prof. \bar{x} (m)	Prof. máx (m)	Diám. N-S (km)	Diám. E-O (km)
(Incer-Barquero & Gutiérrez H., 1975)	-	-	-	80.0	6	1.5
(Barlow, 1976)	-	8.4	-	82.0	-	-
(BANIC, 1977)	-	8.38	41.7	72.5	-	-
(INETER, 1980)	-	-	-	76.0	-	-
(Bice, 1985)	25-100	-	-	-	-	-
(Waid et al, 1999)	-	-	-	-	-	-
(INETER, 2001)	-	8.38	-	-	-	-
(INETER, 2006a)	-	-	-	76.4	-	-
(INETER, 2006b)	-	8.38	-	76.4	5	2
(INIDE, 2007 y 2008)	-	8.54	-	-	-	-

Edad: Edad en miles de años; **S. agua:** Superficie del espejo de agua (km²); **Prof. \bar{x} :** Profundidad media (m); **Prof. máx.:** Profundidad máxima (m); **Diám. N-S:** Diámetro/Longitud Norte-Sur (km); **Diám. E-O:** Diámetro/Longitud/Ancho medio Norte-Sur (km). Fuente: modificado y ampliado de Waid et al. (1999).

En las Figura 5 y 6, se destacan las áreas con cubierta vegetal y el uso del suelo actual de la subcuenca.

Se observa (Figura 5) que los *pastos tropicales* predominan al oeste de la subcuenca, a la altura de la ciudad de El Crucero y al oeste de San Marcos, en el sector de influencia de las emisiones gaseosas del Volcán Masaya (Rymer et al., 1998; Martin, et al., 2010).

La zona central y sur están mayoritariamente cubiertas por *plantaciones, huertos y viveros*, así como de *parcelas con tierra cultivada*. El *monte bajo* (<3m altura) se restringe sobre todo al PNVM. Fragmentos de *bosque de árboles caducifolios* (<3m de altura hasta la corona) están presentes principalmente entre San Marcos y La Concepción, con mayor grado de fragmentación en la zona sur, desde Nandasmo hasta Catarina (Figura 1). Una de las mayores franjas de bosque mejor conservado se encuentra en el PNVM.

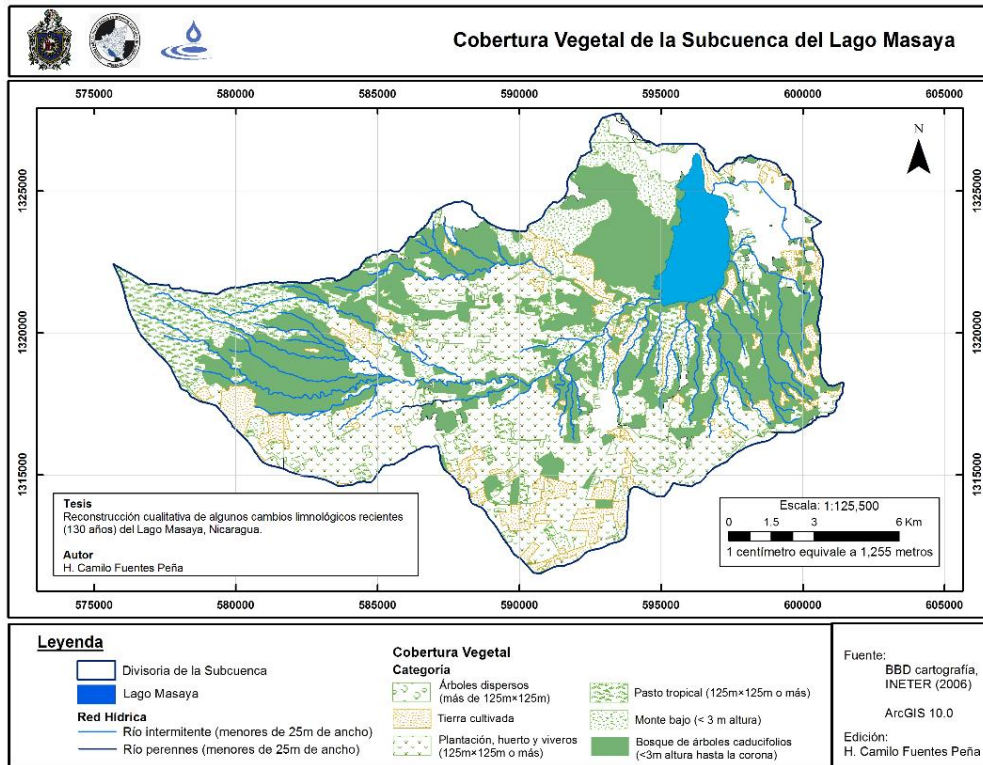


Figura 5. Distribución espacial de los tipos de cobertura vegetal

Siete categorías representan cerca del 90% del uso del suelo en la subcuenca.

Estas categorías son: *café con sombra* (32.1%), presente en el sector sur y suroeste de Niquinohomo, Masatepe, Nandasmo, La Concepción y San Marcos; *tacotal y pasto con maleza* (23.01%) mayoritariamente al suroeste; *áreas humanizadas* (20%); *centros poblados* (4.68%); *bosque latifoliado abierto* (4.51%); el *Lago Masaya* (3.81%) y los *cultivos anuales* (2.5%). Las restantes categorías de uso representan el 10% faltante, siendo las más importantes el *área volcánica* o colada de lava conjuntamente con su vegetación (2.33%) y el *café sin sombra* (2%). (MAGFOR, 2000)

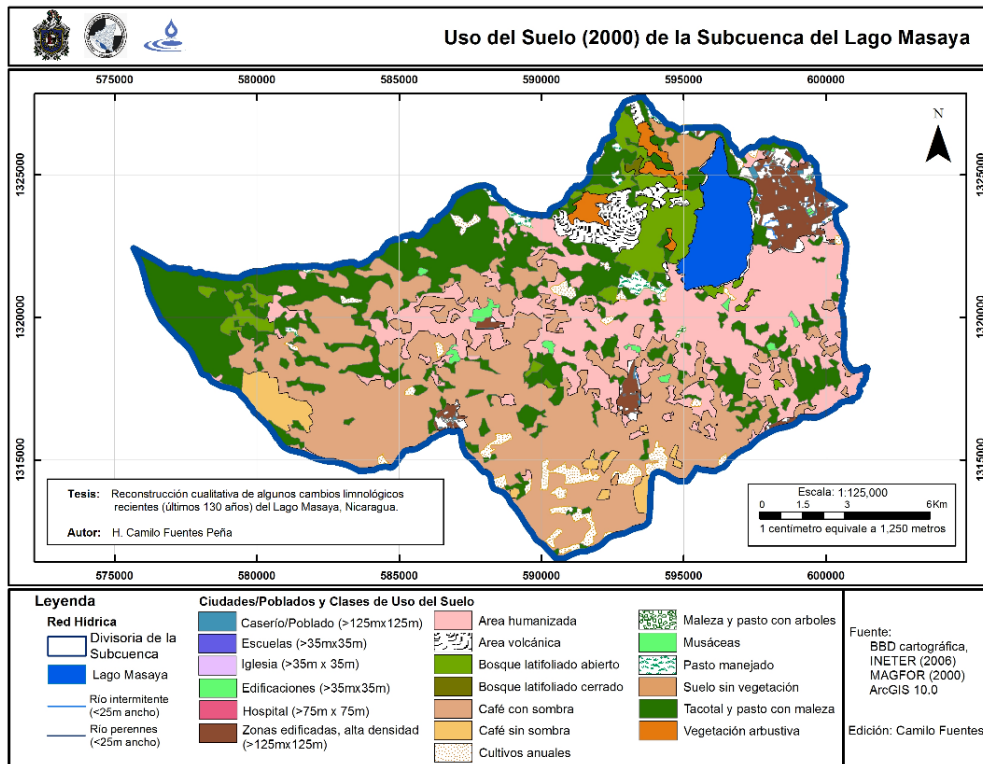


Figura 6. Distribución del uso actual del suelo

II.4.1. Actores locales

II.4.1.1. Población

Según el Censo Nacional del 2005, la población del municipio de Masaya era de 140,000 habitantes, no obstante, en toda la subcuenca de drenaje viven alrededor de 260,000 personas, representando esto una densidad poblacional de más de 1000 personas/km² (Alcaldía de Masaya & AMICTLAN, 2009).

II.4.1.2. Instituciones

Debido a la cercanía e importancia histórica del Lago para las poblaciones circundantes, las alcaldías que fundamentalmente han reclamado jurisdicción han sido las de Masaya, Nindirí, Masatepe, Niquinohomo y Nandasmó. No obstante, las instituciones que han asumido mayor responsabilidad, en proporción al impacto

ocasionado sobre el ecosistema acuático, han sido las alcaldías de las tres primeras ciudades mencionadas.

En materia ambiental, así como de agua y saneamiento, las instituciones pertinentes han sido la Alcaldía de Masaya, MARENA y ENACAL. En este sentido, las lagunas de oxidación que parcialmente han tratado las aguas servidas de la ciudad de Masaya han sido administradas por ENACAL.³

II.4.1.3. Proyectos actuales relacionados

La AECID, a través del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento/FCAS, está financiando el proyecto NIC-013-B, denominado *Proyecto de mejora y ampliación del sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad de Masaya*, que ejecuta el ENACAL.

Algunos de los objetivos fundamentales del proyecto consisten en “*ampliar la cobertura del servicio de alcantarillado sanitario... y, mejorar la... infraestructura de tratamiento [así como] eliminar [desviar] las descargas de aguas servidas tratadas*”, hasta el momento vertidas en el Lago de interés. (AECID, 2011)

II.4.2. Uso actual del Lago

Históricamente, el Lago, ha sido de suma importancia para las poblaciones locales, como fuente de agua y para el desarrollo de actividades menores, tales como pesca artesanal. Hasta mediados del siglo XX, éste fue la fuente de agua principal de la ciudad de Masatepe (Wong-Lanuza, 2004; Valle-Castillo, 2006).

No obstante, desde mediados de los ‘60s hasta la actualidad ha sido ‘concebido’ y utilizado como receptor de aguas servidas, sobretodo de la ciudad de Masaya. Los altos valores de turbidez, de contaminación bacteriana y orgánica, han impedido su aprovechamiento para otros usos (Montgomery-Santos & Heileman-Chan, 1979; Hooker, Chow, & Saavedra, 1992; Wong-Lanuza, 2004).

³ Mayor información ha sido detallada en las secciones previas I.2 y I.4 (antecedentes y justificación).

II.4.3. Causes y aporte de sedimentos

El Lago es alimentado por las descargas que llegan a través de cauces, como “Venecia” y “Monimbó” que drenan desde el área agrícola de la Meseta de Carazo y los municipios del sur de la subcuenca del Masaya (ver Figura 3 a 6). La red de cauces atraviesa cultivos anuales, plantaciones de musáceas, bosques y otros (Alcaldía de Masaya & AMICTLAN, 2009; López M. & Prado B., 2013).

Recientemente se han identificado 41 comarcas y 3 cascos urbanos que influyen directamente sobre los drenajes superficiales (cauces) que conducen al Lago (López M. & Prado B., 2013).

II.4.4. Eutrofización

Este cuerpo sufre un proceso acelerado de eutrofización debido al aporte continuo de materia orgánica, sedimentos y agroquímicos, arrastrados por esorrentía; aporte que debe ser sumado a la carga constante que recibe a través de las descargas de aguas residuales provenientes de las lagunas de estabilización, las cuales alcanzaron su vida útil hace algunos años (Guerrero, 1989; Vanegas, 1993; CIRA/UNAN-Managua, 1988-2013; CIRA/UNAN-Managua, 2013).

III. METODOLOGÍA

III.1. Tipo de estudio

El presente es un estudio analítico, correlacional y retrospectivo (Pedroza, 2012; Hernández et al., 2006), enmarcado en el contexto de estudios de reconstrucción medioambiental cualitativa –bajo un enfoque paleolimnológico– a través de la datación (geocronología) de núcleos sedimentarios con ^{210}Pb , empleando diatomeas subfósiles y clorofila *a* en sedimentos como proxies ambientales, además de metales pesados como trazadores; utilizando información histórica de contraste sobre el uso del Lago, así como de variables y eventos hidro-meteorológicos.

III.2. Universo, población, punto de muestro y muestras

Geográficamente, el ***universo de estudio*** se restringe a la subcuenca del Lago Masaya y, la ***población*** está constituida por la cantidad total de sedimento acumulado en dicho lago.

Por otro lado, la batimetría más reciente (INETER, 2006a), sugiere que en la zona central del fondo es donde eventualmente se acumulan los sedimentos captados por este Lago. Al estar a más de 75m de profundidad, la presión del agua confiere cierto grado de compactación y dada la no existencia de embarcaderos o historial de dragado, la zona de extracción se encuentra en un sitio adecuado (Ruiz-Fernández et al., 2012), con una menor posibilidad de bioturbación, dadas las condiciones de hipoxia (CIRA/UNAN-Managua, 2013), en las que suelen subsistir especies tolerantes como *Chironomus sp.* (Hoback & Stanley, 2001), tal como se ha reportado recientemente (CIRA/UNAN-Managua, 2013).

Por tales razones se extrajeron cores únicamente de esta zona (Figura 7 en texto y 9 en anexos), procurando muestras de alta representatividad y utilidad (Ruiz-Fernández et al., 2012), para conseguir registros integrales de los cambios ambientales recientes.

Fueron extraídos 4 cores del punto ubicado en las coordenadas 596273E, 1323158N y a 135msnm ($\pm 15m$), de los sedimentos ubicados 79m bajo la superficie del Lago.

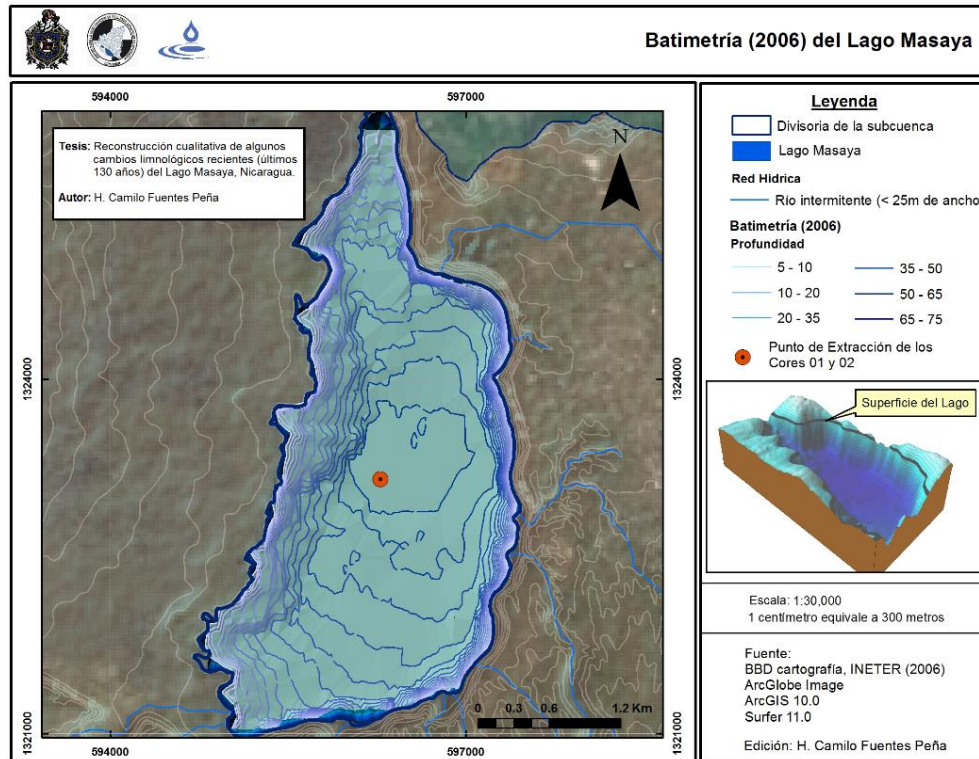


Figura 7. Localización del sitio de extracción de los núcleos sedimentarios

De los 4 núcleos extraídos (Figura 9 en anexos), 2 fueron descartados por presentar indicios de mezcla y pérdida de la interfase agua-sedimento. Los núcleos seleccionados fueron denominados LMC1⁴ (Core 01) y LMC2 (Core 02) –que constituyen las **muestras**–, de 43 y 42 centímetros respectivamente. De tales muestras se obtuvieron 43 secciones de 1cm de grosor (Core 01)⁵ y 84 secciones de 0.5cm (Core 02)⁶, que constituyen las **submuestras** (Figura 10 en anexos). El LMC1 para aislar y analizar diatomeas, así como la concentración de metales

⁴ LMC1: “Lago Masaya – Core 01” o simplemente Core 01.

⁵ Por ejemplo la “sección 1” es la comprendida entre los centímetros 0 y 1.

⁶ En este caso (core 02) la “sección 1” es la comprendida entre los centímetros 0 y 0.5

pesados y, el LMC2 para ser datado y reconstruida la clorofila a en sedimentos, lo cual se detalla en el acápite III.3.3.

III.3. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

III.3.1. Búsqueda y selección de la literatura científica

Entre diciembre del 2012 y diciembre del 2014 se rastreó y seleccionó información científica, en inglés y español, sobre *paleolimnología, limnología tropical, cambios limnológicos, ecología de diatomeas, diatomeas como indicadoras ambientales y de calidad de agua, reconstrucción medioambiental, geocronología, sedimentación en lagos, lagos volcánicos, Lago Masaya, acuíferos volcánicos, Parque Nacional Volcán Masaya* y otros aspectos de interés.

Se utilizaron bases de literatura científica como Springer, OARE, Ebscohost, Asabe, Royal Society Publishing, Palgrave MacMillan, Chicago Journals (JSTOR), Latindex, DOAJ, utilizando los buscadores Google, Ixquick, RefSeek, Biology Browser (Thompson/Reuters), los directorios tales como Instructional Materials in Science Education que incluye la Ecology WWW page e Internet Directory of Botany, así como en la biblioteca del CIRA e información disponible histórica (sobre población, huracanes, nivel del agua, etc.) en los archivos digitales disponibles en internet de instituciones del continente americano, demasiados para ser mencionados.

III.3.2. Compilación de base de datos histórica sobre características ambientales, hidrometeorológicas y uso del Lago

Para compilar y depurar la base de datos de variables históricas limnológicas (ej. parámetros físico-químicos), hidro-meteorológicas como *precipitación, evaporación, nivel del Lago, batimetría, eventos hidrológicos extremos*, así como las de *uso histórico* (ej. historial de vertido), se realizó análisis de contenido de información secundaria obtenida de tablas, bases de datos, de publicaciones científicas e

informes del CIRA/UNAN-Managua, del INETER, del MAG, de las Alcaldías de la subcuenca: Masaya, Nindirí, Niquinohomo, Nandasmo, Masatepe, La Concepción y San Marcos y de ENACAL, así como de diversas fuentes recopiladas de internet y de las reflejadas en las referencias bibliográficas.

A continuación se mencionan algunas de las fuentes principales: Incer y Gutiérrez (1975), Barlow (1976), Barlow et al. (1976), Castagnino (1976), BANIC (1977), Lightburn y Montenegro-Guillén (1979), Guerrero (1989), Hooker et al. (1992), Vanegas (1993), Waid et al. (1999), Wong-Lanuza (2004), INETER (1980, 1998, 2001, 2006a, 2006b), Caballero et al. (2006), Kutterolf et al. (2007), INIDE (2005, 2008), MARENA (2010), y CIRA/UNAN-Managua (2013); así como las bases de datos del CIRA/UNAN-Managua correspondientes a 11 años diferentes⁷ equivalentes a un período de 24 años de datos.

Las variables hidrometeorológicas seleccionadas fueron temperatura media (°C), precipitación (mm), evaporación media de pana (mm) y velocidad del viento a 10m (m.s⁻¹) (ejemplo: Gráfico 32). Los datos fueron facilitados por el INETER y corresponden a la estación tipo pluviométrica (PV) denominada “Masaya (Lagunas de Oxidación)”, código 69115, ubicada en 1324500.1 N 597439.7 E, a 210 msnm. Las series de años con valores registrados fueron: de 1971 al 2008 (37 años) para la *evaporación*; de 1976 al 2008 (31 años) tanto para la *temperatura* como para la *precipitación* y de 1985 al 2008 (23 años) para la *velocidad del viento*.

III.3.3. Análisis de laboratorio

Las submuestras obtenidas del LMC2⁸, 84 secciones de 0.5 cm, fueron analizadas por especialistas del *Paleoecological, Environmental and Assessment Research Laboratory*⁹, aprovechando el vínculo y colaboración establecidos con esta institución.

⁷ 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 2001, 2003, 2004, 2008 y 2012-2013

⁸ Lago Masaya Core 02.

⁹ PEARL Lab, Queen's University (Kingston, Ontario-Canadá).

Datación con ^{210}Pb

Se midió la actividad de ^{210}Pb utilizando un espectrómetro gamma con detector de pozo (ORTEC gamma counting system; well detector).

En total se fecharon 23 secciones del LMC2, con puntos medios que estaban entre los centímetros 0.25 y 8.75, separados entre sí 0.5 cm y luego en los centímetros 9.75, 12.25, 14.75, 17.25 y 42.75, correspondientes a las secciones 1-18, 20, 25, 30, 35 y 84. El modelo de fechamiento seleccionado fue el Constant Rate of Supply–CRS (Appelby, 1998).

Oxidación de la materia orgánica

Se extrajeron 25 submuestras de igual número de secciones del LMC1 para aislar, identificar y contar las diatomeas, siguiendo el Procedimiento Operativo Normalizado PON-HB-04 del Laboratorio de Hidrobiología del CIRA/UNAN-Managua.

El peso húmedo de la porción de material extraído (alícuota) de cada submuestra varió entre 1.019 y 1.141 gramos, con una media de 1.06g (± 0.032). De inmediato, el contenido se digirió con una mezcla 1:1 molar de H_2SO_4 concentrado y HNO_3 (Figura 11 en anexos), para eliminar la materia orgánica y aislar el material silíceo (Barber & Haworth, 1981).

Para acelerar la digestión, las alícuotas se mezclaron por completo y se colocaron en baño maría a $\sim 80^\circ\text{C}$. Luego, el contenido se dejó enfriar y asentar durante 24 horas, observando el comportamiento. Al finalizar la etapa anterior, la mezcla de ácidos fue eliminada enjugando con agua desionizada hasta neutralizar el pH (~ 7 enjuagues), dejándose luego reposar durante una semana.

Montaje de placas fijas

La siguiente etapa consistió en el montaje y selección de placas fijas. Para ello se prepararon cuatro diluciones, una por placa, desde menos a más concentración de *valvas por campo*, hasta obtener una en la que fuese posible el conteo de las

diatomeas subfósiles. En total se obtuvieron más de 100 placas, dejándose secar a 20-25°C, uno o dos días; de éstas, se seleccionaron 50 placas que fueron fijadas con Naphrax (R.I.=1.7)¹⁰, dejándose solidificar durante un mes aproximadamente. En su totalidad el material fue debidamente etiquetado y codificado.

Una vez preparadas las placas fijas, se inició con la observación, identificación y conteo de valvas utilizando un microscopio Leica de *contraste de interferencia diferencial* (DIC) con el lente objetivo de 100X. El conteo de cada placa concluía al alcanzar un máximo de 500 valvas contadas, para aquella especie que las tuviese.

Clorofila a en sedimentos

La reconstrucción de la clorofila a se realizó¹¹ utilizando Espectrometría Cercana al Infrarrojo (NIRS¹²), una técnica no destructiva, que permite la reutilización del sedimento para otros análisis requeridos en estudios paleoambientales (Wolfe, Vinebrooke, Michelutti, Rivard, & Das, 2006). Se estimó la concentración de clorofila a total para las 84 secciones del LMC2.

A continuación se describen las etapas generales del método utilizado en el PEARL: Con el fin de eliminar la influencia del tamaño de la partícula y contenido de agua en la señal espectral, los sedimentos fueron primeramente liofilizados y luego tamizados a través de una malla de 125µm.

Para ayudar a pasar los sedimentos a través del tamiz se utilizó un pincel de ½ pulgada (1.27 cm), limpiando tanto brocha como tamiz con una aspiradora en cada cambio de muestra para evitar contaminación cruzada. En caso que el proceso de liofilización produjera grumos de sedimentos, se hacía necesario triturarlos en un mortero. Luego, fueron colocados en viales (Fisherbrand glass shell vials de 19x65 mm, Catalogue N° 03-339 -26D) sin importar la cantidad de material, siempre que cubriera unos 2mm desde el fondo, lo que en general puede significar unos 0.5g (Michelutti, et al., 2010).

¹⁰ Índice de rarefacción por sus siglas en inglés.

¹¹ Por personal del PEARL, Queen's University.

¹² Near-Infrared Spectroscopy.

Metales pesados en sedimento

La concentración de Al, Cd, Cr y Pb en sedimentos fue determinada en el Laboratorio de Contaminantes Metálicos (Lab-CM) del CIRA/UNAN-Managua, utilizando los procedimientos operativos normalizados PON-CM 32, PON-CM 07, PON-CM 13 y PON-CM 25, para Al, Cd, Cr y Pb respectivamente. Estos fueron seleccionados por ser elementos conspicuos, derivados tanto de eventos naturales como de actividades humanas y, fundamentalmente porque pueden utilizarse como trazadores, así como para correlacionar sus concentraciones con las fechas obtenidas y la tasa de sedimentación.

Se describe *grosso modo* el procedimiento, válido para los cuatro metales:

Veinte secciones consecutivas de 1cm de grosor del LMC1 fueron colocadas en platos plásticos, dejándose secar a temperatura natural garantizando un ambiente libre de contaminación. Luego, el material seco fue removido cuidadosamente con una espátula plástica y traslado a un mortero para ser macerado hasta conseguir el polvo más fino posible. Como lo exige el método las muestras no fueron preservadas con ningún reactivo. Luego fueron entregadas al Lab-CM.

En el Lab-CM las muestras fueron pasadas a través de un tamiz de 60 mesh. De cada muestra se digirió un total de 1.5 g, utilizando agua regia¹³ durante 1 hora a 80°C en baño María. Esto permitió obtener los metales en forma disuelta. La concentración total fue medida por Espectrometría de Absorción Atómica a través de atomización térmica. Para tal propósito se utilizó un Espectrómetro de Absorción Atómica, VarianAA-240FS.

Cada muestra se analizó por duplicado y, a un 10% del total de muestras, se les agregó una cantidad de una solución estándar de concentración conocida del metal a ser detectado siguiendo el mismo procedimiento comentado. Los porcentajes de recuperación de la muestra oscilaron entre el 80 y 120%. Simultáneamente se

¹³ mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico

analizaron muestras en blanco para controlar la posible contaminación eventual durante el análisis.

Los límites de detección obtenidos en el laboratorio son de $10 \mu\text{g.g}^{-1}$ para el Al, $0.01 \mu\text{g.g}^{-1}$ para el Cd, $0.05 \mu\text{g.g}^{-1}$ para el Cr y $0.5 \mu\text{g.g}^{-1}$ para el Pb.

III.4. Tabulación, análisis y presentación de resultados

Parámetros Físico-Químicos y Biológicos

Se realizó una compilación de datos limnológicos seleccionados de diversas fuentes –mencionadas previamente en el acápite III.3.2.– organizados y estructurados en Excel 2007 y 2013 así como SPSS v.20. Para cada variable reportada en el capítulo de resultados se ejecutó un análisis de la calidad: detección de valores atípicos y errores de digitación; transformación en caso que se requiriese; estadística descriptiva, reflejando en las tablas de salida presentadas en Anexos: número de casos (n), promedio, mediana, límite inferior y superior, varianza y desviación estándar (DE), además de tres estimadores robustos centrales: la media recortada al 5%, Huber, Hampel.

Los resultados se presentan en la mayoría de los casos en diagramas dispersión, de caja y de barra, utilizando además –cuando así se requiriese– histogramas, diagramas de sectores (pastel), curvas de mejor ajuste.

Los gráficos presentados en el capítulo ‘**IV. Resultados y Discusión**’ son los que mejor reflejan las tendencias de las variables seleccionadas. Sin embargo, en Anexos, se presentan casos especiales: gráficos de dispersión con curva de mejor ajuste (Gráfico 39 al 42), los cuales fueron elaborados exclusivamente con el propósito de facilitar la descripción de unas cuantas variables: OD, STD, CE, turbidez, principales cationes y aniones.

Perfiles neo-limnológicos

Para cada una de las variables de la base de datos compilada se ha elaborado gráficos de dispersión con interpolación, con el fin de observar los cambios ocurridos durante los últimos 25 ó 50 años. Estos fueron elaborados en SPSS v.20 y en Excel (2007, 2013).

Biodiversidad

A continuación, se describen los parámetros inferidos, concernientes a la biodiversidad de diatomeas:

Riqueza: La riqueza S representa el número total de especies en una comunidad.

Dominancia e Índice de Simpson: La dominancia (D) manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra sean de la misma especie (Simpson, 1949; Moreno, 2001); captura la varianza de la distribución de especies (Magurran, 2004) y, es además, la media aritmética ponderada de las abundancias proporcionales p_i , de las especies de interés, con las p_i utilizadas como ponderador (Hill, 1973). La dominancia se calcula con la ecuación:

$$D = \sum p_i^2$$

donde $p_i = \frac{n_i}{n}$, n_i es el número de individuos (valvas) que pertenece a la i_{th} especie en la submuestra (sección del core) y n es el número total de individuos en la submuestra referida.

Dado que su valor es inverso a la equidad, el índice de Simpson se calcula como el complemento de la dominancia: $1 - D$ (Hammer, Harper, & Ryan, 2001; Moreno, 2001; Pérez, 2004). Por sí solo este índice adquiere valores de 0 a 1, indicando 0 que todas las taxa están igualmente presentes y 1 cuando un único taxón domina la comunidad por completo, pero al calcularse como $1 - D$ la interpretación adecuada es la opuesta, siendo 1 mayor diversidad y 0 menor.

Índice de diversidad de Shannon: La ecuación del índice de Shannon es:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

Sin embargo, dado que p_i y S son parámetros poblacionales y la población es normalmente desconocida, en la práctica H' es estimada como:

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{n} \ln \frac{n_i}{n}$$

donde, n_i es el número de individuos (valvas) que pertenece a la i_{th} especie en la submuestra (sección del core) y, n es el número total de individuos en la submuestra referida (Pérez, 2004).

Uniformidad (de Buzas y Gibson): Denominado índice de uniformidad de Buzas y Gibson (E) o índice de Sheldon (E_2):

$$E_2 = E = \frac{e^{H'}}{S}$$

donde H' es el índice de Shannon y S la riqueza. Este índice representa la proporción de taxa igualmente dominantes en la comunidad (Laflamme, Shiffbauer, & Dornbos, 2011). En esta tesis se utiliza la notación de Buzas y Gibson.

Equidad: El índice de equitatividad (equidad) de Pielou, mide la regularidad con la que los individuos se dividen entre las taxa presentes. Se calcula como sigue:

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\ln S}$$

donde H' es el índice de Shannon y H'_{max} es el máximo valor de H' , igual a:

$$H'_{max} = - \sum_{i=1}^S \frac{1}{S} \ln \frac{1}{S} = \ln S$$

J' se restringe a valores entre 0 y 1. A una menor variación entre las especies de la comunidad, mayor valor de J' (Moreno, 2001; Magurran, 2004).

Curva de rarefacción: Utilizando el software Past v.3 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001) y Excel 2013 se elaboró una curva de rarefacción o de acumulación de

especies, utilizando el estimador de Mao y representando el intervalo del error con 2 desviaciones estándar (2s).

Variables hidro-meteorológicas y nivel del Lago

Se evaluó el comportamiento de 4 variables hidro-meteorológicas influyentes sobre el Lago (precipitación, temperatura ambiental, evaporación y velocidad del viento), contrastándolo con 2 parámetros físico-químicos (CE, STD), la tasa de sedimentación y el nivel del lago.

Eventos hidrológicos extremos

En base a los registros e información disponible en internet, se estableció la categoría “eventos hidrológicos extremos” según los siguientes tipos de eventos: huracanes (H), tormentas tropicales (T) y depresiones tropicales (D), en orden de mayor a menor intensidad. Se seleccionó los eventos registrados por INETER y el NOAA, cuya trayectoria hubiese atravesado un radio de influencia de 200km alrededor del Lago Masaya (INETER, 2014; NOAA(b), 2014). Una cuarta categoría se determinó para aquellos eventos, que al pasar por el radio de influencia, cambiaron de categoría pasando de huracanes a tormentas o viceversa (H→T o T→H).

La cantidad de eventos El Niño/La Niña fue determinado utilizando las bases de datos de los servicios meteorológicos de Australia (Australian Government, 2014) y Estados Unidos (NOAA(a), 2014).

Perfiles paleo-limnológicos

Utilizando los programas C2 v1.7.5. (Juggins, 2007) y Excel (2007, 2013) se han elaborado perfiles paleolimnológicos (Gráfico 37 y 38), que resumen el comportamiento de algunas variables a lo largo de la secuencia temporal del período datado. Estas variables son: **sección**, referida a la profundidad del Core 02; **año CRS**, que indica la fecha obtenida de la datación con ^{210}Pb bajo el modelo CRS; **diatomeas más abundantes**, referida a aquellas especies que en promedio

tienen >1% de abundancia relativa para todas las secciones del core analizado¹⁴; **clorofila a**, que indica el valor inferido de concentración de clorofila a en sedimentos; **tasa de sedimentación**, obtenida para el fechamiento de las secciones del core y, las **zonas**, tal a como se acostumbra a representar en estudios paleolimnológicos (Reavie & Smol, 2001; Smol, 2002; Cohen, 2003; Hawryshyn, 2010).

Estas últimas determinadas a través del análisis de *agrupamiento jerárquico y estratigráficamente restringido mediante suma de cuadrados progresivos* o CONISS cluster analysis (Grimm, 1987) usando dos programas gratuitos de libre distribución, PAST v.3. (Hammer, Harper, & Ryan, 2001) y PoIPal v.1 (Nalepka & Walanus, 2003), utilizando como con datos de entrada las abundancias relativas de las 8 especies representativas¹⁵ en cada una de las 25 secciones analizadas¹⁶.

¹⁴ Para mayor detalle revisar el acápite IV.4.2. *Abundancia relativa y especies representativas*.

¹⁵ Ídem.

¹⁶ cm 1-20, 25, 30, 35, 40 y 43.

IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Parámetros físico-químicos históricos (registrados) del Lago

En los siguientes acápite (IV.1.1 al IV.1.11) se presenta sintetizado¹⁷ el comportamiento temporal de los valores promedio de *temperatura*, *turbidez*, *conductividad eléctrica-CE*, así como de las concentraciones en agua, de *oxígeno disuelto-OD*, *DBO₅*, *DQO*, *sólidos totales disueltos-STD*, *nitratos*, *nitritos*, *amonio*, *nitrógeno total-NT*, *fósforo total-FT*, *fósforo disuelto total-FDT*, *calcio*, *magnesio*, *sodio*, *potasio*, *cloruros*, *sulfatos*, *carbonatos*, *bicarbonatos*, *alcalinidad total Alc-T*, *dureza total Dza-T* y *sílice disuelto*, para rangos variables de tiempo entre la década de los '60s y 2012.

IV.1.1. pH

El pH del Lago Masaya, entre la década del '60 y 2012, osciló entre 7.23 y 8.96 unidades, con un promedio de 8.39 (± 0.43) (Tabla 5 en anexos), teniendo un carácter entre *ligeramente básico a básico*, con valores que coinciden con el rango natural de otros ecosistemas acuáticos neotropicales (Roldán P. & Ramírez R., 2008).

No obstante, sin el valor extremo del 2008 (Gráfico 1, izquierda), el rango de pH para el período mencionado tiene como mínimo 8.22 unidades y un promedio de 8.5 (± 0.24), reduciéndose a la mitad la desviación estándar (DE).

En el Gráfico 1 (lado izquierdo) se reflejan todos los valores promedio registrados (**BDD** completa) de pH y se incluye un diagrama de caja; al derecho se excluye el valor del 2008 por estar fuera de rango, reflejándose visualmente la idea expresada en el párrafo anterior.

¹⁷ Para mayor detalle leer el acápite III.3.2 del capítulo *Metodología*.

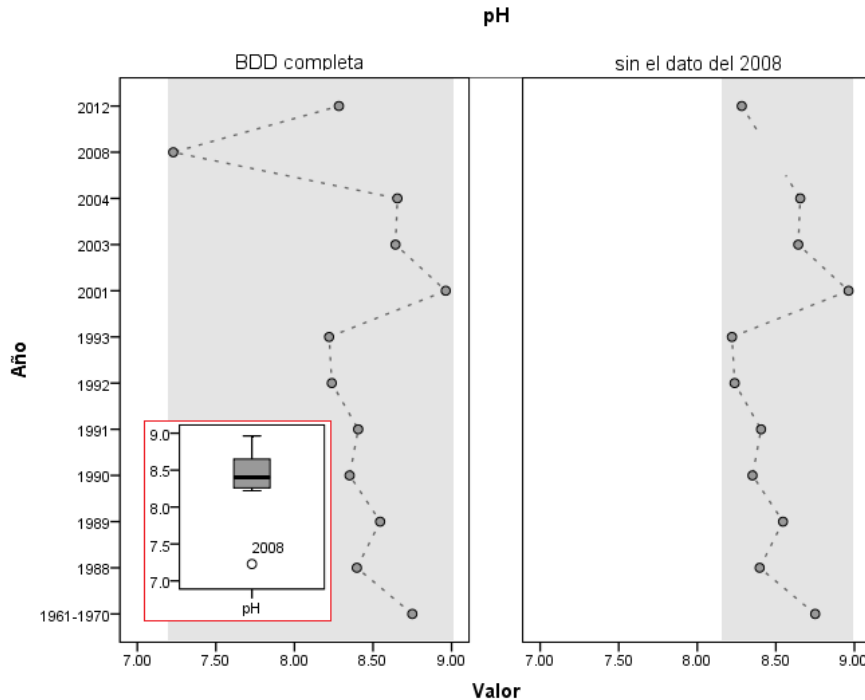


Gráfico 1. Valores promedio de pH de 1961-1970 al 2012

En este gráfico se observa un descenso 'suave' del pH desde la década del '60 a 1993, reduciéndose en tan solo un 6.05%. Luego, es visible un aumento en algún momento entre 1994 y el 2000 (años sin registro) que se refleja en el valor del 2001, en el que se alcanza un máximo de 8.96 unidades. Sin embargo, a partir de este momento, el pH desciende nuevamente teniendo una caída significativa de 16.84% desde el 2004 hasta el 2008, con un valor promedio para este último año de ~7.23 unidades. Finalmente, en 2012 con 8.28 unidades el pH se acerca a los valores de 1992 y 1993.

IV.1.2. Temperatura y Oxígeno Disuelto

La temperatura media, entre los años 1988 y 2012, fue de 26.85°C (± 1.82) y el OD medio entre 1991 y 2012 fue de 3.12 mg.l⁻¹ (± 1.64). Oscilando la primera, desde 23 hasta 28.71°C y, el segundo, de 0.83 a 5.27 mg.l⁻¹, para los períodos mencionados (Tabla 6 en anexos). En el caso del OD, a pesar de tener una desviación estándar (DE) relativamente alta, la media constituye un parámetro representativo de la

muestra, según los valores de los *estimadores de Huber* y de *Hampel*, (3.17 en ambos casos) y de la *media recortada al 5%* (3.13).¹⁸

El Gráfico 2 muestra una aparente¹⁹ disminución del OD ocurrida en un lapso de 17 años, entre 1991 y 2008, desde 5.27 a 0.83 mg.l⁻¹, seguida de un aumento en 2012, alcanzando una concentración cercana a la de 1992 (3.56 mg.l⁻¹).

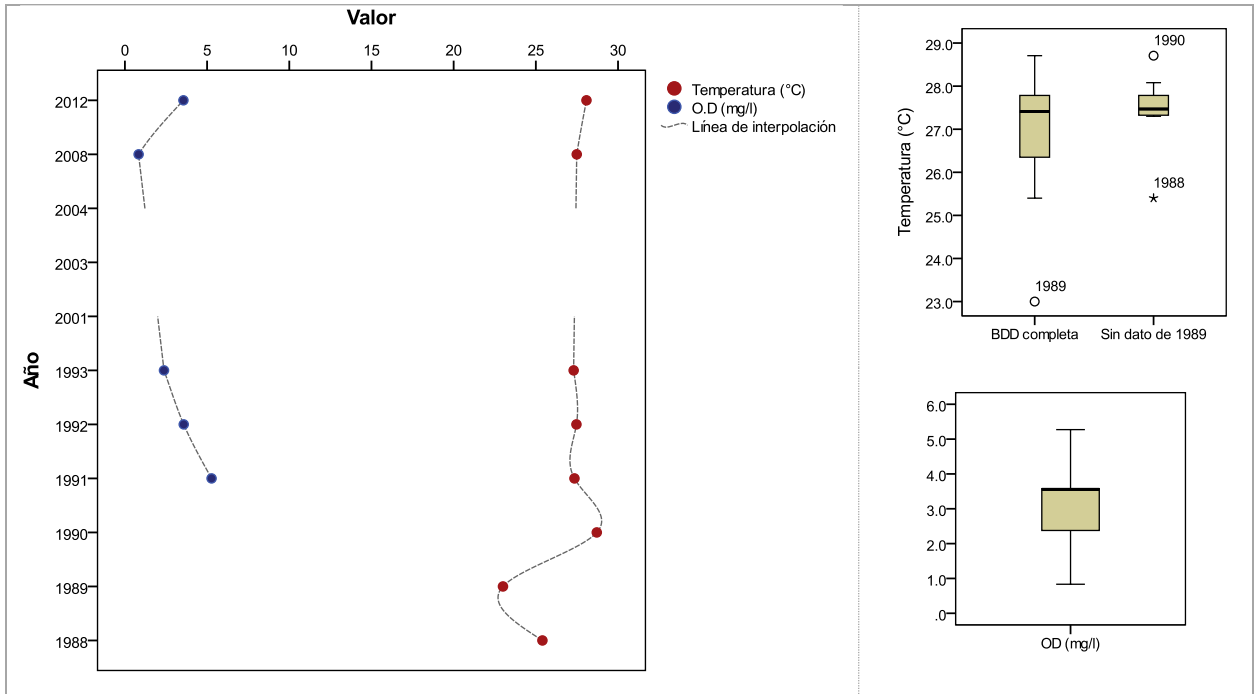


Gráfico 2. Valores promedio de *temperatura* (1988-2012) y OD (1991-2012) del Lago Masaya

Paralelo al descenso del OD, se observan oscilaciones de temperatura –valores extremos del diagrama de cajas– entre finales de los '80s e inicios de los '90s, estabilizándose por los siguientes tres años entre 1991 y 1993 y, aumentando gradualmente hasta el año más reciente, pasando de 27.35°C en 1991 a 27.48 °C en 2008 y, hasta 28.08°C en 2012.

¹⁸ La valoración sobre la representatividad de la media y el uso de los estimadores robustos centrales (Huber, Hampel, media recortada al 5%) se realizó en base a Quinn & Keough (2002, pág. 21) y Cann (2002, p. 87).

¹⁹ puesto que se carece de los registros del período 1994-2007.

IV.1.3. Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno

La DBO₅ del Lago osciló, entre 1988 y el 2012, de 3.52 a 9.50 mg.l⁻¹, con una mediana²⁰ de 5.12 mg.l⁻¹. Por su parte, la DQO osciló, para un período similar (1989-2012), entre 21.29 y 46.52 mg.l⁻¹, con una media de 31.63 mg.l⁻¹ (±9.34) (Tabla 7 en anexos).

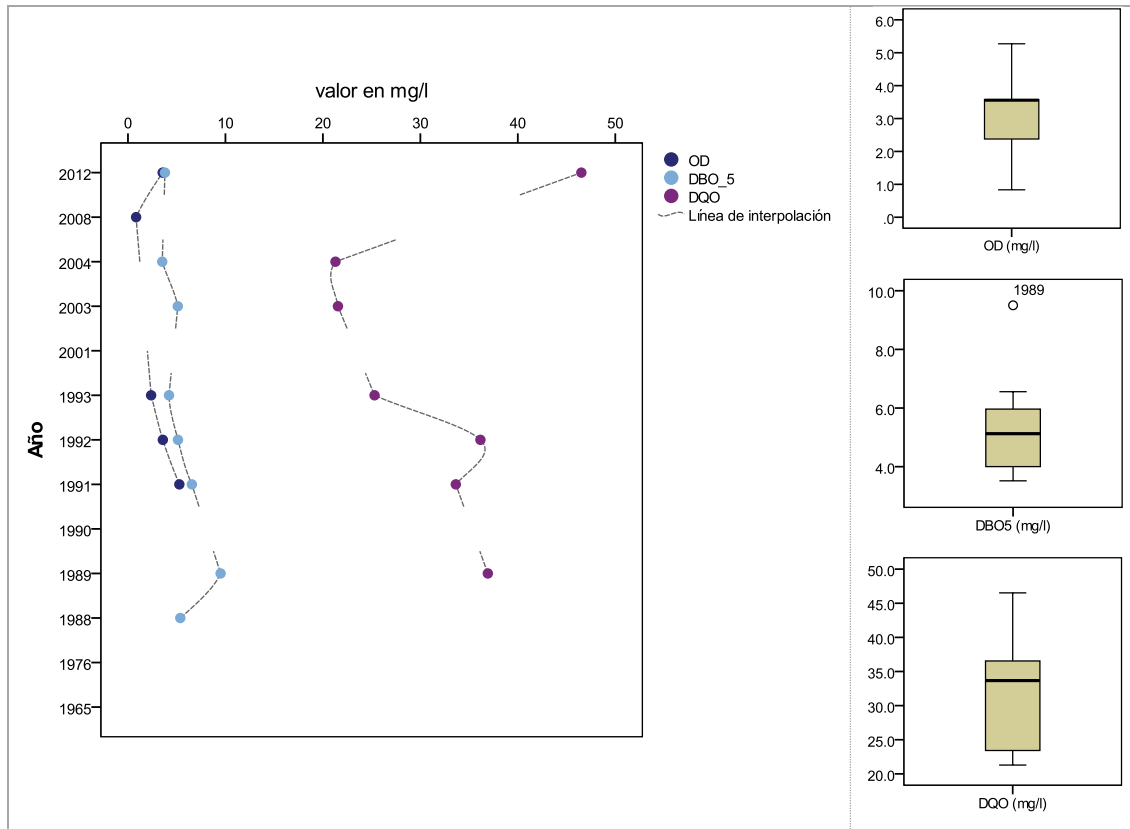


Gráfico 3. Valores promedio de OD, DBO₅ y DQO, de 1988 al 2012

Exceptuando el pico alcanzado en 1992 (36.16 mg.l⁻¹), es visible (Gráfico 3) un descenso gradual de la DQO, desde los 36.92 mg.l⁻¹ de 1989 hasta poco más de 20 mg.l⁻¹ en 2003-2004, seguido este de un aumento significativo a más de 40 mg.l⁻¹ en 2012, *aparentemente* duplicándose²¹ en tan sólo 8 años.

²⁰ En este caso la mediana es el parámetro central que representa mejor a la muestra.

²¹ "Aparentemente" dado que el valor indicado no es el promedio real y, además se desconocen las concentraciones entre el 2005 y 2011. CIRA/UNAN-Managua (2013) reporta únicamente los *máximos* para la época seca (101.82 mg.l⁻¹) y lluviosa (84.25 mg.l⁻¹). El valor indicado en este estudio (46.52 mg.l⁻¹) corresponde al promedio de la mitad de dichos *máximos*, asumiendo que los promedios representan a los rangos.

Las fluctuaciones de la DQO fueron acompañadas de una reducción gradual tanto del OD como de la DBO₅. Salvo el aumento de la DBO₅ de 5.37 mg.l⁻¹ –en 1988– a los 9.5 mg.l⁻¹ en 1989, ésta disminuyó entre 1989 y el 2012 en un 60.1%; dicho de otra forma, el valor del 2012 es 2.5 veces menor que el del ‘89.

IV.1.4. Turbidez, sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica

Para los 50 años de registro (‘60s al 2012), la concentración promedio de STD fue de 311.50 mg.l⁻¹ (± 74.33), con un rango entre 200 y 413.01 mg.l⁻¹. Para el mismo período, la CE osciló entre 394 y 460 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, siendo su valor medio de 427.27 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ (± 21.96).

En un lapso menor de tiempo (1988-2012) la turbidez, varió²² entre 4.2 y 9.9 UNT y un promedio de 6.68 UNT (± 2.51 , n=6) (Tabla 8 en anexos).

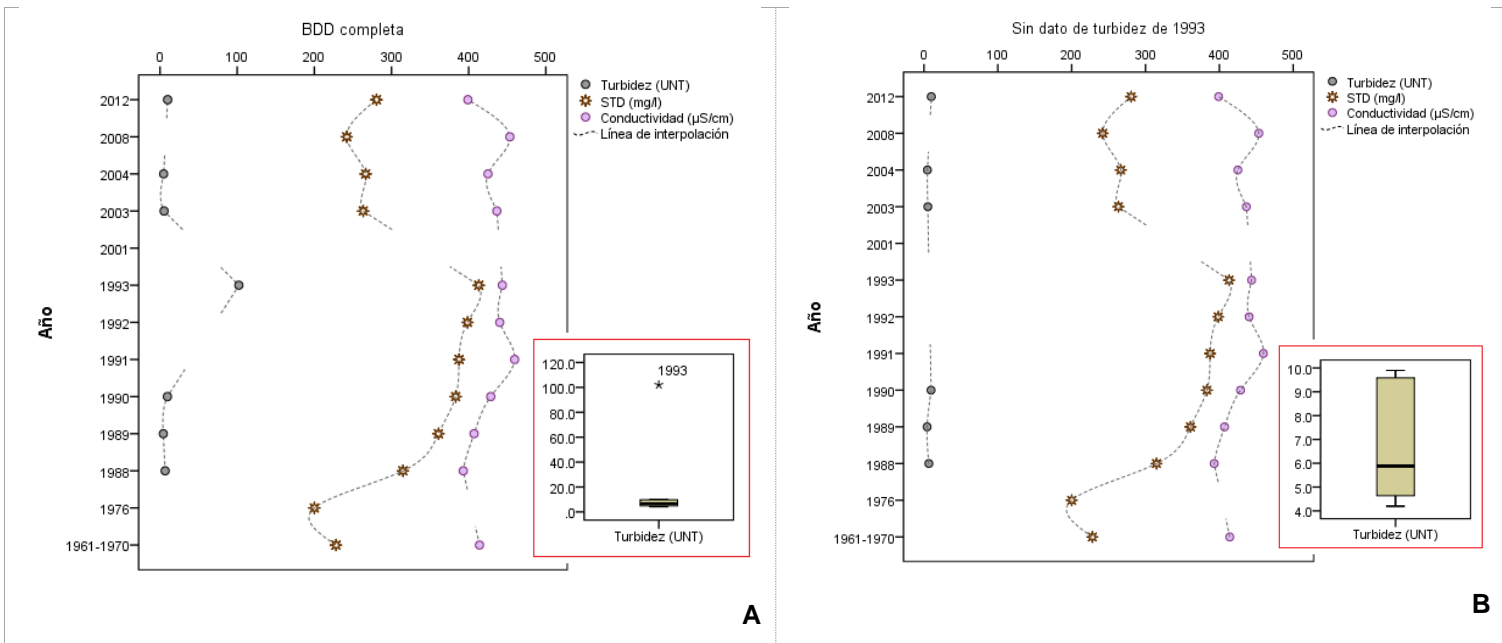


Gráfico 4. Valores promedio de *turbidez* (1988-2012), STD y CE (1965-2012)

A: Gráfico incluye el valor de turbidez del año 1993, **B:** sin dicho valor.

²² Omitiendo el valor extremo de 102.08 UNT registrado para 1993.

Obviando la ausencia de registros²³, los STD han tenido oscilaciones que 'se ajustan a una función polinómica' (Gráfico 40 en anexos) con una reducción respecto a la década del '60 (228 mg.l⁻¹) en un 12.28%, alcanzando en 1976 los 200 mg.l⁻¹, seguido esto de un período marcado de aumento gradual hasta el valor pico 413 mg.l⁻¹ de 1993, con un incremento porcentual del 106.5% en relación a 1976. Luego, un descenso reflejado en los datos de 2003-2004 y del 2008, llegando a 242 mg.l⁻¹ aunque nuevamente aumentando hasta 280.5 mg.l⁻¹ en 2012-2013. (Gráfico 4 en el texto y 40 en anexos)

La CE con dos picos visibles para el período registrado, de 459.64 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (para 1991) y de 453.35 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (para 2008). (Gráfico 4 en el texto y 40 en anexos) y en general con un comportamiento similar a los valores de STD, como suele suceder. Por otro lado, la *turbidez* con dos momentos de descenso y dos de incremento, traslapados.

IV.1.5. Nitrógeno

Entre 1961 y 2012, los *nitratos* y *nitritos* fluctuaron entre 0.025 y 2.200 mg.l⁻¹, con promedio de 0.673 mg.l⁻¹ (± 0.801) los primeros y, de 0.002 a 0.693 mg.l⁻¹ con un promedio de 0.124 mg.l⁻¹ (± 0.208) los segundos. Dados los altos valores de la DE, para ambos casos tiene mayor relevancia la mediana, siendo esta de 0.313 mg.l⁻¹ para los nitratos y de 0.050 mg.l⁻¹ para los nitritos.

Por su parte, el *amonio* (1990-2008) *fluctuó* entre 0.216 y 1.252 mg.l⁻¹, con una mediana (0.366 mg.l⁻¹) y el NT entre 0.596 y 2.007 mg.l⁻¹, con un promedio de 1.186 mg.l⁻¹ (± 0.734), aunque este último para el período 2003-2012. (Gráfico 5 en el texto y Tabla 9 en anexos)

²³ De los 12 registros de STD entre la década del '60 y 2012 (1961-1970, 1976, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 2003, 2004, 2008, 2012-2013) hay períodos sin reporte de datos (1971-1975, 1977-1987, 1994-2002, 2005-2007 y 2009-2011).

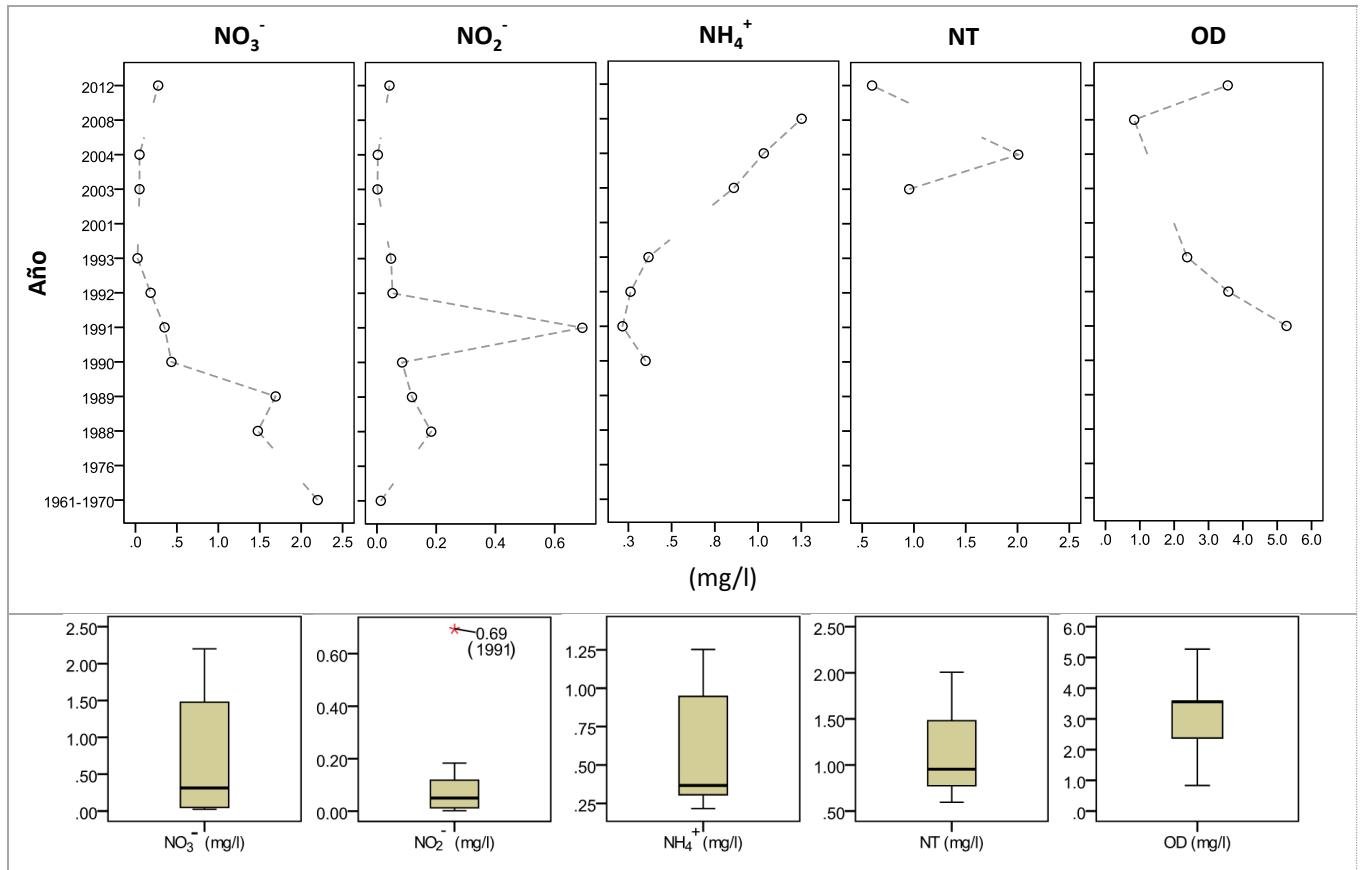


Gráfico 5. Valores promedio de nitratos, nitritos (1965-2012), amonio (1990-2012) y NT (2003-2012).

Nota: se agregó el perfil temporal del OD, dada su estrecha relación con las especies nitrogenadas indicadas.

A la par del fuerte descenso de los NO₃⁻ (de 2.20 a 0.049 mg.l⁻¹) y los NO₂⁻ (de 0.013 a 0.003 mg.l⁻¹) ocurrido entre 1961 y el 2004 (Gráfico 5), así como del OD desde 5.27 hasta 0.83 mg.l⁻¹ entre 1991 y el 2008, se observa un incremento del NH₄⁺ (0.35 a 1.25 mg.l⁻¹) entre 1990 y el 2008. Con valores discordantes a estas tendencias únicamente el NO₂⁻ de 1991, año en el que alcanza su máximo (0.69 mg.l⁻¹) y, una leve disminución del NH₄⁺ de 1990 a 1991.

En un lapso de ~20 años (1989-2008), se redujeron tanto de los nitratos alrededor de 30 y los nitritos hasta más de 60 veces su valor inicial (el de 1989); de igual forma el OD hasta 6 veces. Por el contrario, pero en un lapso similar de tiempo, el amonio aumentó 3.6 veces.

IV.1.6. Fósforo

Excluyendo el valor fuera de rango del '88, las concentraciones de *fósforo total*, para el período 1988-2012 oscilaron entre 0.026 y 0.104 mg.l⁻¹. Por otra parte, las concentraciones de *fósforo disuelto total*, con un promedio de 0.020 mg.l⁻¹ oscilaron para el período 1989-2004 entre 0.005 y 0.047 mg.l⁻¹ y una DE considerablemente alta (± 0.013), reduciéndose casi a la mitad (± 0.007) al omitirse el valor extremo del 2003 (0.047 mg.l⁻¹) y, mejorando la representatividad del promedio (\bar{x} : 0.016 mg.l⁻¹) al estrecharse el rango con un máximo de 0.026 mg.l⁻¹. (Para ambas variables verificar la Tabla 10 en anexos)

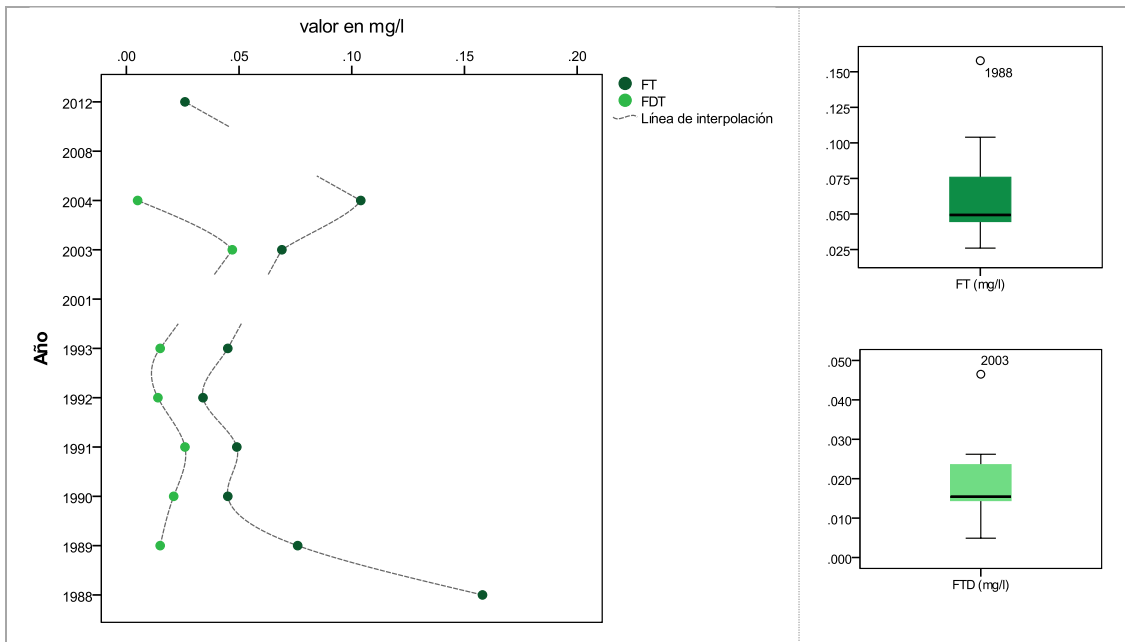


Gráfico 6. Valores medios de *fósforo total* y *fósforo disuelto total* (1988-2012)

El fósforo total presentó (Gráfico 6) una reducción del 51.95% de 1988 al '89 y nuevamente otra del 43.04%, del valor del '89 a la concentración media del período 1990-1993, durante el cual se estabilizó en 0.043 mg.l⁻¹ (± 0.007). Desde este último valor hasta el de 2003 se incrementó en un 58.67%, ascendiendo a 0.069 mg.l⁻¹, y otra vez, con un aumento del 51.8% hasta los 0.104 mg.l⁻¹ en 2004, finalizando en

2012 con 0.026 mg.l⁻¹, siendo esta la concentración mínima de todo el registro (1988 y 2012).

Entre 1989 y 1993, la concentración del FDT varió poco, con un media de 0.018 mg.l⁻¹ (± 0.005) siendo los valores de 1990 (0.021 mg.l⁻¹) y 1992 (0.026 mg.l⁻¹) los más elevados. Del período mencionado al 2003 se dio un incremento del 154.18% llegando a 0.047 mg.l⁻¹ y luego, al año siguiente se redujo un 89.5% a 0.005 mg.l⁻¹, siendo este promedio la última concentración conocida.

En función del rango y promedio de la concentración de FT (26 a 158 $\mu\text{g.l}^{-1}$, \bar{x} :67 $\mu\text{g.l}^{-1}$), el Lago Masaya, durante 24 años registrados (1988-2012), ha sido un cuerpo de agua entre *mesotrófico-eutrófico* a *hipereutrófico* (Vollenweider & Kerekes, 1982; Wetzel, 2001; Lampert & Sommer, 2007; Moss, 2010); siendo *hipereutrófico* en 1988, *eutrófico* entre 1989 y 2003, nuevamente *hipereutrófico* en el 2004 y, *mesotrófico* en el 2012. El valor más elevado del período fue el de 1988 (157.75 $\mu\text{g.l}^{-1}$), visible en el diagrama de caja del Gráfico 6.

IV.1.7. Relación NT:PT

La relación NT:PT, fue posible calcularla únicamente para los años 2003, 2004 y 2012, para los cuales las concentraciones de ambas variables fueron registradas. (Gráfico 7)

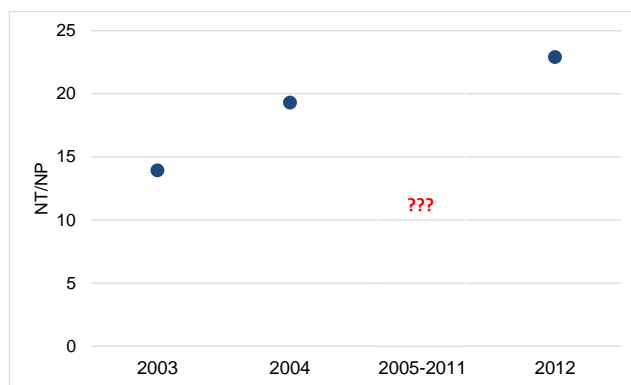


Gráfico 7. Relación NT/PT para 2003, 2004 y 2012.

En base a Vollenweider (1983), el Lago Masaya está potencialmente limitado por fósforo, y al parecer la relación NT:PT va en aumento (Gráfico 7): esto es, en 2003 la relación NT:PT fue 14:1, para año siguiente fue 19:1, luego debido a la ausencia de datos hay un salto (signos de interrogación, Gráfico 7) entre el 2005 y 2011, hasta el siguiente valor estimado para dicha relación, siendo de 23:1 en el 2012.

IV.1.8. Cationes, aniones y tipo hidroquímico

El agua del Lago Masaya ha sido, al menos durante los últimos 50 años (1961-2012), bicarbonatada sódica (Gráfico 8), en correspondencia con los tipos hidroquímicos predominantes de la subcuenca (Figura 8), así como con el origen del Lago. Siendo los bicarbonatos propios de aguas de reciente infiltración y, tanto el Na^+ como el Mg^{2+} aportados por la disolución de las rocas.

Las concentraciones de Na^+ han variado desde 50 a 73.21 mg.l^{-1} , con una media de 61.79 mg.l^{-1} (± 9.37) y las de bicarbonatos desde 186.16 hasta 272.10 mg.l^{-1} , con un promedio de 229.51 mg.l^{-1} (± 25.11). (Tablas 11 y 12 en anexos)

Los otros cationes de importancia, Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} , entre la década de los '60s y 2012 variaron como sigue: el *calcio* desde 13.45 a 17.7 mg.l^{-1} , con una media de 14.87 mg.l^{-1} (± 1.14); el *potasio* entre 13 y 17.14 mg.l^{-1} con una media de 15.46 mg.l^{-1} (± 1.09) aunque con el valor mínimo (13 mg.l^{-1}), registrado para la década del '60, fuera de rango; el *magnesio* de 10.34 a 41.5 mg.l^{-1} y un promedio de 16.74 mg.l^{-1} (± 8.83), siendo la mediana (14.35 mg.l^{-1}) su indicador más representativo.

Si se omite la concentración de Mg^{2+} de 1990 (41.50 mg.l^{-1}) –la más elevada y fuera de rango– la media disminuye a 13.99 mg.l^{-1} (± 1.63) reduciéndose más de 5 veces la DE al estrecharse su rango con un valor máximo de 16.16 mg.l^{-1} .

Los restantes aniones de importancia (CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^-) para el mismo período reportado para los cationes, oscilaron de 8.96 a 118.80 mg.l^{-1} con una media de 29.98 mg.l^{-1} (± 31.95) los *carbonatos*, de 0.0 a 4.18 mg.l^{-1} con una media de 1.15

mg.l⁻¹ (±1.17) los sulfatos y, desde 8.36 hasta 13.47 mg.l⁻¹ con una media de 10.78 mg.l⁻¹ (±1.53) los cloruros.

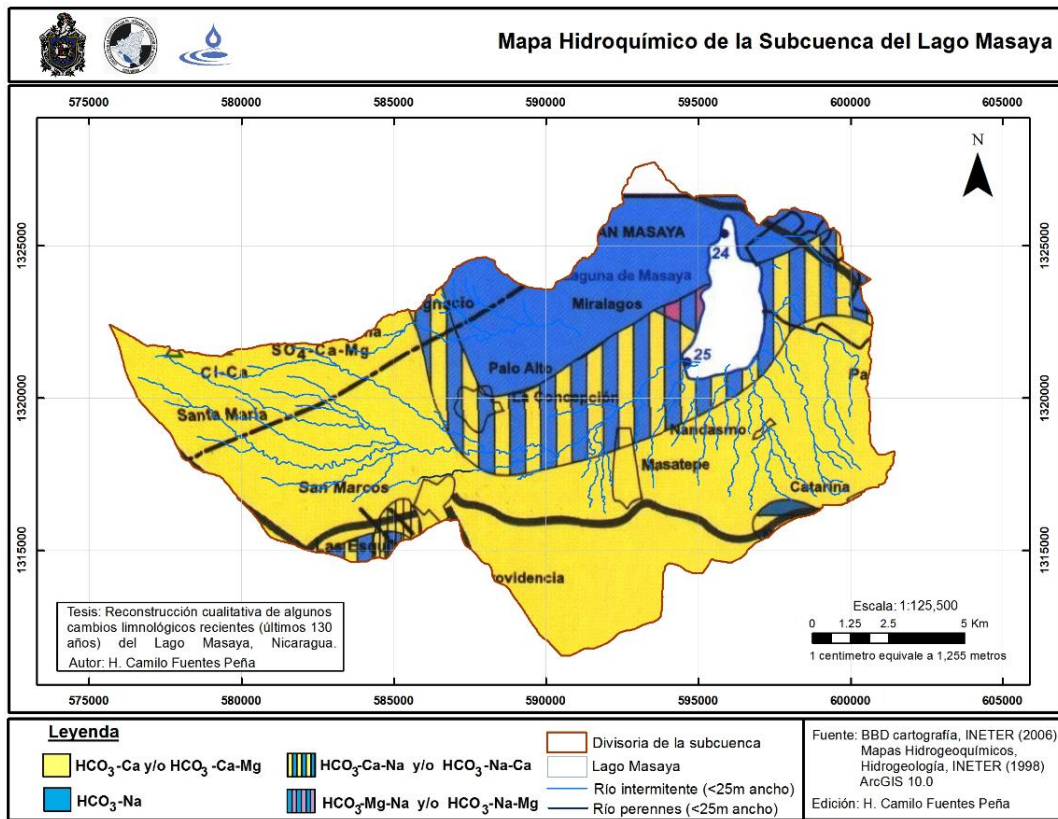


Figura 8. Hidroquímica de la subcuenca del Lago Masaya

A pesar de existir vacíos de información (datos no registrados) para los siguientes períodos²⁴: 1971-1987, 1994-2002 y 2005-2011, es posible tener una visión general del comportamiento temporal de los cambios en las concentraciones promedio de aniones (HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻) y cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺), durante el período referido (de 50 años).

El HCO₃⁻ se redujo un 8.75% entre la década de los '60s y 1988, pasando de 204 a 186.16 mg.l⁻¹; después, en un lapso de 5 años, incrementó 46.16%, llegando a

²⁴ La concentración de SO₄²⁻ de 1976 sí está registrada.

272.09 mg.l⁻¹ en 1993, aunque a mediados de este lapso hubo un leve descenso (entre 1990 y 1991).

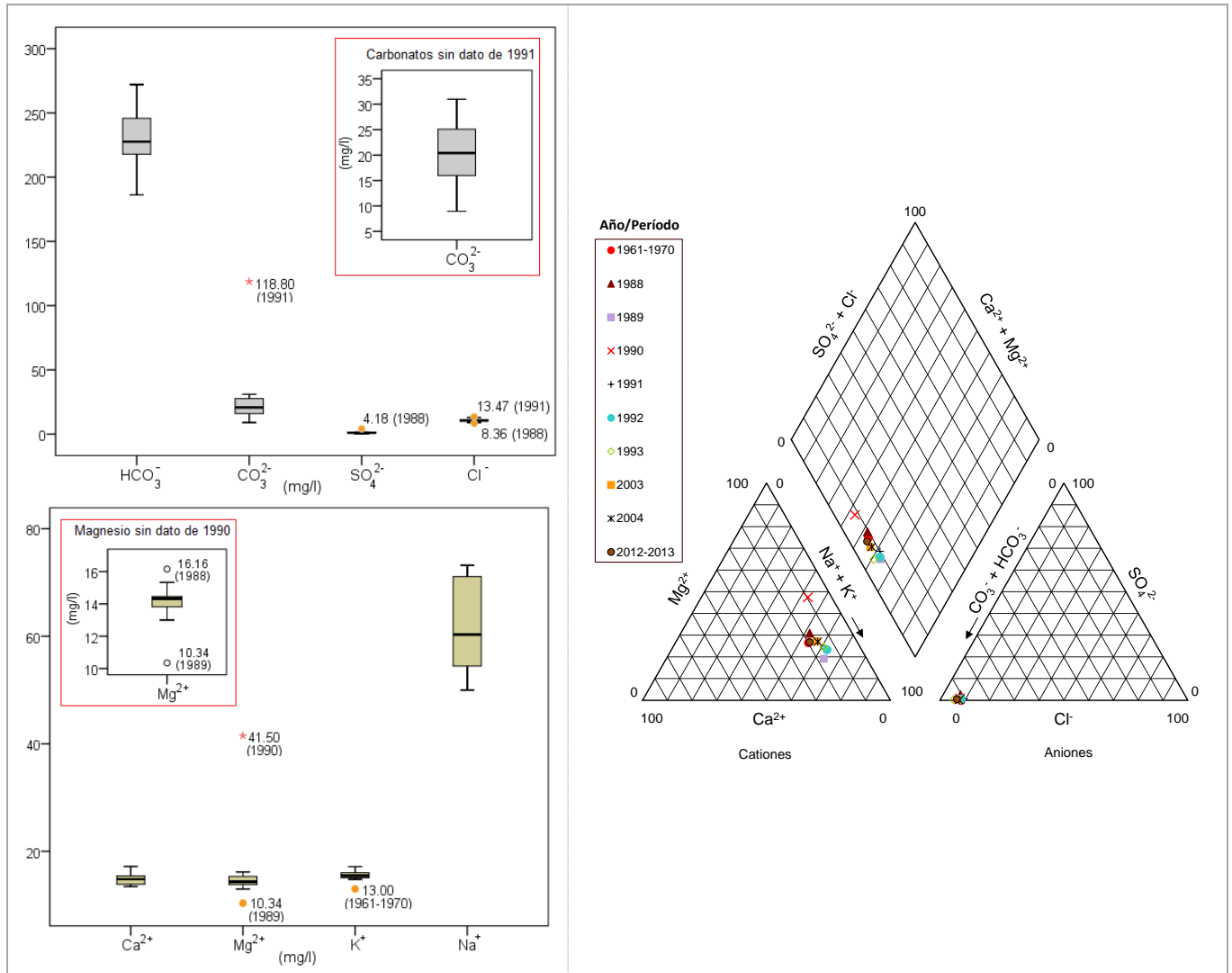


Gráfico 8. Distribución de la concentración de iones mayores y, tipo hidroquímico, entre 1961 y 2012.

Iones mayores: Cationes: boxplots a la izquierda superior y, Aniones: a la izquierda inferior.

Tipo Hidroquímico: Diagrama de Piper, a la derecha.

Luego, en algún momento durante los siguientes diez años (1993 a 2003-2004) se redujo nuevamente, lo que se refleja en los 217.84 mg.l⁻¹ del 2004. Posteriormente, en 2012-2013 se registraron 255.66 mg.l⁻¹, dándose un incremento del 17.36% respecto al 2004.

El pico (máximo histórico) de CO_3^{2-} de 1991 (118.79 mg.l^{-1}), es un valor anómalo que altera tanto la media como la DE del registro completo (1961-2012). Dicho valor es casi 4 veces mayor que el dato más cercano, el del año 2003 (30.98 mg.l^{-1}); al omitirse de la BBD, las concentraciones que sobresalen como las máximas son las de 1989 (25.08 mg.l^{-1}) y 2003 (30.98 mg.l^{-1}). Las concentraciones mínimas son las de 1993 (11.27 mg.l^{-1}) y el 2012-2013 (8.96 mg.l^{-1}).

De los análisis realizados para determinar SO_4^{2-} , durante 1961-1970, se ha reportado únicamente un promedio de 0.0 mg.l^{-1} , lo mismo que para 1976. Sin embargo, doce años después, en 1988, el promedio fue de 4.18 mg.l^{-1} , siendo por mucho el máximo de todos los valores registrados. Esto sugiere que entre 1977 y 1987 hubo un aumento del anión indicado, a pesar de desconocerse si dicho aumento fue gradual o repentino. Por el contrario, sí hay certeza de una reducción significativa (del 59.7%) entre el '88 y '89 pasando de 4.18 a 1.69 mg.l^{-1} .

A continuación y siguiendo el mismo patrón, se dio un descenso casi lineal llegando a los 0.24 mg.l^{-1} en 2004, esto es, la concentración de este último año fue 7 veces menor que la de 1988, implicando una fuerte reducción del 86%. Ocho años después, en el 2012, su valor aumentó nuevamente hasta alcanzar 1.16 mg.l^{-1} , casi quintuplicándose (384.43%) en al 2004.

En cinco décadas, el Cl^- ha tenido dos momentos de descenso, así como dos de aumento. El primer descenso, de los '60s al año 1988, con una reducción del 24.04% (de 11 a 8.36 mg.l^{-1}) y el segundo, de 1991 a 1993, con una reducción del 32.56% (de 13.47 a 9.09 mg.l^{-1}). Los aumentos, el primero del 61.21%, entre 1988 (8.36 mg.l^{-1}) y 1991 (13.47 mg.l^{-1}) y el segundo, con un modesto 16% entre 1993 (9.09 mg.l^{-1}) y el 2012-2013 (10.54 mg.l^{-1}). (Gráfico 9 en el texto y 41-42 en anexos)

En lo referente a los cationes, el Ca^{2+} , entre los '60s y 2004, tuvo un descenso casi lineal, desde 16 hasta 13.45 mg.l^{-1} , siendo esta una reducción de cerca del 16%. Ocho años más tarde, en 2012, incrementó en un 27.73% hasta un máximo histórico de 17.17 mg.l^{-1} , superando de esta manera las concentraciones del registro completo (últimos 50 años).

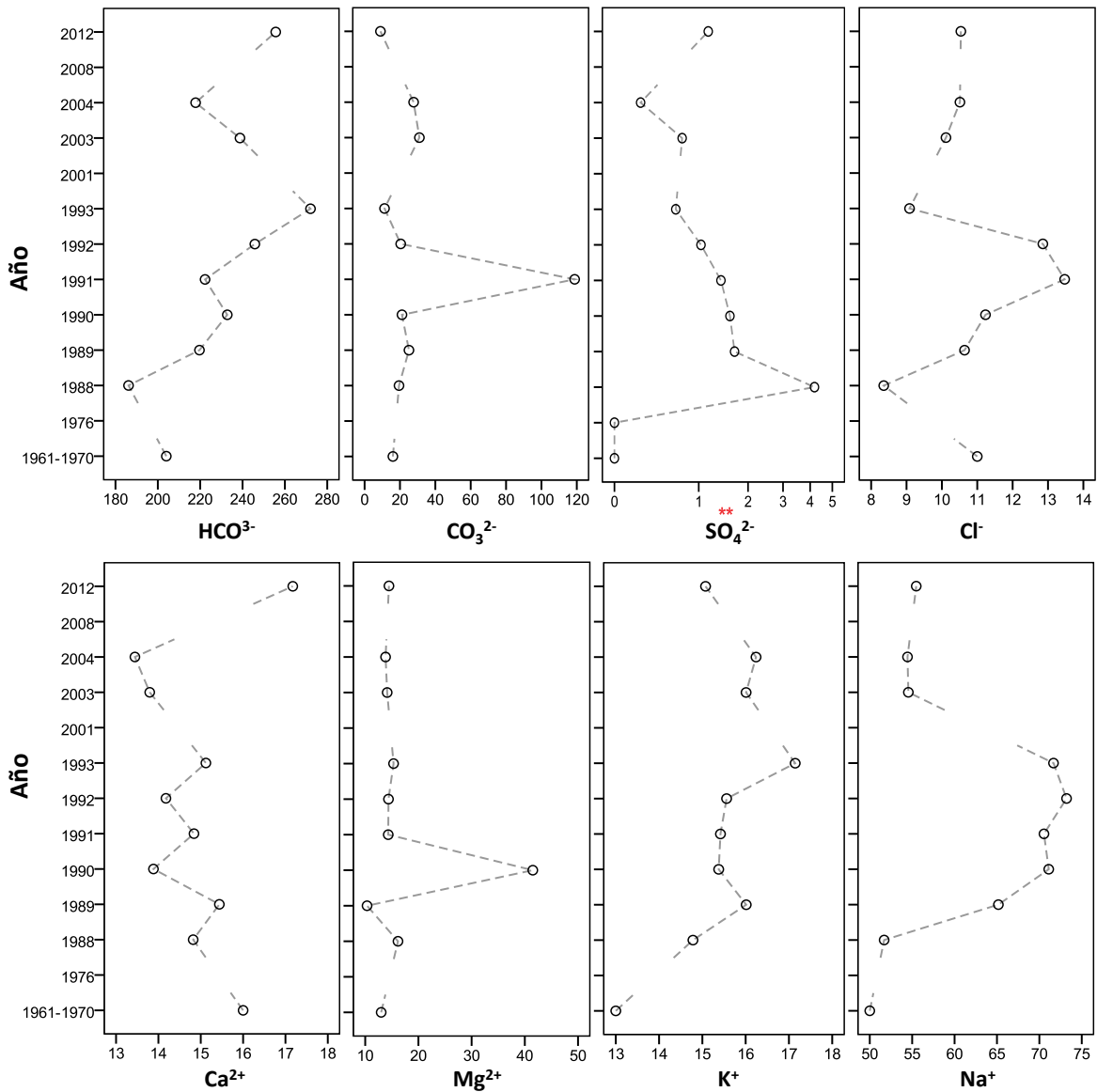


Gráfico 9. Comportamiento temporal de las concentraciones de los cationes y aniones principales, entre 1961 y 2012

**Concentraciones reflejadas en escala logarítmica, para apreciar los cambios.

La concentración de Mg^{2+} ha variado sin tener un comportamiento definido, con múltiples aumentos y descensos. Las apreciaciones sobre el valor máximo y su efecto sobre la DE han sido mencionadas al inicio de este acápite.

Tanto el K^+ como el Na^+ con un comportamiento de función cuadrática, ambos con incrementos de su concentración a inicios de los '90s (1992-1993) en relación a la década del '60, el primero pasando de 13.00 a 17.14 $mg.l^{-1}$, siendo este un aumento del 31.88% y, el segundo de 50.00 a 73.21 $mg.l^{-1}$ (+ 46.41%). E igualmente ambos, con descensos ocurridos durante la última década (1992-2012), con reducciones del 12% para el K^+ (de 17.14 a 15.07 $mg.l^{-1}$) y otra del 25% para el Na^+ entre el '92 y 2004 (bajando de 73.21 a 54.45 $mg.l^{-1}$), aunque 8 años después con un leve aumento de casi el 2% subiendo a 55.48 $mg.l^{-1}$.

IV.1.9. Alcalinidad y dureza

La *alcalinidad total* (Gráfico 10) ha ido incrementando gradualmente desde 181.51 hasta 237.19 $mg.l^{-1}$ entre 1988 y 2012 respectivamente, alcanzando su máximo (241.83 $mg.l^{-1}$) en 1993.

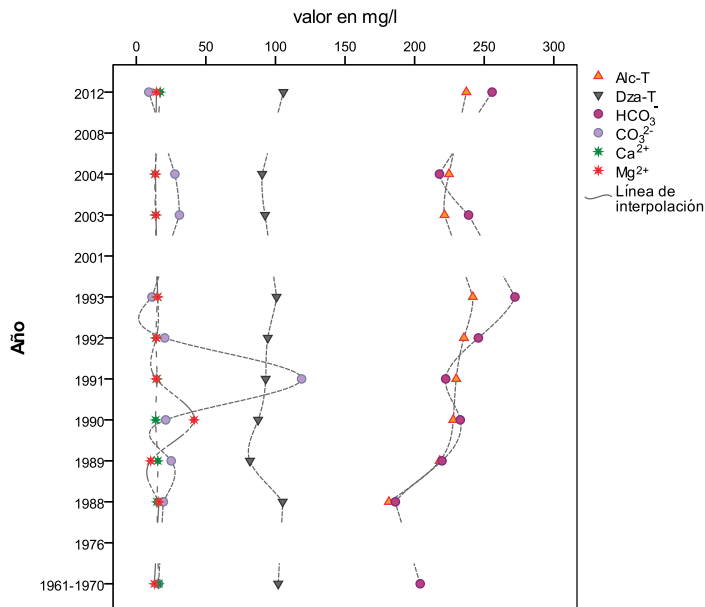


Gráfico 10. Comportamiento temporal de alcalinidad y dureza total en relación con CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} (1988-2012).

Sin embargo, el 88.89% de los registros osciló entre 218.03 y 241.83 $mg.l^{-1}$, estando únicamente por debajo de dicho rango el valor del '88.

Entre la década de los '60s y finales de los '80s la *dureza total* se redujo alrededor de un 17%, de 105.17 a 81.64 mg.l⁻¹, aunque 4 años más tarde aumentó nuevamente llegando a 100.78 mg.l⁻¹ en 1993. A ello le acompañó otra disminución del 10.25% en 2004 y una recuperación del valor en 2012 (105.7 mg.l⁻¹).

Por sí solo, el Ca²⁺ tiene baja correlación (r: ~0.53) con la *dureza total*. La del Mg²⁺, por el contrario, es más alta y significativa (r: 0.74). Por ello, el aporte conjunto (suma) de las concentraciones de ambos cationes tiene alta correlación (r: 0.94) con la dureza (Gráfico 11A).

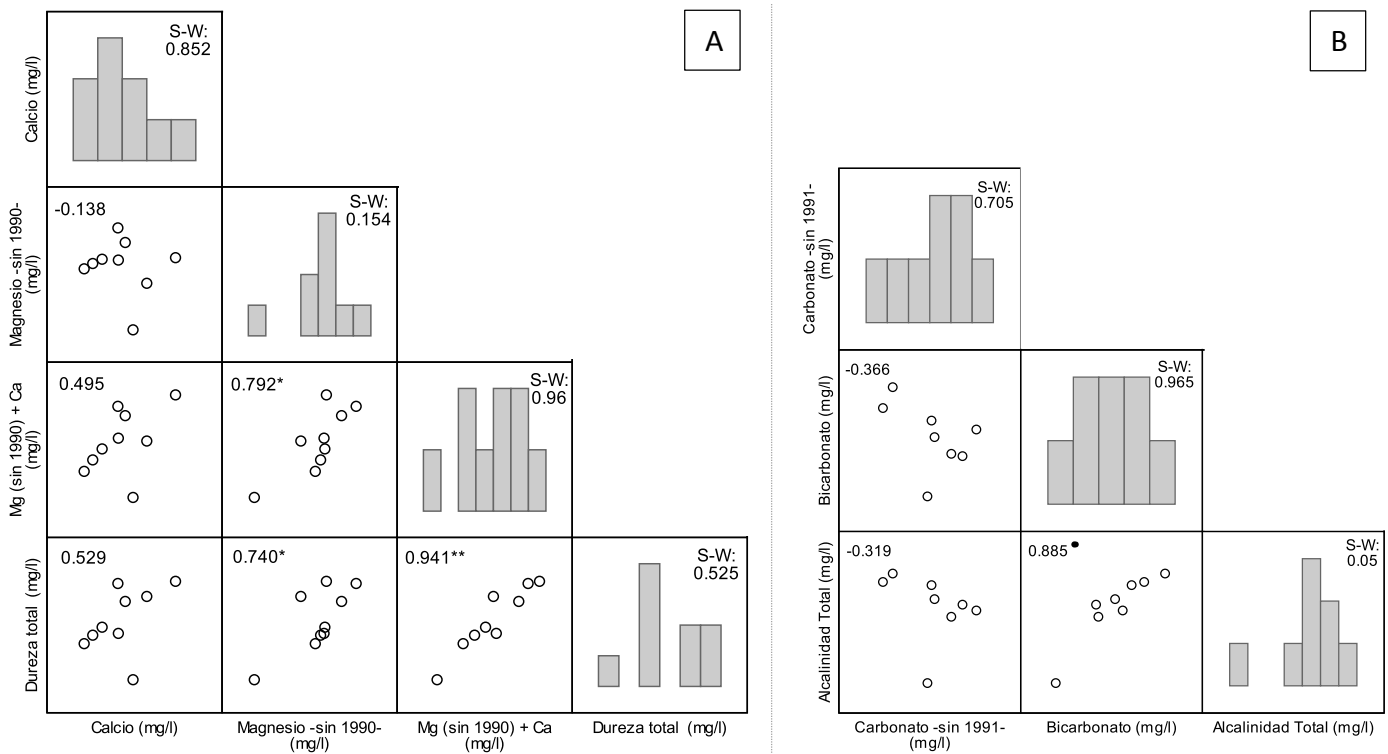


Gráfico 11. Correlación entre dureza (A) y alcalinidad (B), con Ca²⁺, Mg²⁺ y HCO₃⁻ (1988-2012).

Según test de Shapiro-Wilk (S-W) las variables tienden a la Normal, por ello se utilizó la correlación de Pearson.

Simbología: A) * La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral). ** Correlaciones.

B) • La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Por otro lado, la alta correlación (r: ~0.89) del HCO₃⁻, en contraposición al bajo valor del CO₃²⁻ (r: -0.32), con la *alcalinidad total*, sugiere que ésta se debe al aporte de los iones de HCO₃⁻, fundamentalmente (Gráfico 11B).

IV.1.10. Sílice disuelta

La concentración de *sílice disuelta* ha aumentado desde la década de los '60s, de 3.4 mg.l^{-1} hasta más de 20 mg.l^{-1} en 2004, con un leve descenso a inicios de los '90.

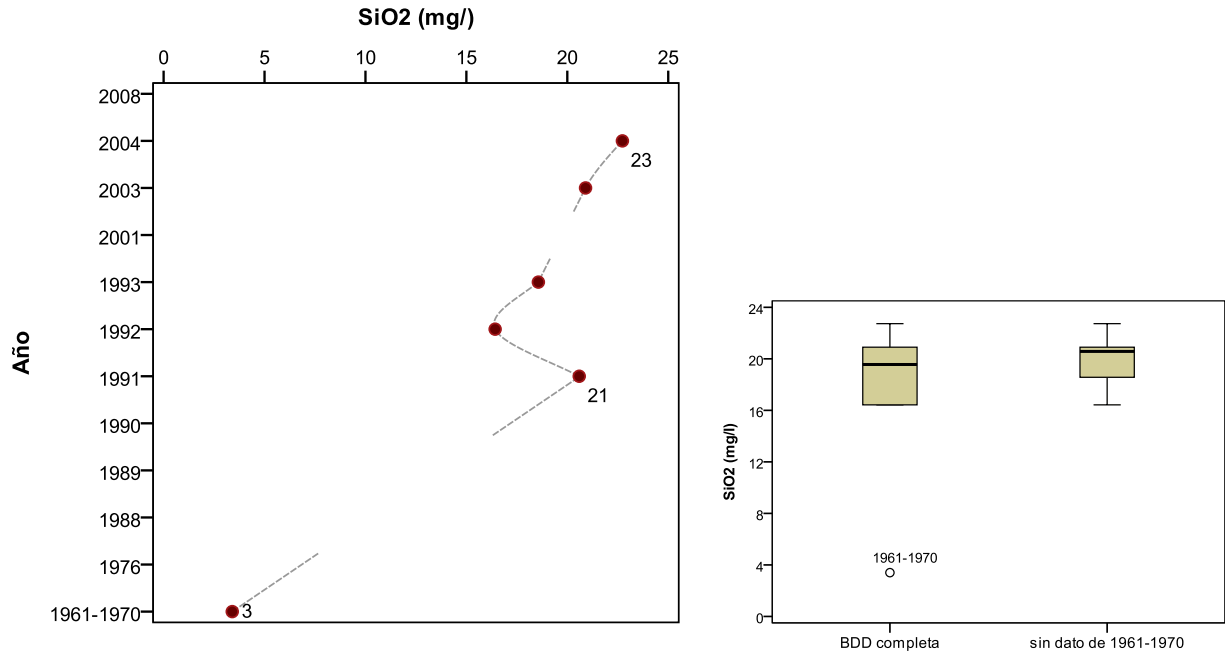


Gráfico 12. Valores promedio de la sílice disuelta ('60s al 2004).

Con el dato mínimo extremo de la década de los '60s (Gráfico 12: diagrama de cajas de la izquierda) el promedio de sílice es de 17.11 mg.l^{-1} (± 7.05), en un rango que va de 3.4 a 22.73 mg.l^{-1} ; pero sin éste (diagramas de cajas de la derecha), la media es de 19.84 (± 2.41), con una DE y un rango (16.43 a 22.73 mg.l^{-1}) 3 veces inferiores (Tabla 14 en anexos).

IV.1.11. Resumen de las tendencias ('60s hasta la actualidad)

Durante los últimos 50 años o menos, las tendencias de los parámetros físico-químicos indican que el Lago Masaya tiene un pH *básico*; desde finales de los '80s e inicios '90s, el OD ha disminuido considerablemente aunque con una leve recuperación en la actualidad (2012-2013). La temperatura del lago ha aumentado levemente y se ha dado una dismunción gradual de la DQO y significativa de la DBO₅.

Entre 1989 y 2008 el lago tuvo una reducción considerable de nitratos y nitritos y, por el contrario, un aumento sustancial del amonio. Con un comportamiento diferente a las especies nitrogenadas, tanto el FT como el FTD con variaciones, por lo que cabe mencionar dos aspectos: la reducción del FT de finales de los '80s, coincidente con el aumento de nivel del Lago (superficie en 121.58 msnm), un año después del huracán Joan (NOAA(b), 2014) y con una concentración mínima para todo el período registrado correspondiente a la más reciente (2012). Por otro lado, El Lago está potencialmente limitado por fósforo y al parecer la relación NT:PT está aumentando y al menos desde los '80s ha fluctuado entre *mesotrófico-eutrófico* hasta *hipereutrófico*, presentando aparentes 'señales de recuperación' (*mesotrófico*) en la actualidad (2010-2012).

Entre los '60s y el 2012 tanto los STD como la CE han fluctuado sin un comportamiento específico: reducción entre los '60s y '80s, aumento gradual hasta inicios de los '90s y el mismo comportamiento (descenso-aumento-descenso) entre 2004-2008 y 2012. Los picos de CE en 1991 y 2008, acompañados de descensos en los STD y turbidez (Gráfico 4B), sugieren más bien aporte de sales y sólidos suspensos posiblemente provenientes de la subcuenca justo después de los huracanes Joan en 1989 y Félix en el 2007 (INETER, 2014; NOAA(b), 2014) y no tanto de resuspensión de nutrientes ni de material disuelto.

Por otro lado, el carácter hidroquímico predominante del agua es bicarbonatado sódico, en correspondencia con los tipos hidroquímicos predominantes en el sector

norte de la subcuenca²⁵, así como con el origen del Lago, proviniendo los bicarbonatos de aguas de reciente infiltración y los cationes predominantes (sodio y magnesio) de la dilución de las rocas.

La dureza total, aportada fundamentalmente por el magnesio, sin una tendencia definida, con múltiples descensos y aumentos. Por el contrario, la alcalinidad total –fundamentalmente debida al aporte de los bicarbonatos– en franco aumento desde finales de los '80s (Gráfico 11).

Finalmente, la *sílice disuelta* ha aumentado desde la década de los '60s.

²⁵ oeste y noroeste del cuerpo de agua.

IV.2. Actividad total del ^{210}Pb y Tasa de Sedimentación

La actividad total del ^{210}Pb osciló de 9.15 a 104.09 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, con una media de 59.03 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (DE: ± 26.18). La masa seca acumulada varió desde los 0.03 a los 3.28 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, con un valor medio de 1.45 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (DE: ± 0.99) (Tabla 15 en anexos).

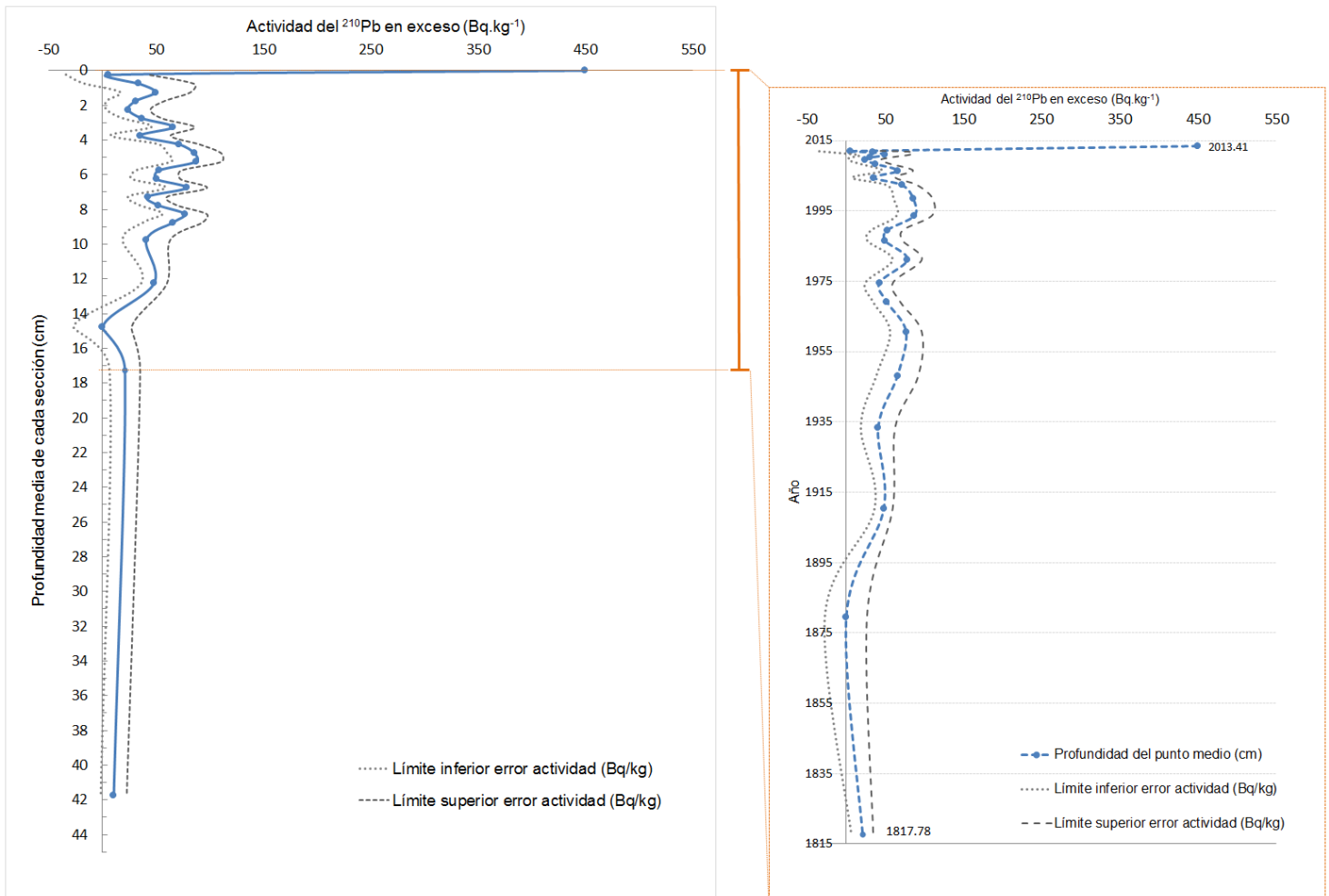


Gráfico 13. Decaimiento de la actividad de ^{210}Pb en exceso versus la profundidad del core.

Izquierda: actividad en exceso versus profundidad del core. Derecha: actividad versus fecha. La zona datable (1817 al 2013) corresponde a los primeros 17.25 cm del core.

Por otro lado, la actividad total del ^{210}Pb en exceso (Gráfico 13) no presenta el decaimiento exponencial típico esperado según lo reflejado en la literatura (Appelby, 1998; Bernal et al., 2010). Sin embargo, el modelo CRS soporta este tipo de

irregularidades (Víctor Martínez CIRA/UNAN-Managua, comunicación personal, Mayo 2014).

En este mismo sentido, se observa una disminución de la actividad del ^{210}Pb a medida que se profundiza en el Core, alcanzando los mayores picos de actividad en la capa superficial y luego entre los centímetros 3 y 12.

El período datado corresponde a los años comprendidos entre 1817 y el 2013, descartándose las fechas entre 1817-1879 y por lo tanto, también las fechas anteriores a 1817, debido a la imprecisión (error) creciente de la estimación, alcanzando su cota máxima de casi ± 194 años en la capa más profunda, en el centímetro 17.25, esto es: 1817 ± 193.78 años. De modo que la longitud temporal a la que se restringe este trabajo es de poco más de 130 años, desde cerca del año 1880 (1879.5) hasta el 2012-2013, con errores de estimación razonables (Gráfico 14).

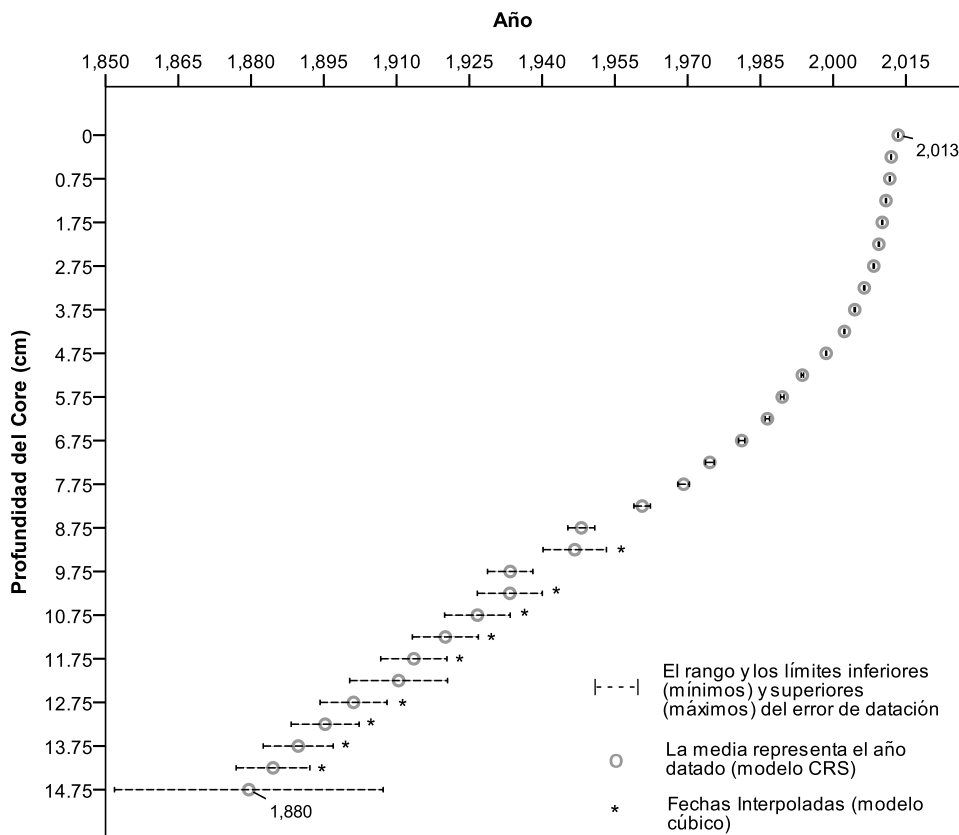


Gráfico 14. Fechas obtenidas con el modelo CRS.

Se reflejan las fechas (círculos) y los errores de estimación (barras horizontales).

Por otro lado, la tasa de sedimentación del Lago Masaya, al menos en el punto de extracción de los cores, durante los últimos 100 años (1910-2012) ha oscilado en un rango de 0.004 a 0.1761 g.cm⁻².año⁻¹, con una mediana de 0.0413 g.cm⁻².año⁻¹.

Se encontró correlación altamente significativa ($r=0.937$, $p=0.000$) entre la tasa de sedimentación con el tiempo transcurrido (años), lo cual se refleja en su curva de crecimiento, en la cual la tasa aumenta exponencialmente ($R^2=0.879$, $p=0.000$) desde inicios del s. XX (1900s) hasta finales de la década del 2000s.

Lo anterior se visualiza en el Gráfico 15, en el que se presentan las curvas de mejor ajuste, tanto para los datos de la variable original como para los de la variable transformada, esta última elaborada debido a la necesidad de normalizar los datos, para ello se aplicó logaritmo natural a los datos originales.

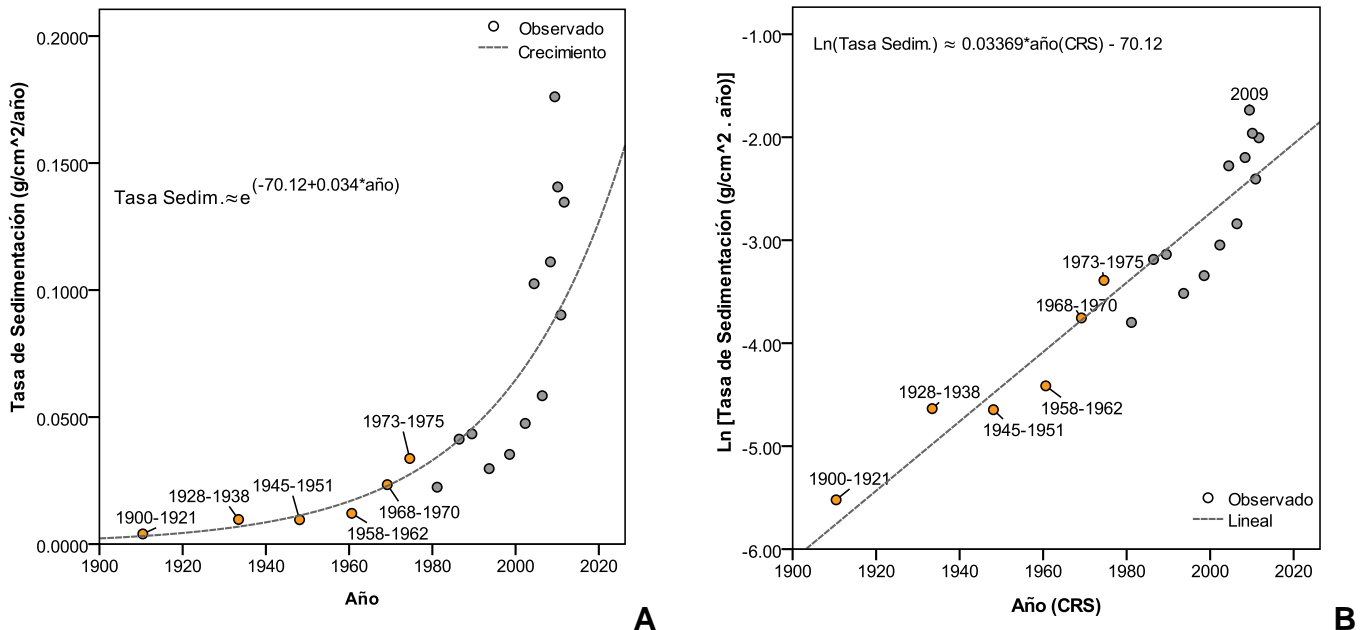


Gráfico 15. Curvas de mejor ajuste para la Tasa de Sedimentación.

Gráficos elaborados en base a la variable original (A) y la variable transformada (B). Los círculos naranja corresponden a valores (de la variable) válidos para rangos de fechas y los grises para fechas puntuales.

Los valores extremos *mayores* corresponden a la última década (después del 2000) y los *menores* a inicios del s. XX, en correspondencia con el tipo de tendencia descrita anteriormente.

IV.3. Metales pesados en sedimentos

IV.3.1. Concentración de metales pesados

Seguidamente se detalla el comportamiento cronológico (Gráfico 16) de las concentraciones de Al, Cd, Cr y Pb, en 20 secciones analizadas del Core datado, con énfasis en los primeros 15 cm (secciones fechadas, ZD: 1879-2012). El Cr no fue detectado en la sección más profunda.

La concentración de Al osciló en un rango entre 9,526.10 y 31,924.46 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con una mediana de 16,681.25 $\mu\text{g.g}^{-1}$, la de Cd osciló entre 2.31 y 6.40 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con una mediana de 4.67 $\mu\text{g.g}^{-1}$, la de Cr entre 2.31 y 10.99 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con un valor mediano de 4.99 y finalmente, la de Pb entre 33.73 y 49.25 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con un promedio de 43.91 $\mu\text{g.g}^{-1}$ (± 4.81).

Los valores restringidos a la ZD fueron: Al entre 9,783.14 y 31,924.46 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con un promedio de 18,897.15 $\mu\text{g.g}^{-1}$ ($\pm 6,333.94$), Cd entre 2.31-5.17 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con una mediana de 4.45 $\mu\text{g.g}^{-1}$, Cr entre 2.94-10.73 $\mu\text{g.g}^{-1}$, con un valor mediano de 5.18 $\mu\text{g.g}^{-1}$ y, la de Pb entre 33.73-49.25 $\mu\text{g.g}^{-1}$ con un valor de 46.42 $\mu\text{g.g}^{-1}$ para la mediana.

En este estudio se sugiere considerar como concentraciones de fondo de los metales analizados, los valores mínimos, siendo estos los valores indicados con líneas punteadas (color rojo) en el Gráfico 16.

Tanto las concentraciones de Al como de Cd se distribuyen normalmente, pero no así las de Cr y Pb (Tabla 29 en anexos).

Metales versus profundidad

Además, se evaluó la relación entre metales con la profundidad, variable asociada con las fechas en que se depositaron en el Lago.

Se encontró que únicamente existe correlación entre Al y Cd con la profundidad, siendo negativa para el Al ($r = -0.623$, $p = 0.003$, $n = 20$), positiva para el Cd ($r = 0.806$,

$p=0.000$, $n=19$) y en ambos casos altamente significativa ($\alpha:0.01$); es decir, en las secciones más profundas/antiguas hay más concentración de Cd que en las más superficiales/recientes, ocurriendo lo inverso con el aluminio (Tabla 30 en anexos).

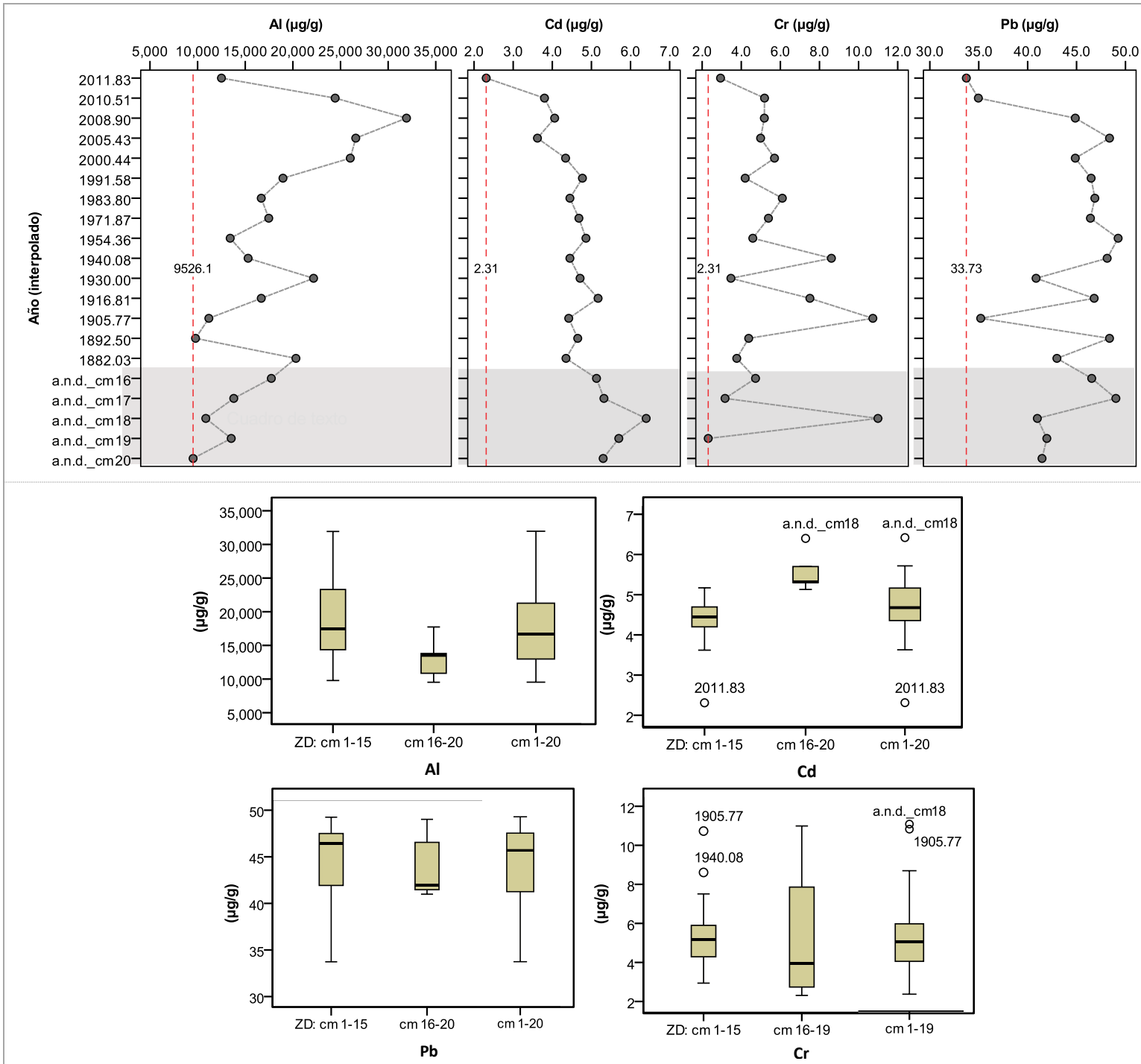


Gráfico 16. Concentración de Al, Cd, Cr, Pb en sedimentos (Core 01) del Lago Masaya
Se reflejan la distribución global (gráfico de cajas) y la variación cronológica (diagramas de dispersión).

La concentración máxima de Al ($31,924.5 \mu\text{g.g}^{-1}$) data del 2008-2009 y la mínima de finales del s. XIX, aproximadamente de 1892, aunque anterior a esta fecha, el Al tuvo una concentración aún menor ($\sim 9,526 \mu\text{g.g}^{-1}$), asociada al cm 20. Los máximos incrementos observados ocurrieron entre el cm 20 e inicios de la década 1880-1890 el primero, entre inicios de 1890-1900 y 1930 el siguiente, y entre mediados de los '50s y finales del 2008 el último.

Contrario al aluminio, la concentración máxima de Cd ($10,859.4 \mu\text{g.g}^{-1}$) se obtuvo para las capas más profundas no datadas (ej.: cm 18) y la mínima ($2.31 \mu\text{g.g}^{-1}$) en las más superficiales (año 2012).

El descenso del Cd es más notorio que el aumento del Al.

En cuanto al Cr, aunque este parece no estar correlacionado con la profundidad, la variabilidad de sus concentraciones se redujo desde las capas más profundas hacia las más superficiales, pasando la DE de ± 3.92 en las secciones más profundas (cm 16-19), a ± 2.98 en las secciones intermedias (cm 10-15) entre 1882 y 1940, hasta ± 0.93 en las secciones más recientes (cm 1-9) entre 1950 y 2012.

El Pb no refleja tendencias marcadas como en los otros metales. Sin embargo, el 85% de los casos (cm 3-12 y del 14-20) osciló entre 40.9 a $49.3 \mu\text{g.g}^{-1}$, estando fuera de ese rango 3 valores, uno de principios (1905) y dos de finales del s. XX (2010 y 2012), todos por debajo del rango indicado.

Metales versus tasa sedimentación

La tasa de sedimentación no se correlaciona con la concentración de Cr y Pb, pero sí con la de Al y Cd (Gráfico 17), lo que era de suponerse según el patrón descrito anteriormente, siendo positiva entre el Al y la tasa de sedimentación ($r=0.491$, $p=0.036$, $n=11$), negativa entre el Cd y la tasa de sedimentación ($r=-0.564$, $p=0.016$, $n=11$) y, en ambos casos significativas ($p_{\text{valor}} < \alpha: 0.05$).

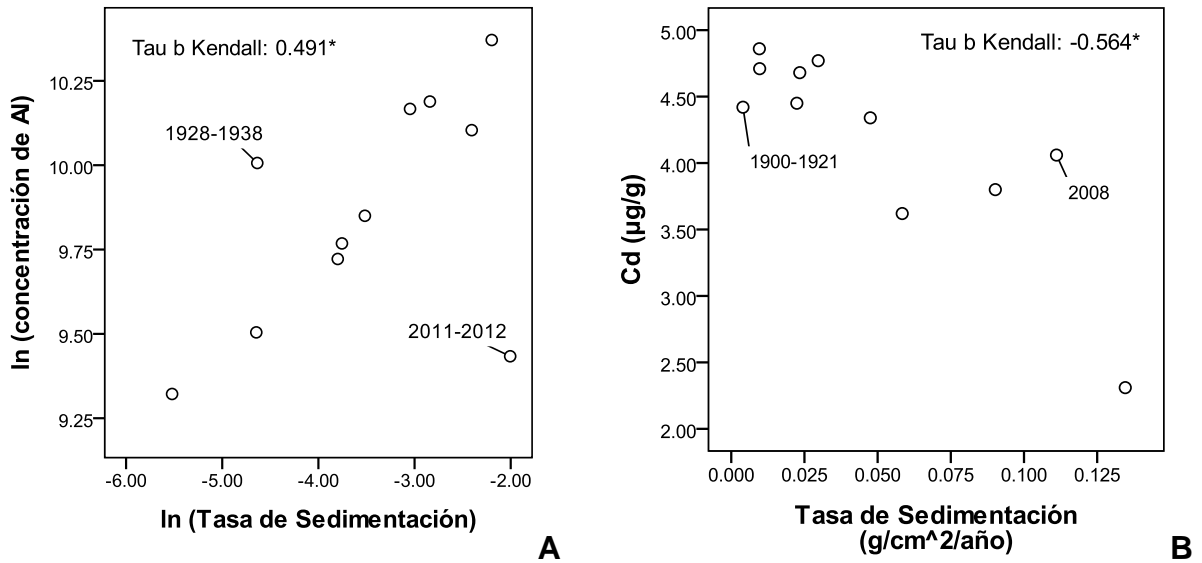


Gráfico 17. Correlación entre la tasa de sedimentación y la concentración de Al y Cd

Es decir, a medida que aumentó la tasa de sedimentación en la zona central del Lago Masaya desde principios del s. XX, también aumentó la concentración de Al y disminuyó la de Cd en sedimento (Tabla 30 en anexos).

IV.4. Diatomeas

IV.4.1. Riqueza


De las secciones analizadas (n:25), esto es, del perfil completo (PC), el cual incluye las secciones datadas (cm 1 al 15)²⁶ y las no datadas (cm 16 en adelante)²⁷, se identificó un total de 46 taxa de diatomeas (Tabla 2 en el texto y 19 en anexos). De éstas, 32 presentes en la **zona datada** y 42 en la **zona no datada**. En la ZD no se reportan 14 de las taxa presentes en fechas anteriores (ZND).

Tabla 2. Taxa de Diatomeas Identificadas

PC	ZD	ZND	Taxa	PC	ZD	ZND	Taxa	PC	ZD	ZND	Taxa
1			<i>Achnanthes exigua</i>	17			<i>Fragilaria construens</i>	33			<i>Navicula sp. N°2</i>
2			<i>Achnanthes minutissima</i>	18			<i>Fragilaria pinnata</i>	34			<i>Navicula sp. N°3</i>
3			<i>Achnanthes sp.</i>	19			<i>Fragilaria (Synedra) ulna*</i>	35			<i>Nitzschia acicularis</i>
4			<i>Amphora sp.</i>	20			<i>Fragilaria sp.</i>	36			<i>Nitzschia amphibia</i>
5			<i>Anemoeoneis sp.</i>	21			<i>Gomphonema affine</i>	37			<i>Nitzschia amphioxys</i>
6			<i>Aulacoseira granulata</i>	22			<i>Gomphonema parvulum</i>	38			<i>Nitzschia claussi</i>
7			<i>Caloneis sp.</i>	23			<i>Luticula mutica</i>	39			<i>Nitzschia palea</i>
8			<i>Cyclostephanos dubius</i>	24			<i>Mastogloia sp</i>	40			<i>Nitzschia sp.</i>
9			<i>Cyclotella meneghiniana</i>	25			<i>Navicula confervacea</i>	41			<i>Nitzschia sp. N°1</i>
10			<i>Cyclotella stelligera</i>	26			<i>Navicula constans</i>	42			<i>Pinnularia sp.</i>
11			<i>Cymbella sp.</i>	27			<i>Navicula cryptocephala</i>	43			<i>Pinnularia sp. N°1</i>
12			<i>Cymbella sp. N°1</i>	28			<i>Navicula halophila</i>	44			<i>Pinnularia sp. N°2</i>
13			<i>Cymbella sp. N°2</i>	29			<i>Navicula ovalis</i>	45			<i>Rhopalodia gibba</i>
14			<i>Epithemia sp.</i>	30			<i>Navicula pupula</i>	46			<i>Stauroneis sp.</i>
15			<i>Eunotia sp.</i>	31			<i>Navicula sp.</i>				
16			<i>Fragilaria acus</i>	32			<i>Navicula sp. N°1</i>				

*Sinónimo: *Synedra ulna*

PC: Perfil completo; ZD: Zona Datada; ZND: Zona No Datada

Taxa:  Presente en PC en ZD en ZND Ausente

Hay 4 taxa *únicas* en la ZD, es decir, únicamente identificadas en la ZD y, 14 en la ZND. La diferencia entre las taxa totales del perfil completo y las especies “únicas” indica el número de taxa compartidas entre ambas zonas, en este caso de 28.

²⁶ Secciones de la Zona Datada (ZD).

²⁷ Secciones de la Zona No Datada (ZND).

El total de taxa identificadas para el PC se agrupa en 19 géneros; de éstos 14 en la ZD y 18 en la ZND. Para todos los casos: PC, ZD y ZND, el promedio general de taxa/género es ligeramente mayor a 2, siendo respectivamente 2.42, 2.8 y 2.33 taxa y, los géneros por encima de dicho promedio son, en orden de importancia: *Navicula sp.*, *Nitzschia sp.*, *Fragilaria sp.*, *Achnanthes sp.*, *Cymbella sp.*, *Pinnularia sp.*, *Cyclotella sp.* y *Gomphonema sp.*, aunque en la ZD no se reporta *Pinnularia sp.* (Gráfico 18).

Al igual que las taxa únicas, también se reportan géneros identificados únicamente en una de las zonas: *Mastogloia sp.* se observó solamente en la ZD; por su parte, *Pinnularia sp.*, *Epithemia sp.*, *Eunotia sp.*, *Rhopalodia sp.* y *Stauroneis sp.* se reportaron para la ZND y luego ‘ausentes’ en la ZD.

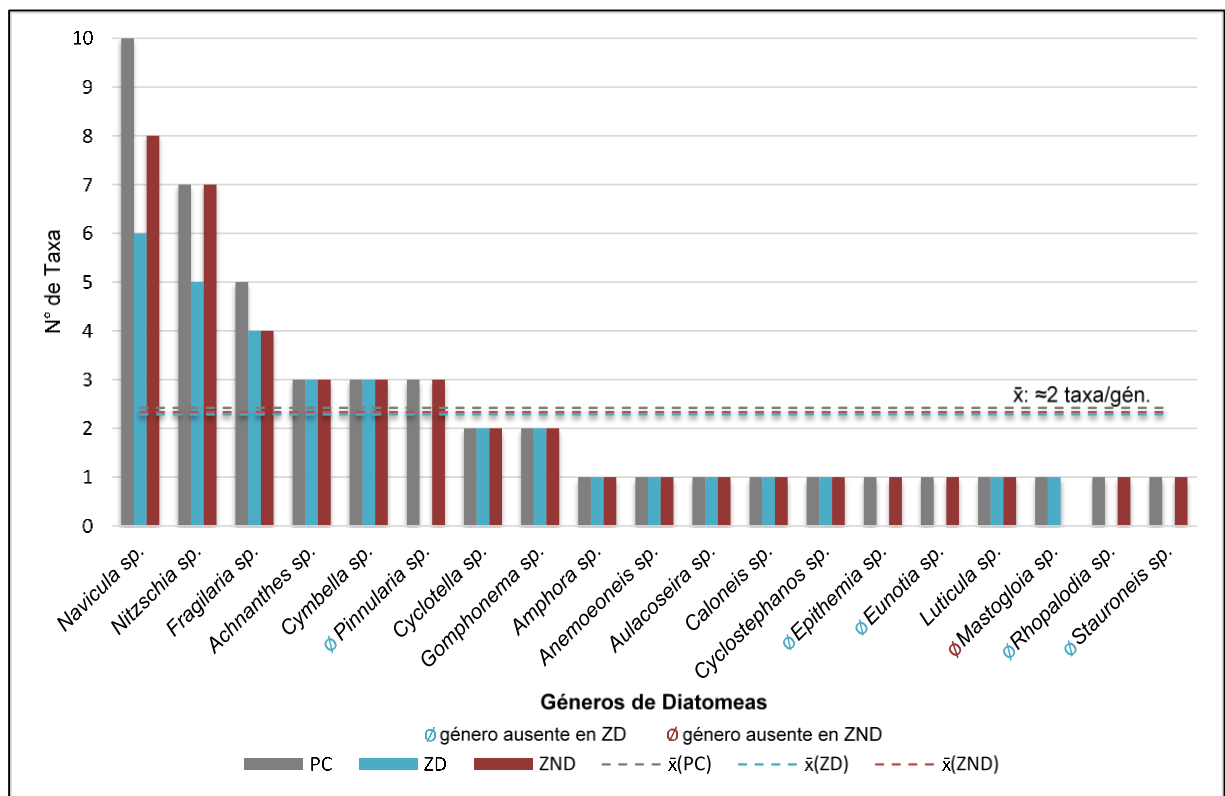


Gráfico 18. Número de especies de diatomeas por género.

Se representan los géneros con mayor riqueza, aquellos que sobrepasan las líneas punteadas que indican el número promedio de especies por género, en este caso 2.

Por otro lado, según la curva de rarefacción o de acumulación de especies elaborada en base los datos del Core datado, aún no se ha alcanzado el número el número total de especies esperadas para el ecosistema estudiado (Gráfico 19).

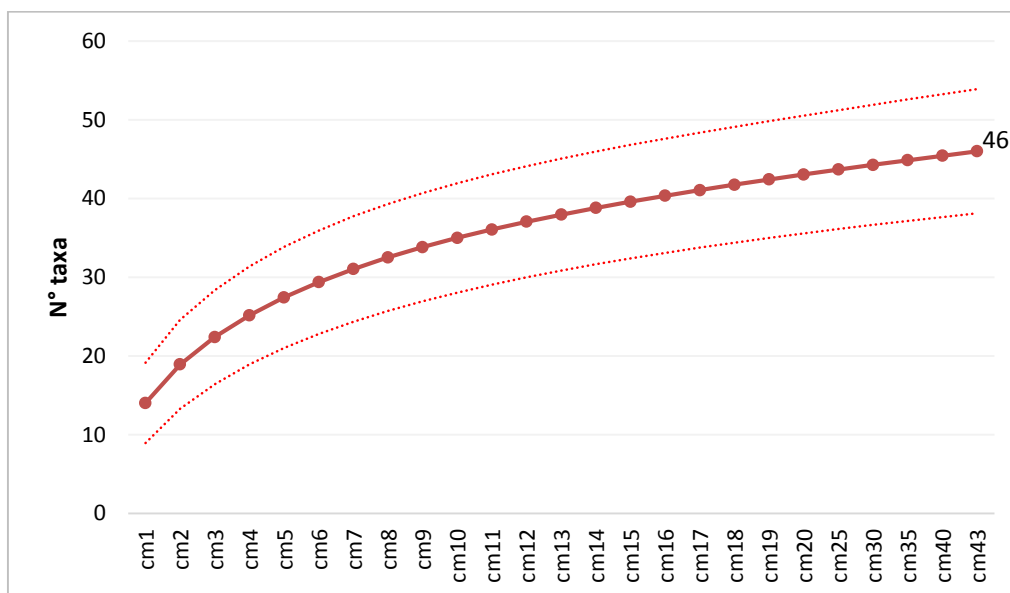


Gráfico 19. Curva de rarefacción para las especies de diatomeas del Lago.

Curva elaborada (línea continua) utilizando el estimador de Mao. Se presenta el intervalo del error con 2 desviaciones estándar (2s), indicado con las líneas punteadas.

Sin embargo, debe hacerse notar que la curva ha sido elaborada en base a resultados de mediciones pseudorreplcadas en base a un solo core y bajo este esquema ‘a una fecha’ corresponde ‘una única sección’ en ‘un único sitio’ del Lago. Si se aumenta el número de cores, los resultados de secciones cronológicamente equivalentes podrían estabilizar la curva en una asíntota que indicaría el total de taxa existentes. En todo caso, las secciones datadas (cm 1-15) corresponden a los pasados 130 años, en un cuerpo de agua cuya edad se sospecha en unos 25 a 100 mil años (Bice, 1985).

IV.4.2. Abundancia relativa y especies representativas

Para facilitar el análisis, fueron seleccionadas las especies más representativas del Lago. Con el propósito de ilustrar lo antes mencionado se elaboró el Gráfico 20,

indicando el número de valvas, abundancia relativa (%) y número de secciones en las que cada una de las 46 taxa identificadas estuvo presente (presencia-ausencia).

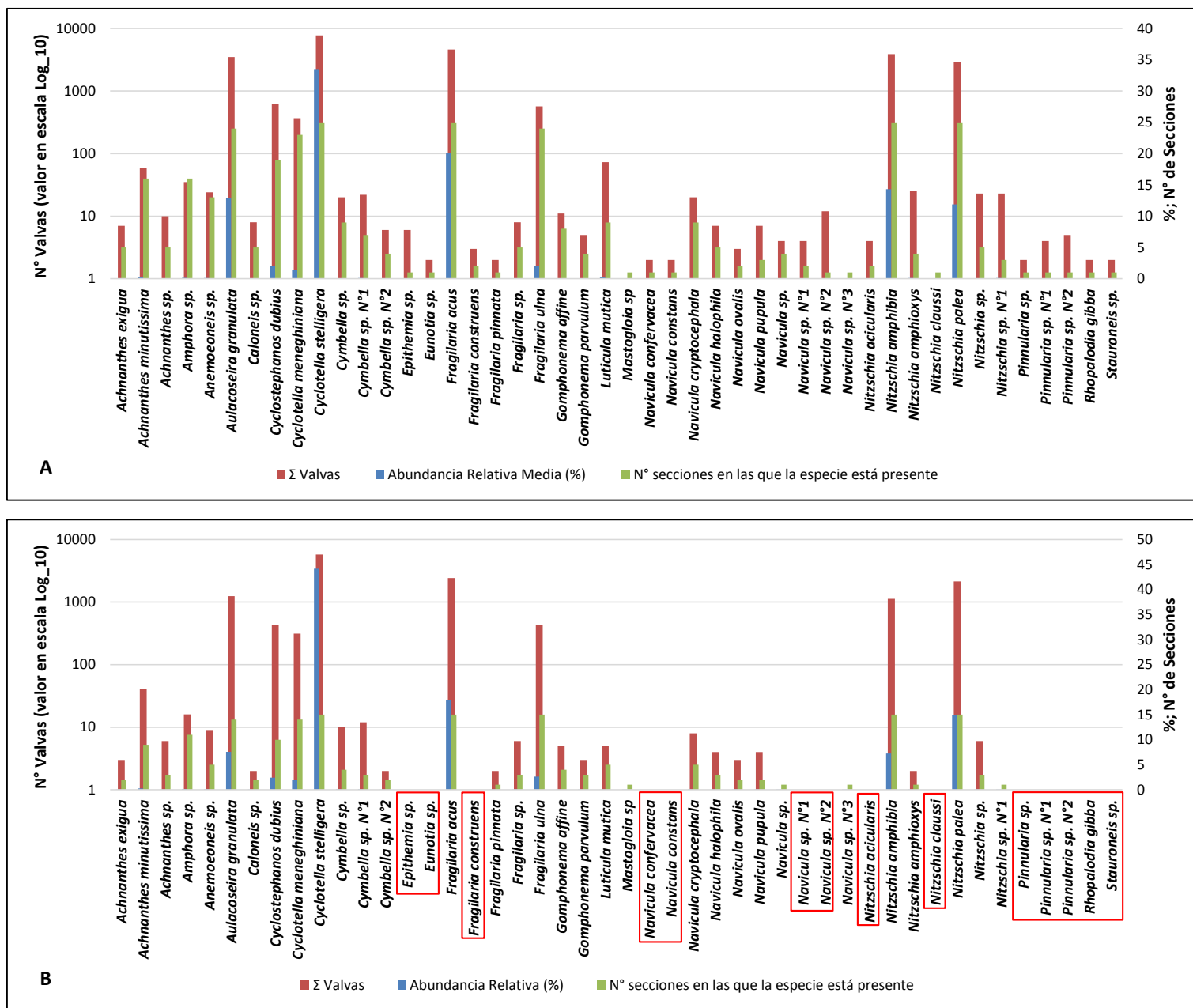


Gráfico 20. Número de valvas, abundancia relativa y secciones en las que se observó cada taxa de diatomea identificada.

El eje secundario de la derecha tiene una misma escala para % y para N° de secciones.

A: taxa en el PC. **B:** taxa en la ZD. En esta última, ausentes las taxa enmarcadas con cuadros rojos.

De modo que las especies *representativas* (las que sobresalen) fueron aquellas cuya *abundancia relativa media total* para las 25 secciones fue mayor al 1% (Tabla 20 en anexos), éstas son: *Aulacoseira granulata*, *Cyclostephanos dubius*, *Cyclotella meneghiniana*, *C. stelligera*, *Fragilaria ulna*, *F. acus*, *Nitzschia amphibia* y *N. palea*.

Nótese que para las especies *no representativas* las barras (azules) que indican la abundancia relativa no se observan en el Gráfico 20, dado que sus abundancias son <1%.

El Gráfico 21 muestra la trascendencia que tiene cada una de las 8 especies más representativas en cada sección analizada.²⁸ En este mismo gráfico se percibe una de las primeras tendencias visibles: en los primeros 10 centímetros *Cyclotella stelligera* es la especie más abundante.

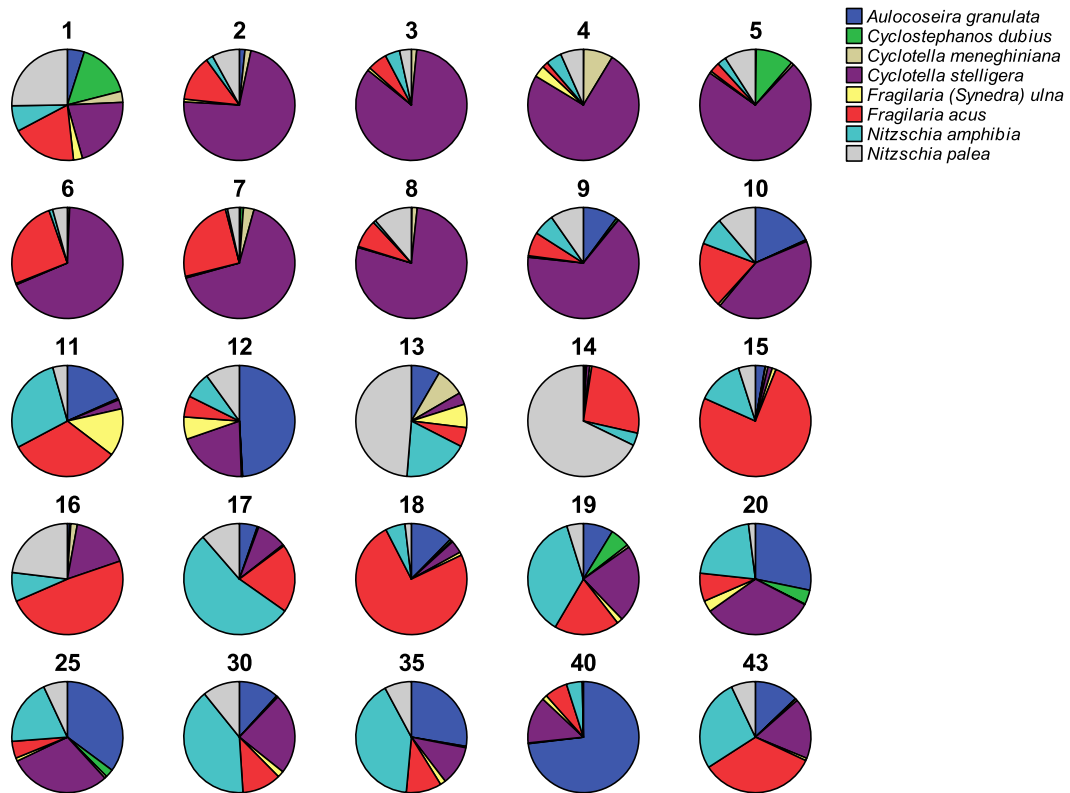


Gráfico 21. Especies más abundantes en cada sección del core analizado

²⁸ cm: 1-20, 25, 30, 35, 40 y 43 del Core 01.

El Gráfico 22 revela que no debería haber cambios sustanciales en cuanto a las especies representativas en aquellas secciones en las que no se identificó diatomeas²⁹, dado que para las secciones previas (más recientes) y posteriores (más antiguas) las 8 especies mencionadas prevalecen y su aporte conjunto, o lo que es igual, la suma de sus abundancias relativas es mayor al 90% en cada una de las secciones, con un promedio global de aproximadamente el 98%.

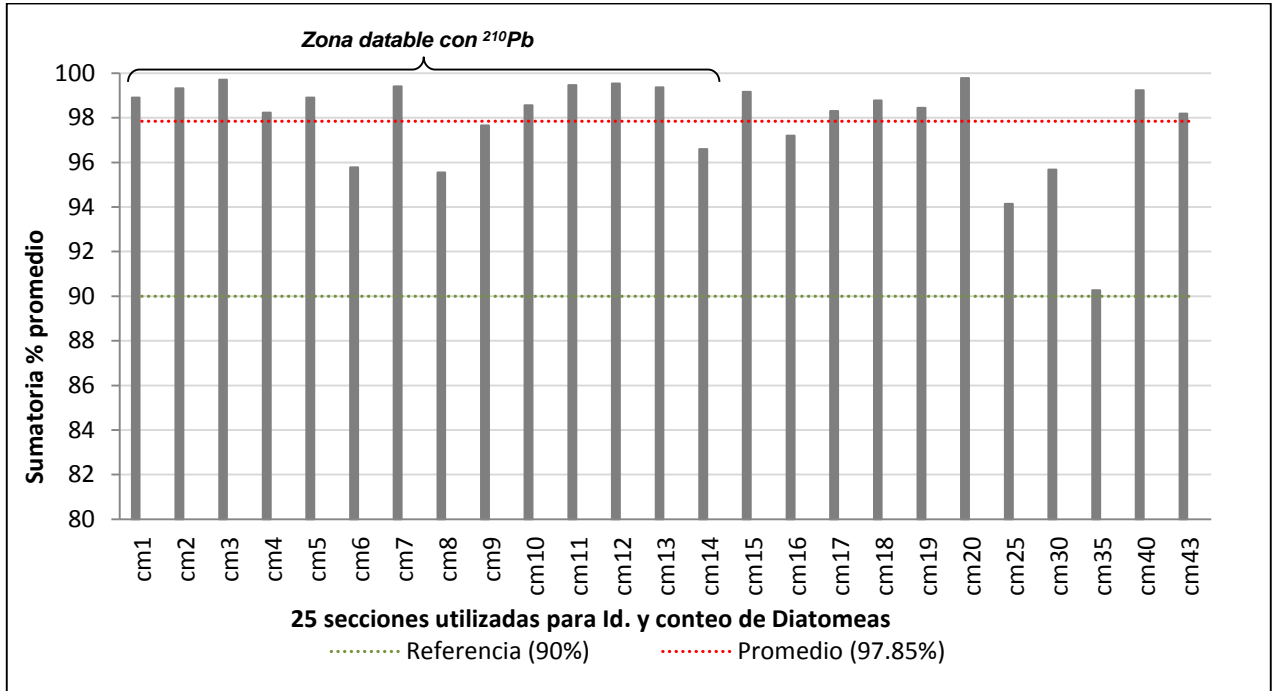


Gráfico 22. Sumatoria de las abundancias relativas de las 8 especies más abundantes para cada sección del Core 01.

Se refleja el porcentaje promedio (línea punteada roja) y el mínimo de referencia (línea punteada verde).

Estas mismas especies, dispuestas en un perfil (Gráfico 23) sugieren tendencias más claras que las observadas en el Gráfico 21. Indicando aquellas secciones (centímetros) del Core en las que se registran cambios sustanciales, por ejemplo, en las que *Cyclotella stelligera* empieza a sobresalir por sobre las especies restantes.

²⁹ cms: 21-24, 26-29, 31-34, 36-39, 41-42; 18 secciones en total

Otro patrón observable en el Gráfico 23 es la existencia de diferentes momentos que pueden ser agrupados en zonas o períodos distintos:

Una zona que se corresponde con las secciones más profundas (cm 19 en adelante) en las que se sugiere un equilibrio entre *Aulacoseira granulata*, *Cyclotella stelligera*, *Fragilaria acus* y *Nitzschia amphibia*, con un pico en el cm 40 para la primera especie.

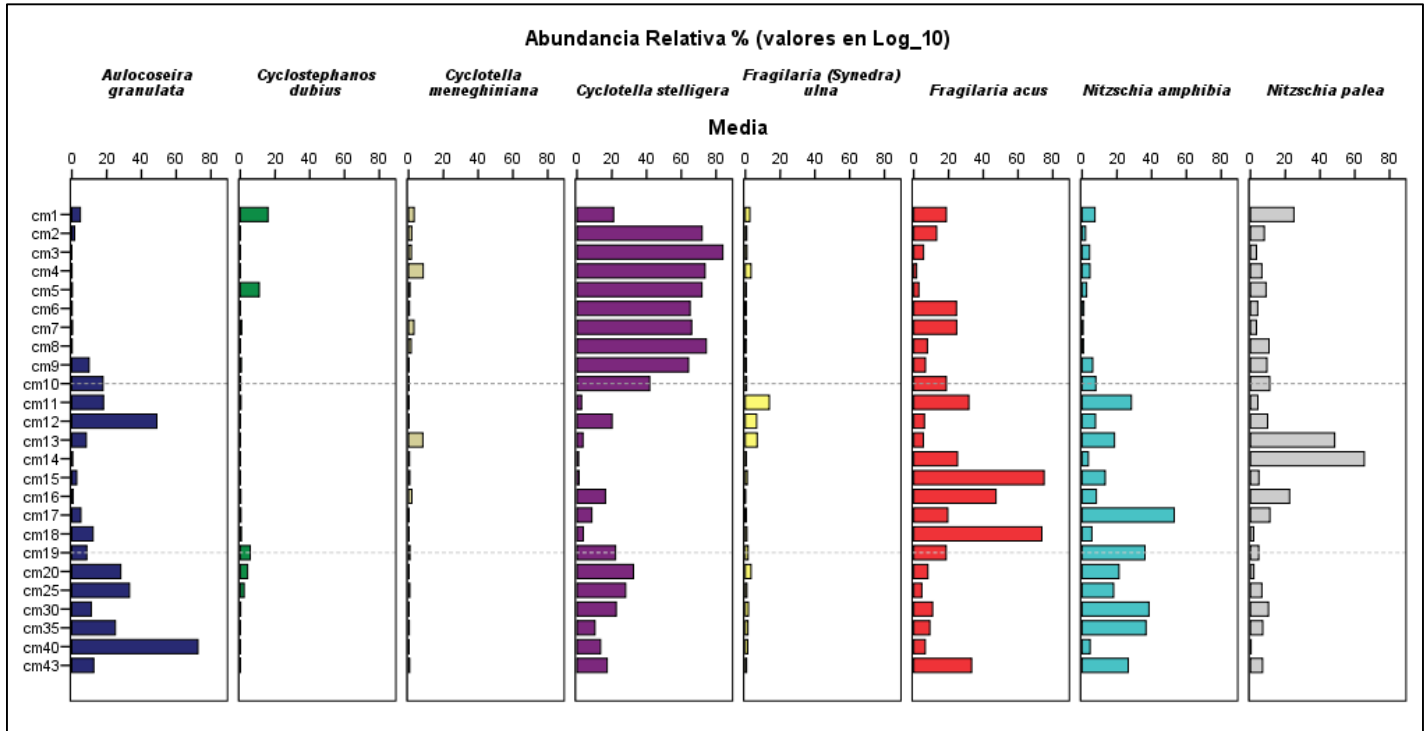


Gráfico 23. Perfil: *abundancia relativa* de las especies más representativas (n:8) vs *profundidad* (25 secciones) del core analizado.

Los valores se han graficado en Log₁₀ para visualizar los cambios de las especies menos abundantes.

Luego, otra zona *central* enlazada a las secciones intermedias (cm 10 al 19) con dos especies de *Nitzschia sp.* y *Fragilaria acus*, desplazando a las otras especies sobre todo hacia las capas finales en la parte central y más profunda de esta zona *central*, con un repunte de *A. granulata* y *Fragilaria ulna* en el inicio del período hacia el extremo superior de la zona, cerca de los centímetros 11-13.

Finalmente, una zona *más superficial* (cm 1-10) en los que *C. stelligera* es tan abundante que apenas es compensada por la presencia de las dos especies de

Nitzschia sp. y *F. acus*, aunque cabe mencionar un aumento de *C. meneghiniana* y *Cyclostephanos dubius*, hacia la parte media de esta zona.

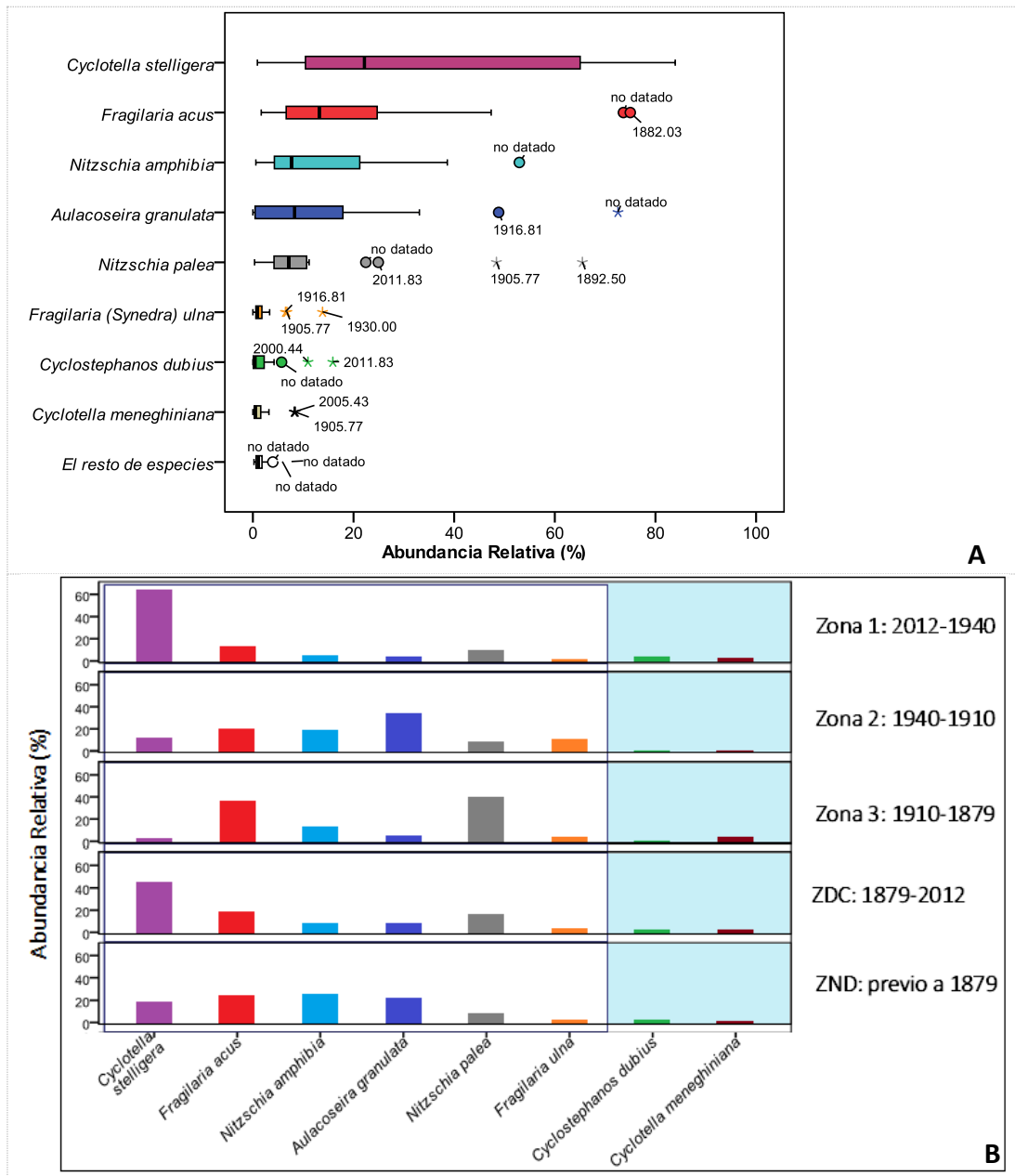


Gráfico 24. Especies más representativas y abundancias relativas por zona.

A: Boxplots: Especies más representativas (n=8) en relación a las menos representativas (n=38) del perfil completo, indicadas en el gráfico como el resto de especies. **B:** Abundancias relativas de las especies más representativas en las zonas 1, 2, 3, zona datada completa (ZD completa), zona no datada (ZND) y perfil completo (PC).

De las especies representativas, las más importantes/abundantes en el PC son las siguientes 5: *C. stelligera*, *F. acus*, *N. amphibia*, *A. granulata* y *N. palea* (Gráfico 24A y cuadro vinculado a la Tabla 20 en anexos), sumando ellas solas más del 92% de la abundancia relativa total.

No obstante, analizando cada zona (Gráfico 24B), se detecta que no todas las especies de la categoría *representativas*³⁰ son las más importantes y algunas están fuera de esa categoría en ciertas zonas.

En este mismo sentido, recordando que las zonas 1 a 3 conforman la zona datada completa (ZD): en el período más reciente (~1940 a ~2012) en la **zona 1**, las 8 especies fueron representativas, siendo la más importante *C. stelligera* (63.39%); en la **zona 2** (~1913 a +1933) sólo 6 pertenecen a esta categoría, estando fuera de la misma *C. dubius* y *C. meneghiniana*, siendo *A. granulata* (33.53%) la más importante; en la **zona 3** (~1879 a ~1911) *C. dubius* no fue representativa, de modo que son 7 las especies en esta categoría y de estas las más importantes fueron *N. palea* (39.59%) y *F. acus* (35.25%).

En la zona no datada (ZND: cm 16 en adelante) *C. meneghiniana* no fue representativa y las más importantes fueron *N. amphibia* (24.9%) y *F. acus* (23.23%), seguidas muy de cerca por *A. granulata* y *C. stelligera*.

IV.4.3. Biotopos

En base a la literatura revisada (Stevenson et al., 1996; Nikulina & Kociolek, 2011; Seckbach & Kociolek, 2011; Spaulding et al., 2010; Dokulil, 2003; Kasim & Mukai, 2006), las diatomeas identificadas fueron agrupadas en función de los principales biotopos en los que subsisten y prosperan: *bentónicas* (B), *bento-planctónicas* (B-P)³¹ y *planctónicas* (P) (Tabla 32 en anexos). Aunque los biotopos B y B-P con subcategorías en función de las preferencias específicas de las diatomeas.

³⁰ Especies con >1% de abundancia relativa.

³¹ o plancto-bentónicas.

Por ejemplo, algunas diatomeas bentónicas son específicamente *perifíticas* (Per), otras *epífitas* (E), otras del psammon. Por su parte, algunas bento-planctónicas pueden tener inclinación al plancton y otras preferir el *epipelon*, como *Anemoeoneis* sp. (Gráfico 25)

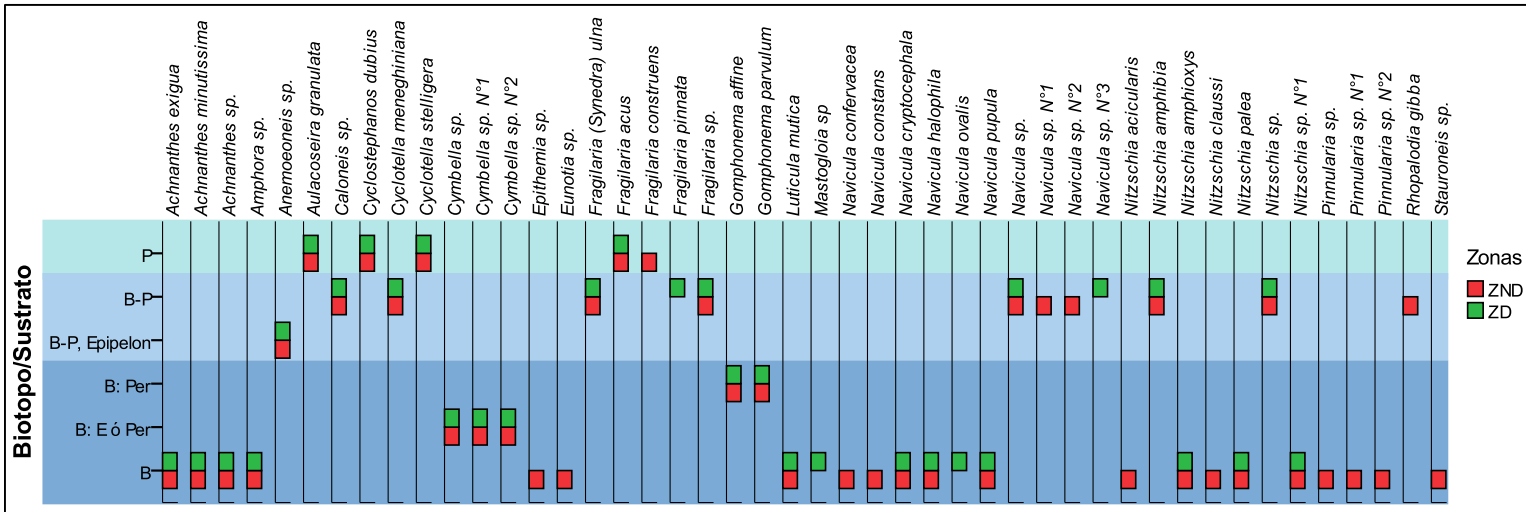


Gráfico 25. Esquema que refleja la presencia/ausencia de las taxa de diatomeas en los diferentes biotopos y zonas.

Simbología: **P:** especies planctónica; **B-P:** planctónica/bentónica o bentónica/planctónica; **Epipelon:** que prefiere el epipelon; **Per:** Perifítica; **E:** Epífita; **B:** bentónica. **ZD:** Zona Datada (período 1879-2012), **ZND:** Zona No Datada (previo a 1879).

De las 42 taxa reportadas en la ZND, durante un período no definido aunque sí previo a 1879, alrededor del 62% (26 sp) fueron bentónicas, 26% (11 sp) bento-planctónicas y menos del 12% (5 sp) planctónicas.

Luego, durante los últimos ~130 años, desde 1879 hasta la actualidad (~2012-13), el número de taxa ‘disminuyó’ a 32, de las cuales el 56.26% B (18 sp), 31.25% BP (10 sp) y el 12.50% P (4 sp).

Como se puede notar, las diatomeas planctónicas han sido minoritarias. No obstante, y a excepción de *F. construens* ausente en la ZD, han permanecido en el tiempo sumando 4 de éstas (*A. granulata*, *C. dubius*, *C. stelligera*, *F. acus*) más del 63% en la ZND y 72% en la ZD, de la abundancia relativa total.

Por otra parte, aunque los porcentajes indiquen la importancia de cada biotopo, no reflejan la sutileza de los cambios ocurridos, que pueden detectarse a través del recambio de especies y de sucesión ecológica.

En este sentido, hay un total de 14 taxa³² de la ZND que se ausentan en la ZD, siendo 10 de estas bentónicas: *Epitemia sp.*, *Eunotia sp.*, *Navicula confervacea*, *N. constans*, *Nitzschia acicularis*, *N. claussi*, *Pinnularia sp.*, *Pinnularia spN°1*, *Pinnularia spN°2*, *Stauroneis sp.*, 3 bento-planctónicas: *Navicula spN°1*, *Navicula spN°2.*, *Rhopalodia gibba* y 1 planctónica: *F. construens*.

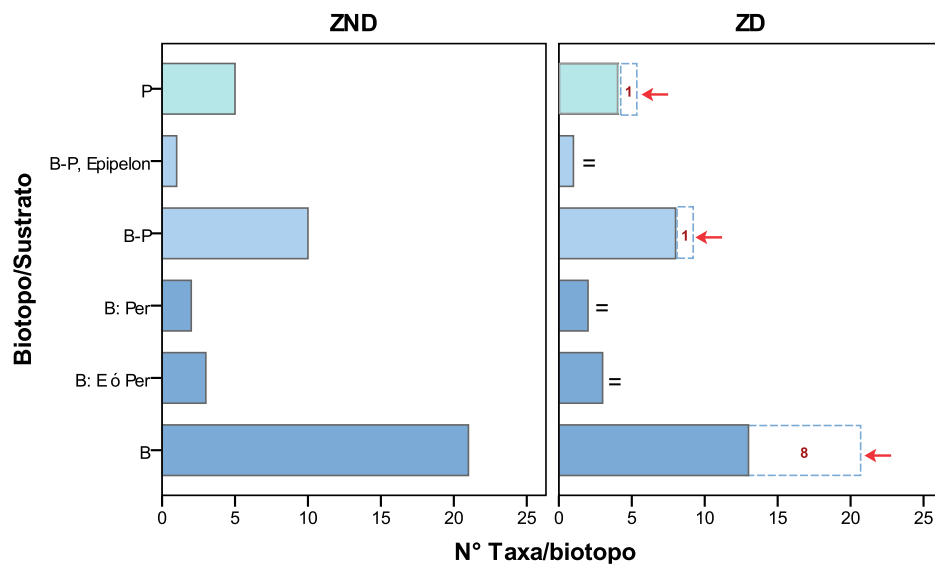


Gráfico 26. Número de taxa por biotopo en cada zona

Se indica la pérdida neta (←) o mantenimiento (=) de taxa en la ZD respecto a la ZND.

Si bien ninguna de estas se observa nuevamente durante un período de 130 años, esta ‘pérdida’ ocurrida en el paso de la ZND a la ZD se ‘compensó’ con 4 ‘nuevas’ especies en la ZD, 2 bentónicas: *Mastogloia sp.*, *Navicula ovalis*, y 2 bento-planctónicas: *Fragilaria pinnata*, *Navicula sp.N°3*, habiendo una diferencia reflejada como una ‘pérdida neta’ de 10 especies: 1 planctónica, 1 bento-planctónica y 8 bentónicas (Gráfico 26).

³² Estas especies representan el 33.33% del total de taxa de la ZND.

Asumiendo que estas 4 'nuevas' especies exclusivas³³ de la ZD son realmente diferentes a las identificadas en la ZND, o bien, que pertenecen a un agregado de especies³⁴, es pertinente preguntarse si éstas sustituyeron en términos del rol ecológico a las 'especies desaparecidas'.

De ser así, ¿podría esto ser considerado como un evento de sucesión ecológica?, por ejemplo, *Navicula ovalis*, bentónica, registrada entre finales del s. XIX (~1892) y mediados del s. XX (~1954), sustituyó ecológicamente a las también bentónicas *N. confervacea* y *N. constans*, registradas para un lapso de tiempo no determinado, pero anterior a *N. ovalis*, entre los cm 25 y 19?.

IV.4.4. Tipos según variables autoecológicas

El Gráfico 27 resume las categorías de diatomeas en base a tres variables autoecológicas (Stevenson et al., 1996; Nikulina & Kociolek, 2011; Dokulil, 2003; Smol & Reavie, 2001), las que pueden ser según el pH desde *acidobiontas* hasta *alcalibiontas*, según la salinidad desde *meso-halobias* hasta *halofóbicas* y según la saporiedad desde *xenosaprobias*, *oligosaprobias*, β -*mesosaprobias*, hasta α -*mesosaprobias* (Tabla 32 en anexos).

Tendencias según el pH

Es notable (Gráfico 27A) la pérdida de especies de todo el rango, desde acidófilas hasta basófilas, entre finales del s. XIX y los años '30s (ZND a Z3→Z2). Sin embargo, en la Zona 1 (~1940-2012) se observa una recuperación sobretodo de las especies neutrófilas e indiferentes, así como de especies tolerantes a pH alcalinos, en consonancia con los valores de pH del Lago registrados para los últimos 50 años (Gráfico 1).

³³ Representan el 12.5% del total de especies en la ZD.

³⁴ Los agregados de especies son grupos de especies muy similares, difíciles de diferenciar, que cumplen roles ecológicos similares.

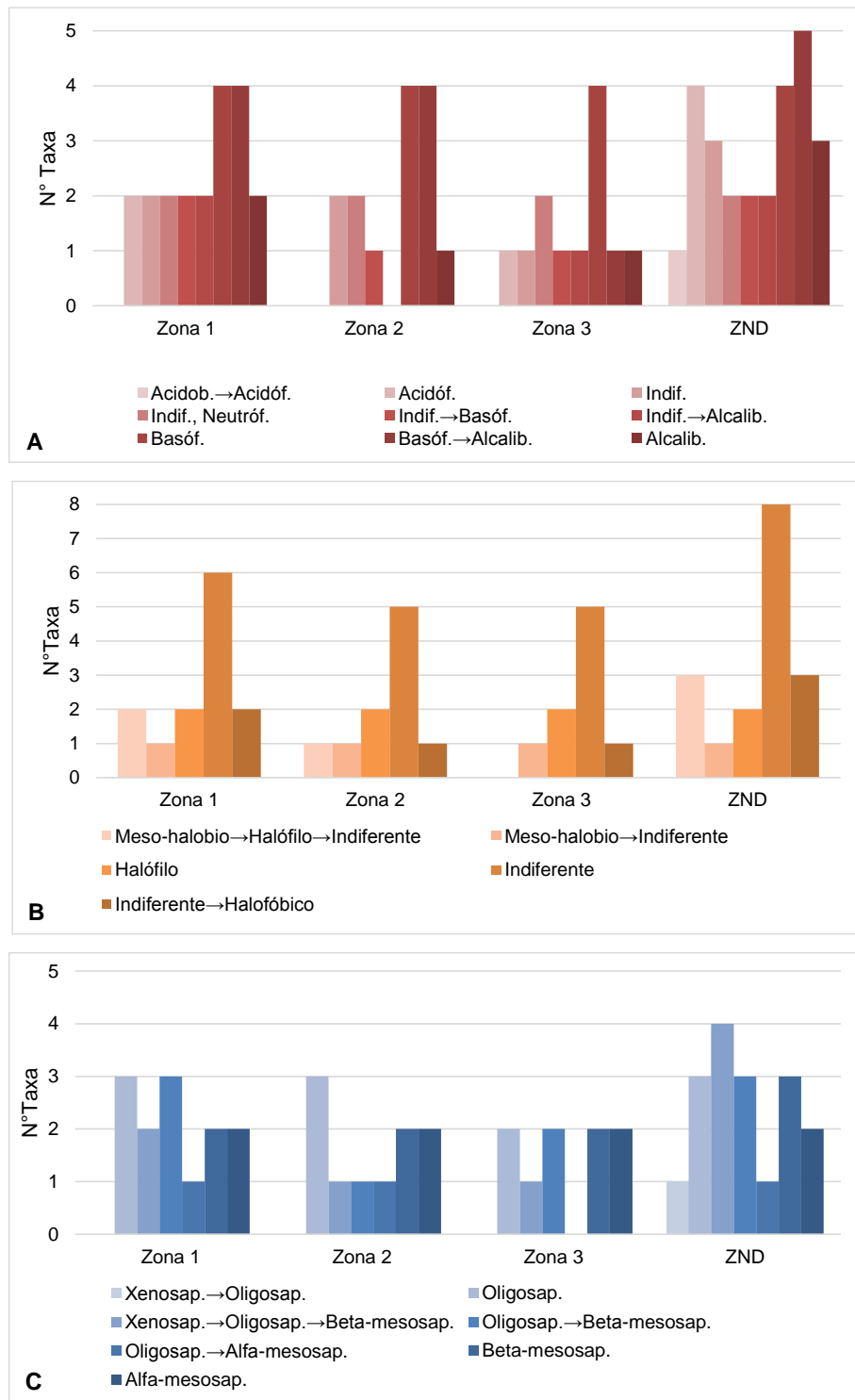


Gráfico 27. Número de taxa según las variables autoecológicas: pH (A), salinidad (B), saprobiedad (C), por zona.

→: especies entre un categoría y otra; ZND: Zona No Datada (cms 16-43), Zona 3: 1879-1910, Zona 2: ~1910-1933, Zona1: 1940-2012.

Tendencias según la salinidad

En todo el perfil, la riqueza de especies tolerantes a concentraciones considerables de sales (mesohalobios) permaneció estable (Gráfico 27B), no así la riqueza de especies indiferentes y halofóbicas, que son formas tolerantes a pequeñas concentraciones de sales; estas últimas disminuyeron y permanecieron en este estado desde finales del s. XIX hasta los '40s y no fue sino a partir de la segunda mitad del s. XX que aparentemente se están recuperando. La 'pérdida' de especies halofóbicas sugiere un aumento (leve?) de las concentraciones de sales en el Lago durante el último siglo.

Tendencias según la saprobiedad

El Gráfico 27C, sugiere claramente que, entre finales del s. XIX y los '40s, hubo una afectación (disminución) de especies tolerantes a *muy bajas* concentraciones de materia orgánica ($DBO < 2 \text{ mg.l}^{-1}$): xenosaprobias y oligosaprobias, así como a *bajas* concentraciones, las beta-mesosaprobias.

Aunque las especies xenosaprobias prácticamente desaparecieron desde antes de 1879, es notable la recuperación de las oligosaprobias y beta-mesosaprobias desde los '40s hasta la actualidad, en correspondencia con la disminución de la DBO (Gráfico 3).

El cambio más marcado en términos generales es visible en el período de transición entre la ZND y principios del s. XX (Zona 2: aprox. 1910), manifestado en una disminución de especies en todas las categorías, lo que sugiere una alteración generalizada del ecosistema lacustre.

IV.4.5. Diversidad biológica

Seguidamente se describe el comportamiento de los parámetros de diversidad: *riqueza*, N° de *individuos* (valvas), índices de *Shannon* y *Simpson*, *dominancia*, *uniformidad* de Buzas & Gibson y *equitatividad*, en orden retrospectivo, iniciando desde la zona no datada (ZND) hacia la zona datada (ZD), detallando para esta

última desde las zonas 3 a la 1, en orden cronológico de la más antigua a la más reciente. El Gráfico 28 representa el perfil completo (PC).

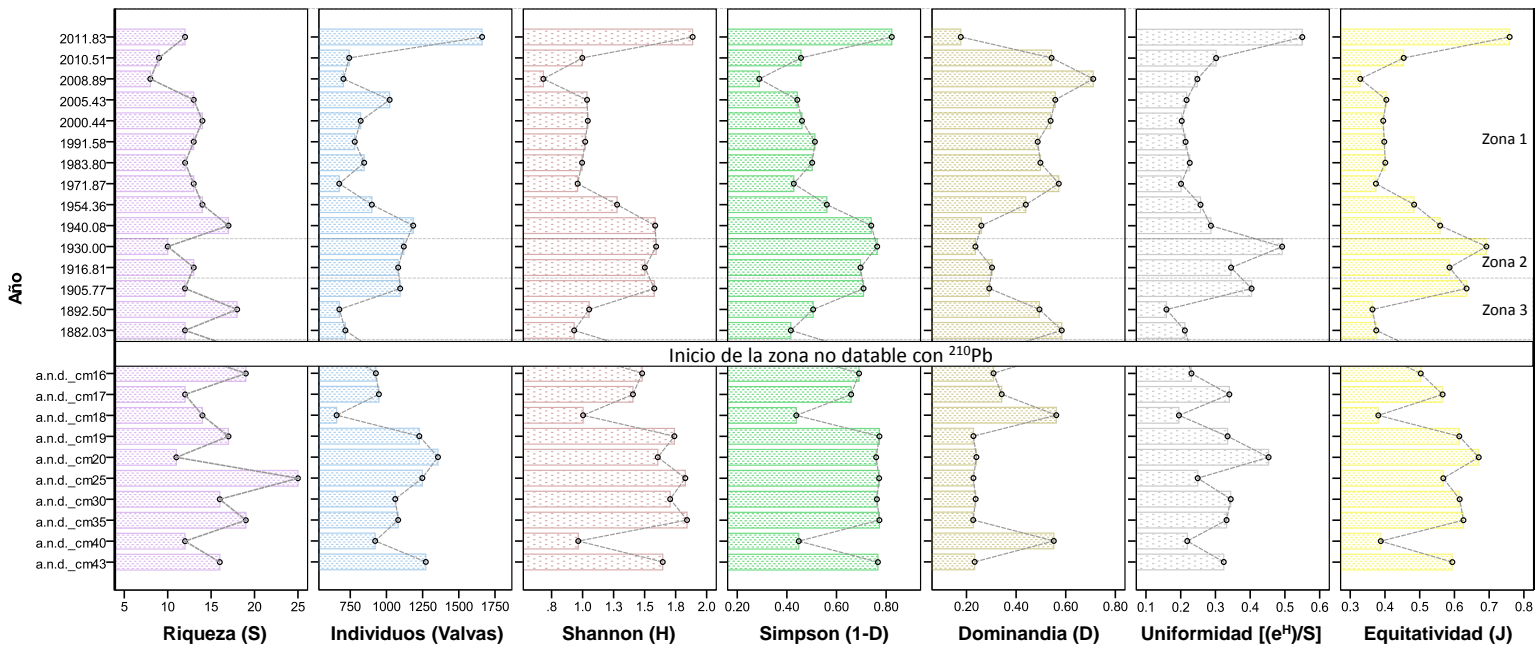


Gráfico 28. Parámetros de biodiversidad de los ensamblajes de diatomeas analizados.

En el eje Y se detallan la zona datada (fechas inferidas) y no datada, en esta última, cada sección se indica como a.n.d.: año no definido, correspondiente a los centímetros 16-20, 25, 30, 35, 40 y 43.

ZND vs ZD

Los valores promedio de la *riqueza*, número de *valvas*, *dominancia*, de los índices de *Simpson* y *Shannon*, así como de *equitatividad*, en la ZND (cm 43 al 16) fueron mayores que en la ZD (1879-2012) y, por el contrario, como es lógico, la dominancia media fue mayor en la ZD que en la ZND.

No se observan diferencias importantes entre los valores de *uniformidad* de Buzas & Gibson.

En base a la zonificación realizada en función de las 8 especies representativas³⁵ se ejecutó un ANOVA para evaluar las posibles diferencias entre los parámetros de biodiversidad estimados.

³⁵ Zona1_{8sp}: cm 1-10 (10 secciones); Zona2_{8sp}: cm 11-12 (2 secciones); Zona3_{8sp}: cm 13-15 (3 secciones); ZND: Zona No Datada, cm 16 en adelante (10 secciones).

Las pruebas de normalidad aplicadas (Shapiro-Wilk) a tales parámetros indican que la *riqueza* en la Zona_{38sp}, el *N° de individuos* en la Zona_{18sp}, la *dominancia* en la ZND, la *uniformidad* en la Zona_{18sp} y la *equitatividad* en la Zona_{18sp}, no siguen una distribución normal.

A pesar de ello, las pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene) reflejan que no existe diferencia significativa entre las zonas [Zona (1-3)_{8sp} y ZND], razón por la se realizó el ANOVA de un factor³⁶ (Tabla 24 en anexos).

Los resultados de este ANOVA, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, indican que no existe diferencia significativa de los parámetros evaluados entre las zonas. Es decir, bajo esta zonificación, las Zonas (1-3)_{8sp}, así como la ZND tienen estadísticamente la misma *riqueza*, *N° de valvas* y, así para los otros parámetros.

Al zonificar en base a las abundancias relativas de las 32 taxa presentes en la ZD³⁷ y, garantizada la homogeneidad de varianzas, se obtuvo diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% entre las nuevas zonas (Tabla 25 en anexos). Concretamente se obtuvo diferencias entre los valores de *riqueza* [F(2, 22)=3.87, $p=0.036$], *dominancia* [F(2, 22)=4.474, $p=0.023$], *Simpson* [F(2, 22)=4.48, $p=0.023$] y *Shannon* [F(2, 22)=4.43, $p=0.024$].

Las pruebas *post hoc*, de comparaciones por pares *b de Tukey*³⁸, indican que existe diferencia de *riqueza*, *dominancia*, índice de *Simpson* e índice de *Shannon* entre la Zona_{132sp} y la ZND, siendo mayores la *riqueza*, *Simpson* y *Shannon* en la ZND y la *dominancia* en la Zona_{132sp}. (Gráfico 29)

Según esta zonificación, la biodiversidad del Lago Masaya ha disminuido, habiendo diferencias marcadas entre finales del s. XIX y posterior a 1940-1950.

³⁶ el ANOVA es robusto a la no normalidad.

³⁷ Zona _{132sp}: cm 1-8 (8 secciones, aprox. década del '50 a la actualidad); Zona _{232sp}: cm 9-15 (7 secciones, aprox. entre 1879 y los '50s), ZND: cm 16 en adelante (10 secciones).

³⁸ Para matrices irregulares, ejemplo: matriz Zona_{132sp}= 8secciones X 32especies.

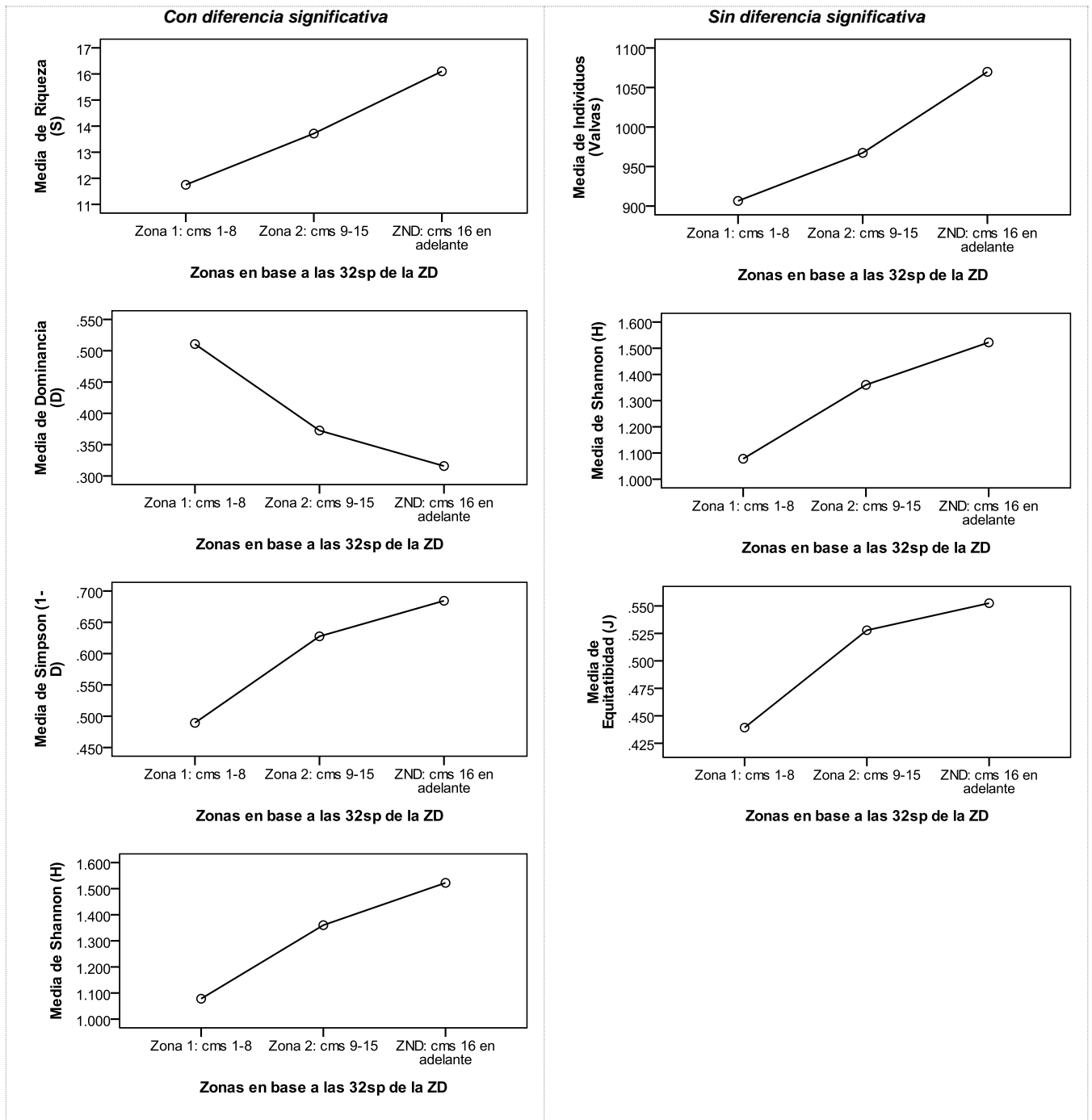


Gráfico 29. Gráficos de las medias de parámetros de biodiversidad en zonas definidas en base a 32 taxa de diatomeas identificadas en la zona datada.

La comunidad de diatomeas ha sido en general más diversa, uniforme y equitativa cuanto mayores han sido los aportes en términos de riqueza y abundancia relativa de las diatomeas bentónicas y bento-planctónicas, teniendo éstas correlaciones

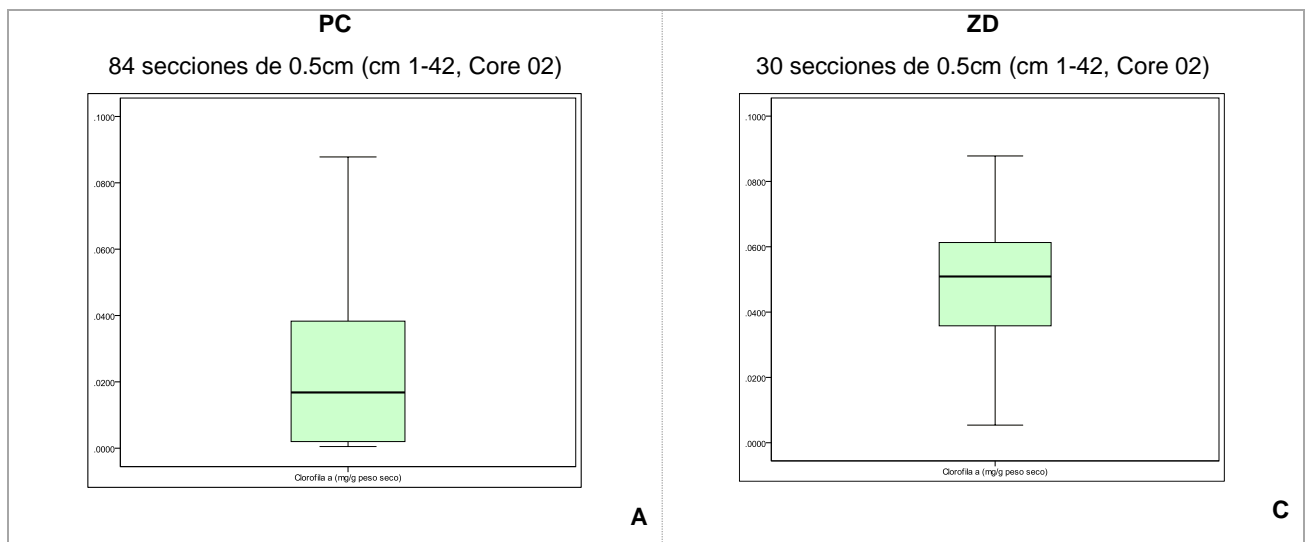
positivas significativas tanto con el índice de Simpson (Tau b Kendall= 0.383, $p=0.019$, $n=20$), con los índices de Buzas & Gibson (e^H/S : Tau b=0.460, $p=0.005$, $n=20$) como con el de Pielou (J' : Tau b=0.467, $p=0.005$, $n=20$), siendo las especies que más aportan *Nitzschia amphibia* (Tau b=0.840, $p=0.00$, $n=20$) y *Nitzschia palea* (Tau b=0.873, $p=0.00$, $n=25$). Los períodos con mejor biodiversidad fueron los ocurridos en períodos asociados a los centímetros 40 y 19, así como entre 1906 y 1940. (Gráfico 28)

Teniendo un efecto exactamente opuesto la abundancia relativa de las diatomeas plantónicas, con un peso determinante de la abundancia de *Cyclotella stelligera* (Tau b=0.433, $p=0.002$, $n=25$), de manera que cuando ésta aumentado ha alterado por sí sola la abundancia relativa total de las diatomeas plantónicas, en correspondencia con un descenso de *N. amphibia* y *N. palea*.

IV.5. Clorofila a y productividad primaria

IV.5.1. Concentración de clorofila a

Para el perfil completo (PC), la clorofila a osciló entre 0.0005 y 0.0878 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ peso seco con una media de 0.02395 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ peso seco (± 0.02389) siendo las concentraciones menores las más frecuentes (Gráfico 30A y 30B) y teniendo mayor variabilidad en el PC que en la zona datada-ZD (Tabla 26 en anexos).



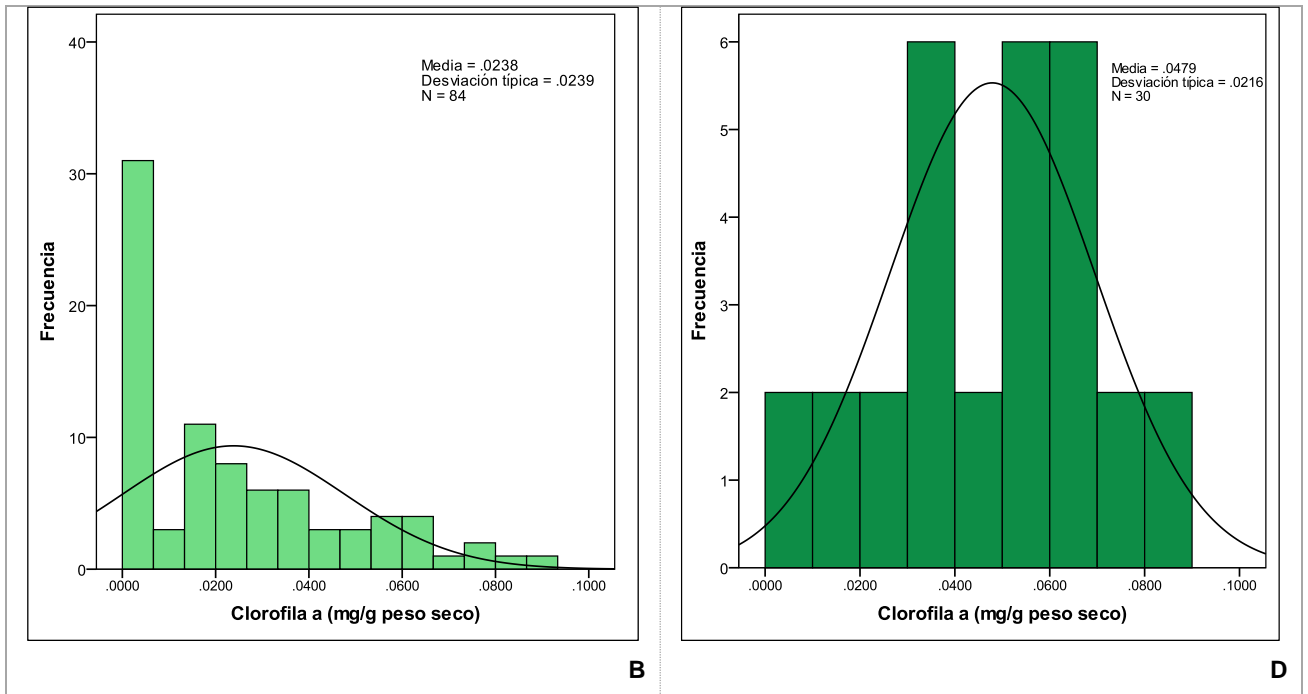


Gráfico 30. Distribución de la clorofila a inferida en sedimentos

En la ZD la clorofila a varió de 0.0054 a 0.0878 mg.g⁻¹ peso seco con un promedio de 0.04788 (± 0.0216), con valores ajustados de forma que tienden a la distribución normal (Gráfico 30C y 30D).

IV.5.2. Modelo de representación de la clorofila a

Utilizando como variable independiente la *profundidad del core (cm)* –o punto medio de la sección– en la cual fue determinada la clorofila a (variable dependiente), se valoró el modelo de regresión lineal que mejor representase la tendencia cronológica de la variable dependiente en el Lago Masaya.

De las opciones valoradas, para los datos del PC (Tabla 27 en anexos), las ecuaciones de mejor ajuste fueron la logarítmica, cuadrática y cúbica respectivamente, teniendo la cúbica el mejor ajuste de todos (R^2 : ~ 0.8).

En la ZD (Tabla 27 en anexos), de las opciones valoradas, la única seleccionada fue la ecuación cúbica, siendo también la de mejor ajuste (R^2 : ~ 0.71).

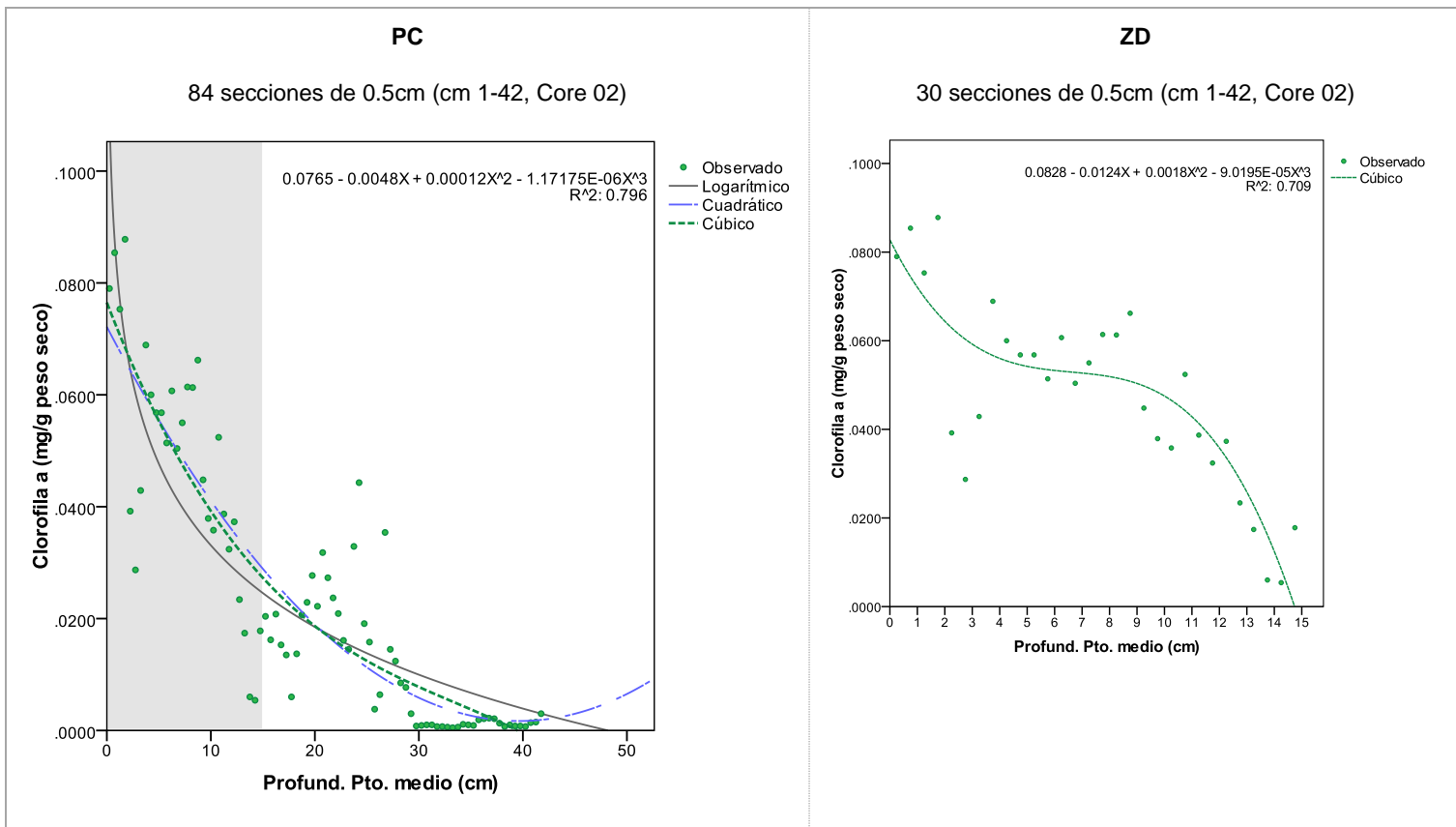


Gráfico 31. Gráfico de dispersión y curvas de mejor ajuste de la clorofila a total.

Al lado izquierdo –correspondiente al Perfil Completo (PC)– se refleja la Zona Datada (ZD) con fondo gris, detallada esta última en el gráfico de la derecha.

Las ecuaciones respectivas son,

para el PC, Ecuación 1:

$$\text{Clo } a = -(1.172 \times 10^{-6})s^3 + (1.2 \times 10^{-4})s^2 - 0.0048s + 0.0765; R^2: \sim 0.80$$

y, para la ZD, Ecuación 2:

$$\text{Clo } a = -(9.020 \times 10^{-5})s^3 + (1.8 \times 10^{-3})s^2 - 0.0124s + 0.0828; R^2: \sim 0.71$$

Donde **Clo a**: clorofila a en sedimentos en mg.g⁻¹ peso seco y, **s**: es el punto medio de la sección (cm) en la que fue detectada la clorofila a.

Se sugiere entonces, que la clorofila a inferida en los sedimentos de la zona central del Lago Masaya, presenta un crecimiento preponderantemente cúbico desde las

capas más profundas (secciones 43 a 16) hacia las más superficiales (secciones 15 a 1, Gráfico 31) y, que esta creciente concentración de clorofila *a* en los sedimentos del Lago Masaya, sugiere un incremento de la biomasa algal y de la productividad del mismo (O'Sullivan & Reynolds, 2003; Michelutti, et al., 2010).

IV.6. Eventos naturales y Actividades Humanas

IV.6.1. Nivel del Lago y variables asociadas

La *precipitación* se ha mantenido 'estable' ($r=0.089$, $p=0.634$, $n=17$)³⁹, sin una tendencia clara hacia la disminución o aumento, con el 90% de los casos por debajo de 1756 mm y con rangos de precipitación anual más frecuentes de entre 1000-1200 mm con 7 casos, 1400-1500 mm y 1600-1700 mm, con 5 casos cada uno.

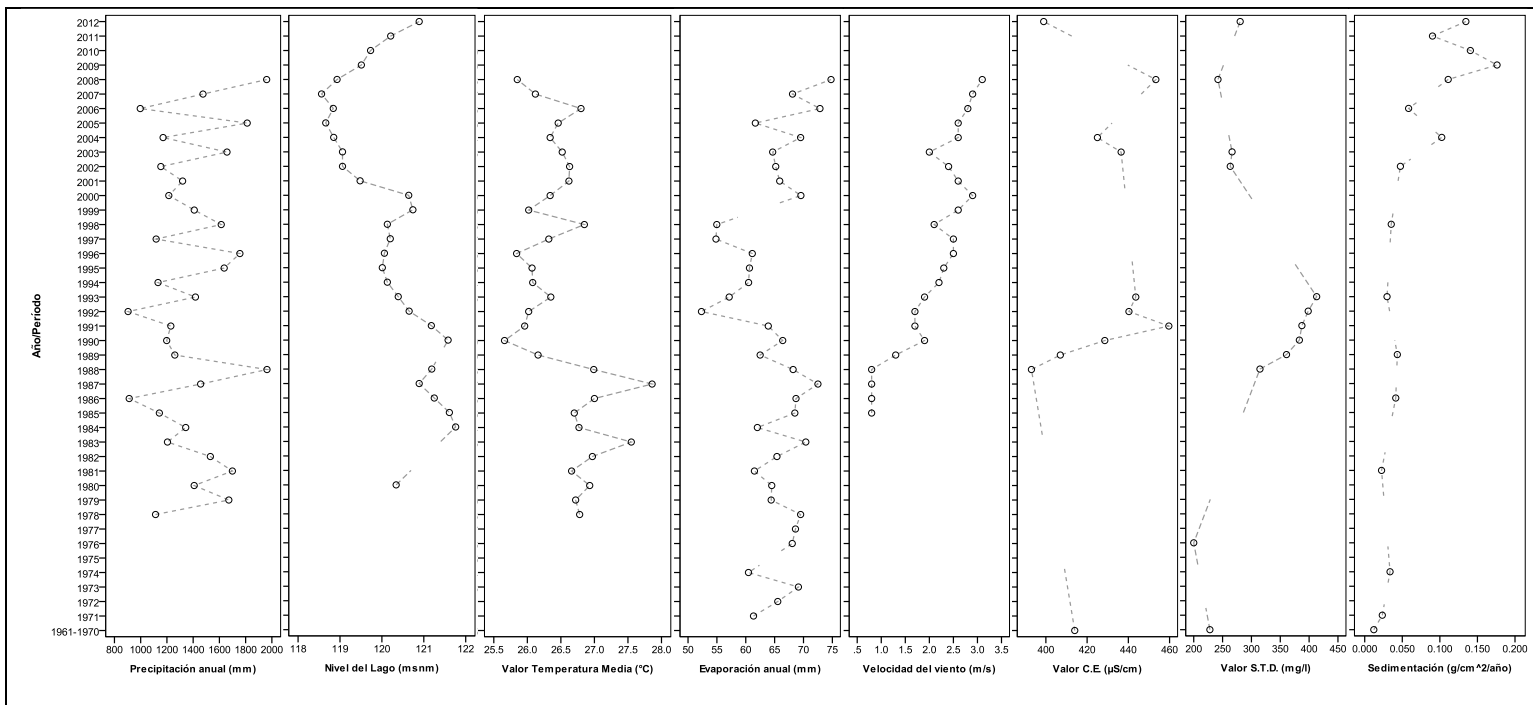


Gráfico 32. Precipitación, nivel del lago, temperatura del aire, evaporación, velocidad del viento, C.E., S.T.D. y tasa de sedimentación

La *temperatura* media (1978-2008), se agrupó en tres grandes momentos:

³⁹ Correlación precipitación-tiempo (años).

el primero, de 1978 a 1986, durante el cual se mantuvo constante, con un promedio de 26.90°C (± 0.27); el segundo, en el cual tuvo un descenso drástico de 2.2°C entre 1987 y 1990 y finalmente con dos momentos, uno en el que aumentó progresivamente de 25.96 hasta 26.80 °C entre 1991-2006 y en el otro (2007-2008) disminuyendo hasta valores similares (25.85°C) a los registrados a inicios de los '90s. Para comparar los tres momentos⁴⁰ se realizó un ANOVA. Los resultados del test de Welch⁴¹ indicaron que el promedio de al menos uno de los momentos difiere del resto y, los resultados de las pruebas post hoc⁴², señalan que las diferencias existen entre el primer (1978-1986) y tercer (1991-2008) momento, siendo el primero el de mayor temperatura. El descenso neto de temperatura ambiental entre el primer momento y el último ocurrido en los 30 años de registro analizado, fue de 0.53°C.

Por otra parte, desde finales de los '80s, la *velocidad media del viento* ha incrementado ($p=0.903$, $p=0.000$)⁴³. Iniciando desde 1988 (0.82 m.s⁻¹), la velocidad aumentó más del doble entre 1989-1995, luego incrementó de 2 a 3 veces entre 1996-2003, después a más del triple a partir del 2004, llegando casi a cuadruplicarse en 2008 (3.12 m.s⁻¹) respecto al valor de referencia.

El comportamiento de la *evaporación*, entre 1978 y 1990, parece estar en correspondencia ($r= -0.579$, $p=0.038$) con el comportamiento de la temperatura ambiental, aunque el valor mínimo de evaporación se alcanzó en 1992 y el de la temperatura en 1990. Luego, desde 1990 hasta el 2008, la temperatura aumentó levemente, sin embargo, no sucedió lo mismo con la evaporación, la cual se incrementó hasta valores cada vez mayores, al parecer en correspondencia con el aumento marcado de la velocidad del viento ($r= -0.805$, $p=0.000$; $R^2: 0.648$, $p=0.000$)⁴⁴.

⁴⁰ Temperatura de 1978-1986 vs 1987-1990 vs 1991-2008.

⁴¹ El test de Welch se aplica para realizar ANOVA cuando los resultados del test de Levene indican diferencias significativas entre las varianzas.

⁴² C de Dunnett y T3 de Dunnett.

⁴³ Se indica el coeficiente de correlación (ρ) de Spearman.

⁴⁴ Se indican los coeficientes de correlación (r) de Pearson y de determinación (R^2). Los resultados de las pruebas de correlación indicados con niveles altamente significativos ($\alpha:0.001$).

Los datos muestran que el *nivel del Lago* tuvo un descenso marcado ($r = -0.923$, $p = 0.000$; $R^2: 0.852$, $p = 0.000$) de aproximadamente 3.2m, en un período de 23 años, disminuyendo desde 121.76 (promedio de 1984) hasta 118.56 msnm (promedio del 2007); aunque después de ello, a partir del 2008, empezó un período importante ($r = 0.988$, $p = 0.002$; $R^2: 0.976$, $p = 0.002$) de incremento, superando en 2012 (120.89 msnm) el nivel alcanzado en 1980 (120.34 msnm). Sin embargo y, a pesar de incluir el valor de 1980, la tendencia general indica ($r = -0.691$, $p = 0.000$; $R^2: 0.478$, $p = 0.000$) un descenso en el nivel.

Como ya se detalló en acápite IV.2, la *tasa de sedimentación* está aumentando desde inicios del s. XX, por lo tanto, para el período referido en este acápite ('60s-2012) la tendencia de crecimiento se mantuvo ($r = 0.89$, $p = 0.00$)⁴⁵, duplicándose en los '70s, luego triplicándose entre los '80s-'90s y llegando incluso a alcanzar tasas 9 a 11 veces superiores (entre 2000 y 2012) a las de los '60s. Tanto los *STD* como la *CE* han tenido un comportamiento variable (ampliar en el acápite IV.1.4.), con oscilaciones sin aparente relación con las otras variables ambientales.

De las variables ambientales mencionadas los cambios en el nivel del Lago son los que sugieren mayores cambios en la química del agua, teniendo una correlación positiva⁴⁶ el aumento del nivel con las mayores concentraciones de Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- y negativa con las de K^+ , tomando en cuenta que el Mg^{2+} , es el catión que más aporta a la dureza total y que las formas nitrogenadas corresponden a nutrientes importantes.

Por otro lado, tanto la tasa de sedimentación, evaporación y nivel del Lago parecen estar relacionadas con los cambios de las comunidades de diatomeas. En este sentido, la riqueza de especies plantónicas está negativamente correlacionada tanto con la tasa de sedimentación (Tau $b = -0.564$, $p = 0.016$, $n = 11$) como con la

⁴⁵ La variable original no se distribuye de forma normal (Shapiro-Wilk=0.88, $p = 0.04$), por ello se transformó utilizando logaritmo natural (ln) para normalizar los datos (Shapiro-Wilk=0.96, $p = 0.68$).

⁴⁶ Nivel versus Magnesio: Tau $b = 0.643$, $p = 0.026$, $n = 8$; vs Sulfatos: Tau $b = 0.857$, $p = 0.003$, $n = 8$; vs Nitratos: Tau $b = 0.764$, $p = 0.009$, $n = 8$; vs Nitritos: Tau $b = 0.571$, $p = 0.048$, $n = 8$.

evaporación (Tau b= -0.775, p=0.042, n=6) y positivamente con el nivel del Lago (Tau b=0.700, p=0.042, n=7).

Dado que las tendencias reales son: un marcado descenso del nivel acompañado de un incremento de la evaporación y de los sedimentos, se deduce que la comunidad plantónica ha sido negativamente afectada, excepto por *Cyclotella stelligera* que en cualquier caso se ha visto beneficiada y *Cyclostephanos dubius* únicamente beneficiada por el incremento de los sedimentos (Tau b=0.982, p=0.001, n=8).

IV.6.2. Eventos hidrológicos extremos

En el Gráfico 33 se observa claramente que la cantidad de eventos hidrológicos extremos⁴⁷ 'alrededor' del Lago Masaya ha aumentado con el tiempo, desde inicios del s. XX hasta la actualidad. Las tormentas tropicales aumentaron, prácticamente sin ralentizar la tasa de incremento de eventos, desde 1916.

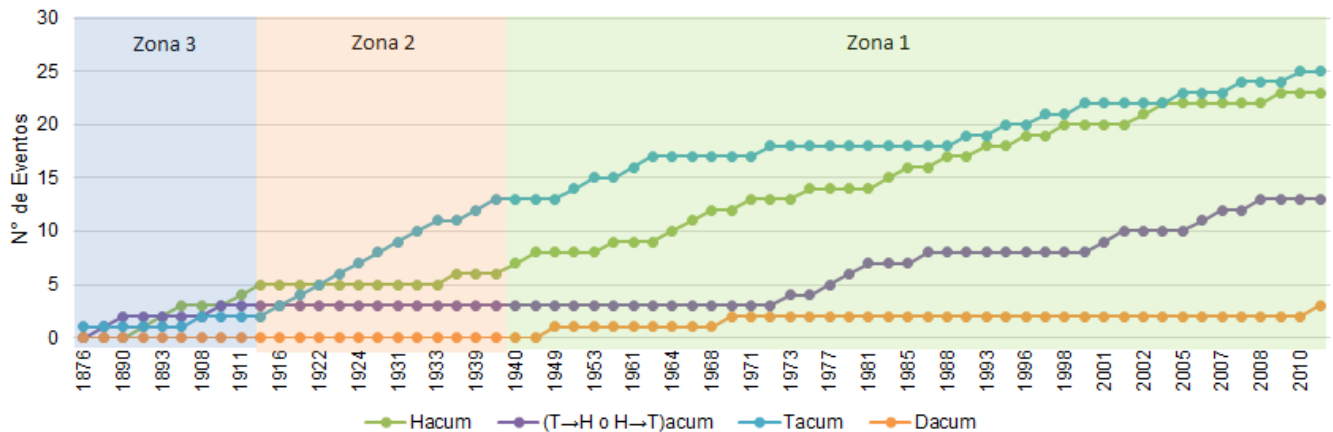


Gráfico 33. Curvas de acumulación: eventos hidrológicos extremos (1876-2011)

H: Huracanes, H→T o T→H: Huracán a Tormenta o viceversa, T: Tormenta Tropical, D: Depresión. El subíndice *acum* se refiere al valor acumulado.

⁴⁷ H: Huracanes, T: tormentas tropicales, D: depresiones tropicales, en orden de mayor a menor intensidad. H→T o T→H: Eventos que al pasar por el radio de influencia del Lago, cambiaron de categoría pasando de huracanes a tormentas o viceversa.

En el siguiente nivel de intensidad, los eventos que han cambiado su intensidad (H→T o T→H) al pasar por el radio de influencia sobre el Lago empezaron a aumentar después de iniciada la década de los '70s. Los huracanes empezaron a ser más frecuentes a partir de 1933, tendencia que se mantuvo desde entonces, llegando casi a igualar en número a las tormentas tropicales a finales de los '80s.

En general, no solo aumentó el número de eventos extremos, sino que además la frecuencia con han ocurrido, siendo los más frecuentes tormentas tropicales y huracanes.

Del paso de la zona 2 a la zona 1, tanto la subcuenca del Lago como el cuerpo de agua propiamente dicho, se vieron expuestos a un incremento sustancial del número de eventos hidrológicos de mayor intensidad, asociados a una mayor cantidad de fenómenos El Niño/La Niña (Gráfico 34B).

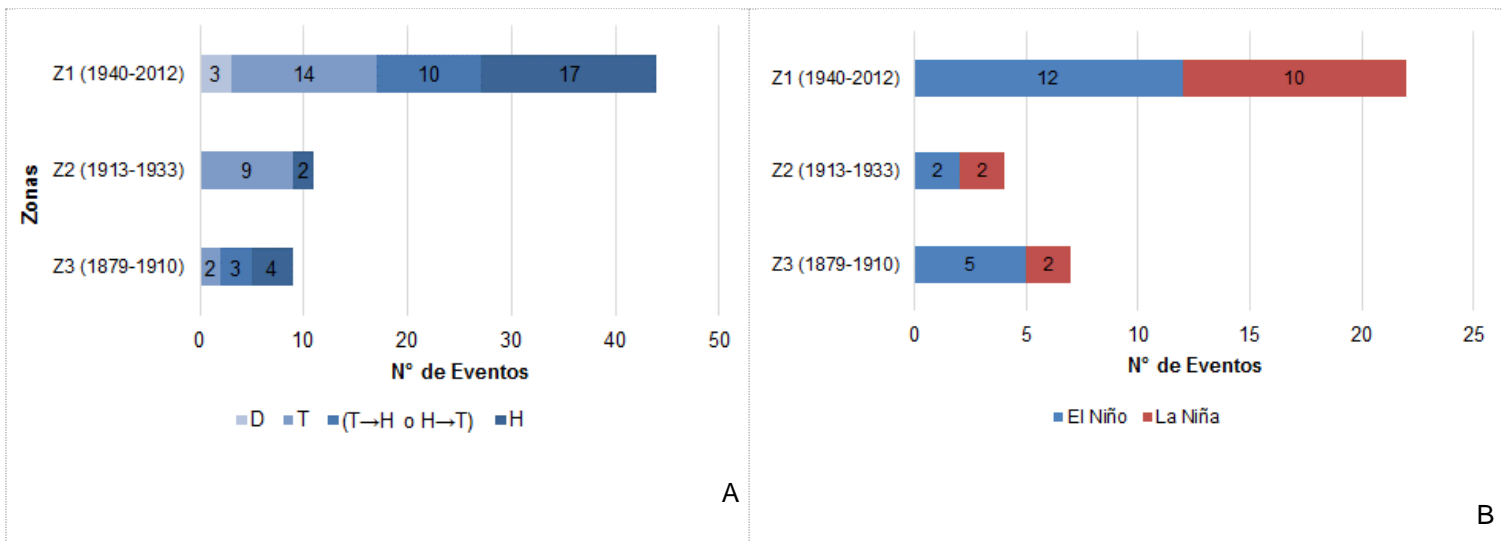


Gráfico 34. Cantidad de eventos hidrológicos extremos y fenómenos El Niño - La Niña

A: Cantidad de huracanes (H), tormentas (T) y depresiones (D) tropicales que han ocurrido sobre el radio de influencia del Lago en cada una de las zonas (períodos de tiempo) de interés. B: Número de eventos El Niño/La Niña ocurridos durante cada período de interés (zonas).

En base a la zonificación realizada en función de las 8 diatomeas más representativas, se observa una correspondencia cronológica entre la cantidad de eventos extremos de mayor intensidad (T, H) y los cambios recientes (Zona 2 y 1)

en los ensambles de diatomeas, reflejados en el incremento de abundancia relativa de *Cyclotella stelligera* (Gráfico 21 y 23) y su dominio, así como en la disminución de la riqueza global de la comunidad (Gráfico 28).

IV.6.3. Actividades humanas

En base a la información histórica recopilada y analizada, en este estudio la categoría *actividades humanas* se ha restringido a los impactos derivados del crecimiento poblacional de la ciudad más cercana al Lago así como a los grandes hitos relacionados con el uso de la subcuenca del Lago y particularmente con el historial de vertido de las aguas residuales.

IV.6.3.1. Población urbana de Masaya

La población de la ciudad de Masaya ha incrementado más de 7 veces en relación a la población estimada para 1879:

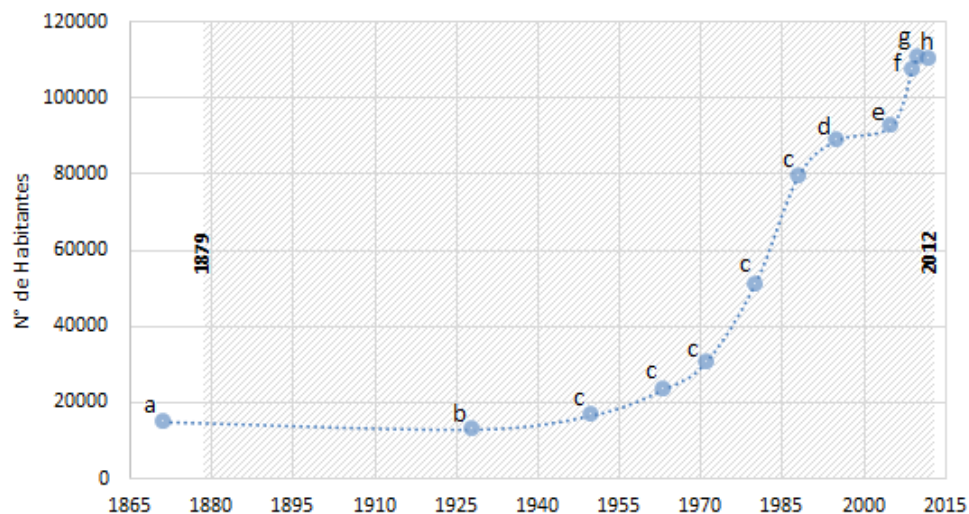


Gráfico 35. Crecimiento poblacional de la ciudad de Masaya (~1870-2012)

Fuentes: a: (Belt, 1874), b: (Christian Brothers, 1928), c: (Duidam & Morales, 1990), d: (INEC, 1996), e: (INEC, 2006a), f: (Alcaldía de Masaya & AMICTLAN, 2009), g: (INIFOM, 2010), h: (Pereira, Navas, & Mora, 2012).

Pasando de menos de 15,000 a más de 110,000 habitantes en aproximadamente 130 años, lo cual no sólo se explica por la dinámica natural de las poblaciones humanas, sino que, en el caso particular de esta ciudad, debido a dos fuertes movimientos de migración interna que contribuyeron a aumentar el número de habitantes.

Estos fueron, los movimientos de población de 1931 y 1972, debidas al fuerte impactado causado por los grandes terremotos de Managua. No obstante, se cree que el flujo más importante ocurrió luego del último terremoto, recibiendo esta pequeña ciudad alrededor de 40,000 personas (La Prensa, 2006).

El incremento de la población de la ciudad de Masaya está significativa y fuertemente correlacionado con la tasa de sedimentación inferida para la zona central del Lago ($\tau = 0.817$, $p = 0.002$, $n = 9$).

IV.6.3.2. Historial de uso de la subcuenca

La cuenca hidrológica o área de captación del Lago Masaya, cubre exactamente 12 municipios. Sin embargo, la extensión de 3 de estos, dentro de la cuenca, es despreciable (El Crucero: 0.92, Diriamba: 0.17 y Ticuantepe, 0.086, todas en km^2).

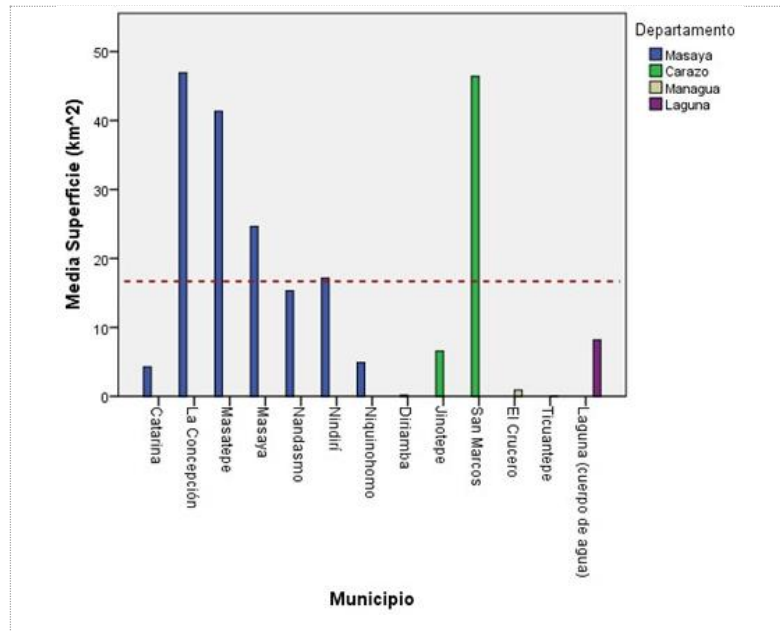


Gráfico 36. Superficie que cada municipio ocupa en la subcuenca del Lago Masaya

Nota: el gráfico incluye el cuerpo de agua como componente.

Por ello, el área extremadamente reducida que ocupan los municipios del Departamento de Managua hace que se consideren solamente Carazo y Masaya como los Departamentos que comparten el área de captación.

Por su extensión, en orden de mayor a menor área, los municipios que la conforman son La Concepción, San Marcos, Masatepe, Masaya, Nindirí, Nandasmo, Jinotepe, Niquinohomo y Catarina (Gráfico 36) y, según la ubicación geográfica el historial del uso de la cuenca se ha agrupado en actividades históricas ocurridas en tres sectores. Las del sector Este, referido a la ciudad de Masaya; del sector Sur, a los municipios de Niquinohomo, Nandasmo y Masatepe; del sector Suroeste, a los municipios de La Concepción, San Marcos y Jinotepe (Figura 1 a 3).

IV.6.3.2.1. Sector Suroeste

El actualmente conocido como 'triángulo de oro' del departamento de Carazo, ubicado entre San Marcos, Diriamba, Dolores y Jinotepe, fue el centro de origen y de propagación de la Caficultura en Nicaragua (Kühl, 2004), teniendo únicamente San Marcos y Jinotepe áreas considerables en la subcuenca, ocupando conjuntamente alrededor de 53km², siendo el primero el de mayor extensión (46.1km², Gráfico 36).

En relación a lo anterior, el café se introdujo al país hacia 1796 como planta ornamental, aunque hasta 1821 se empezó a cultivar y no fue sino hasta 1841 que se estableció como un producto de exportación importante para el país (Kühl, 2004). Es a partir de este período que la caficultura de Carazo y concretamente la de San Marcos se podría tener en cuenta como un hito importante para el entendimiento adecuado del uso de la subcuenca del Lago.

IV.6.3.2.2. Sector Sur y Este

Hacia finales del s. XIX, en el mismo momento que el café era considerado como un cultivo de importancia para Carazo y toda la meseta de los pueblos (Kühl, 2004;

Neiderlein, 1898), se habían establecidos cultivos de añil en Carazo y de tabaco tanto en Masaya como en Masatepe (Neiderlein, 1898).

Mientras tanto en la ciudad de Masaya, pujante de actividad artesanal, se tenía registro de alrededor de 200 negocios de carpinteros, herreros y zapateros (Neiderlein, 1898), de modo que el uso de curtiembres en el sector Este del Lago, muy probablemente data de más de 100 años.

Un siglo después de establecida la caficultura, Zoppis de Senna (1964) reportó que 1923 había sido el de mayor producción en la 'región' de los llanos de Casa Colorada en el Crucero y, aun cuando no se aclara específicamente la extensión de dicha 'región', éste incluyó en su descripción una evaluación de las zonas de impacto de las erupciones (cenizas, arena, detritos) del Volcán Masaya sobre las personas y cultivos. Dado que los vientos alisios han sido predominantes, desviando las emanaciones hacia el oeste y suroeste del Volcán, se deduce que la región cafetalera estaba ubicada entre El Crucero y La Concepción.

Por otro lado, hacia finales de la década mencionada, en Masatepe se producía arroz, caña de azúcar en La Concepción y en el resto de municipios de Masaya verduras, yuca, tabaco y granos básicos.

El marcado uso de la tierra para el cultivo del café en los sectores sur y suroeste no cambió sino hasta la Reforma Agraria de los '80s, período en el que según una evaluación del CIERA (1985)⁴⁸ la mayor parte de las tierras agrícolas estaban en manos de productores con propiedades >5Mz y cooperativas que cultivaban granos básicos, frutas, verduras y plantas ornamentales.

En la actualidad (MAGFOR, 2000) sigue siendo importante el *café* (con sombra, 32.1%, sin sombra 2%), especialmente en Niquinohomo, Masatepe, Nandasmo, La Concepción y especialmente San Marcos. Sin embargo, una extensión importante de *tacotal* y *pasto con maleza* (23.01%) mayoritariamente al suroeste, sugiere un cambio importante en el uso durante el último siglo, lo que se corresponde hoy día

⁴⁸ Centro para la Investigación y Estudios de la Reforma Agraria dejó de funcionar en los '90.

con el porcentaje de *áreas humanizadas* (20%), *centros poblados* (4.68%), y una pequeña extensión de *bosque latifoliado abierto* (4.51%).

IV.6.3.3. Historial de uso del Lago y de vertido de aguas residuales

IV.6.3.3.1. Previo a 1879 (ZND)

Desde la época pre-colonial el Lago Masaya fue utilizado fundamentalmente para uso doméstico: baño, lavandería y eventualmente para consumo, así como para pesca artesanal. Realizándose los usos mencionados bajo una perspectiva “dentro del Lago”, excepto cuando las mujeres “aguadoras” trasladaban agua en cántaros para su uso posterior (Bovallius, 1977; Bolaños-Garay, 1988; Valle-Castillo, 2006) para consumo y limpieza.

IV.6.3.3.2. 1879-1970 (Zona 3)

El servicio de extracción de agua del Lago a través de una bomba a vapor para uso doméstico⁴⁹ fue inaugurado en marzo de 1872 (Bovallius, 1977; Bolaños-Garay, 1988; Valle-Castillo, 2006), y, en 1888 se inició un proyecto para conducir agua a través de cañería desde El Río Grande de Ticuantepe (Bolaños-Garay, 1988; Somarriba, 2001), lo que sugiere que la demanda de agua proveniente del Lago Masaya no aumentaría porque ésta sería satisfecha a partir de otra fuente.

Por otra parte, un hecho de relevancia en 1902 lo fue la construcción del Hospital San Antonio de la ciudad de Masaya (Bolaños-Garay, 1988).

IV.6.3.3.3. 1910-1940 (Zona 2)

Hacia 1927 se reporta una mejoría en el abastecimiento de agua potable (The Rockefeller Foundation, 1927), sin aclararse si esta ‘mejoría’ se debió a la ejecución del proyecto iniciado en 1888, o a que la extracción de agua desde el Lago

⁴⁹ No queda claro si para consumo humano también

continuaba, recordando que si así fuese, habrían transcurrido 55 años de este tipo de uso.

Más de tres décadas después de inaugurado, el Hospital San Antonio⁵⁰ empezó a descargar sus aguas residuales del hacia el Lago Masaya (CIRA/UNAN-Managua, 2013). A partir de este momento el Lago sufrió un drástico cambio de uso, pasando de ser una 'fuente de agua' a un 'cuerpo receptor de las aguas residuales' de algunas ciudades (las principales: Masaya, Masatepe y Niquinohomo), transformándose la relación con el mismo desde una perspectiva *en y desde el* a una perspectiva *fuera del* Lago, definiéndose (a modo de augurio) su uso futuro y condición actual; lo que de igual manera y de forma independiente sugiere el descenso drástico observado en los parámetros de biodiversidad (Gráfico 28).

IV.6.3.3.4. 1940-2012 (Zona 1)

En 1973 fue diseñado el sistema de agua y saneamiento de la ciudad de Masaya (CIRA/UNAN-Managua, 2013) y al año siguiente se inició la construcción del sistema de tratamiento, que sería finalizado en tres etapas: la primera durante este mismo año, con una laguna de estabilización primaria -Laguna A- que inició operación hasta 1975 (Salinas, 2007a; Salinas, 2007b).

A pesar de este primer esfuerzo, desde 1976 hasta la actualidad los resultados de análisis bacteriológicos, físicos y químicos han demostrado que las aguas del Lago **no** son aptas para el consumo directo y que desde entonces ya estaban en proceso de eutrofización (Wong-Lanuza, 2004).

En 1985 se construyó la segunda etapa (CIRA/UNAN-Managua, 2013) que empezó a funcionar a inicios de 1986, consistiendo en dos lagunas primarias más (B y C), 3 lagunas secundarias (A, B y C) y rehabilitándose la laguna primaria A construida en 1974 (Salinas, 2007b). Tres años más tarde fueron rehabilitadas (CIRA/UNAN-Managua, 2013) todas las lagunas de estabilización (primarias y secundarias),

⁵⁰ El Hospital fue clausurado a finales de la década de los '80

debido a los daños severos ocasionados por el Huracán Juana, construyéndose además la unidad del desarenador (Salinas, 2007b).

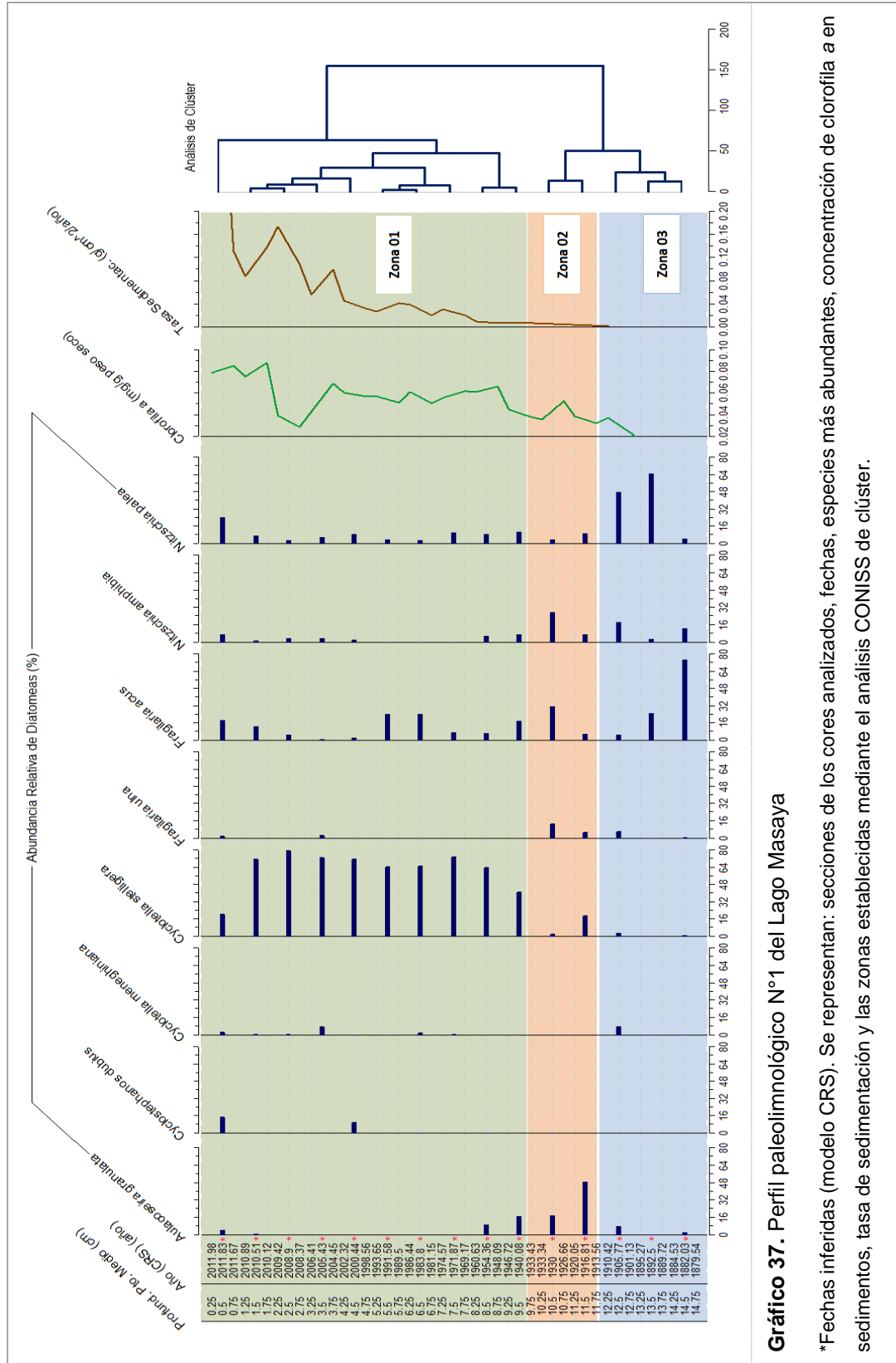
Entre 1995 y 1996 fueron rehabilitadas nuevamente las lagunas de estabilización (Vanegas, 2001) y en 1997 se ejecutó la tercera etapa del sistema de tratamiento de aguas residuales, agregándose canales para desvío del agua en exceso y además se realizó limpieza de lodos (Salinas, 2007b).

Los resultados de la evaluación de la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento, realizada en 2007, indicaron que se removía un 77.4% de la DBO₅ (92.23 mg.l⁻¹), 44.39% de la DQO (394.7 mg.l⁻¹), 58.94% de los sólidos suspensos (272.53 mg.l⁻¹), 93.32% de los sólidos sedimentables (0.25 mg.l⁻¹) y un 92.14% de los coliformes fecales (7.72 x 10⁵ NMP.100ml⁻¹), estando únicamente por debajo de la norma nacional (Decreto 33-95) los porcentajes de remoción de DBO₅, sólidos sedimentables y pH (Salinas, 2007b).

IV.7. Síntesis ecológica

Los Perfil paleolimnológicos N°1 y N°2 (Gráfico 37 y 38) muestran tres zonas: la zona más antigua (**zona 3**) de unos 30 años de duración, comprendida entre 1879 y 1910 (cm 15 al 12); otra intermedia (**zona 2**), de poco más de 20 años (~1910-1933, cm 12 al 9) y la más reciente de mayor longitud temporal (**zona 1**), con aproximadamente 80 años, desde mediados de los '30s a 2012-2013 (cm 9 a la superficie).

En la **zona 3**, las especies dominantes fueron *Fragilaria acus*, *Nitzschia palea* y *N. amphibia*. En conjunto con la zona 2, ésta fue la de mayor riqueza (S), aumentando el índice de Simpson (1-D) de 0.42 a 0.71, entre 1882 y 1905.



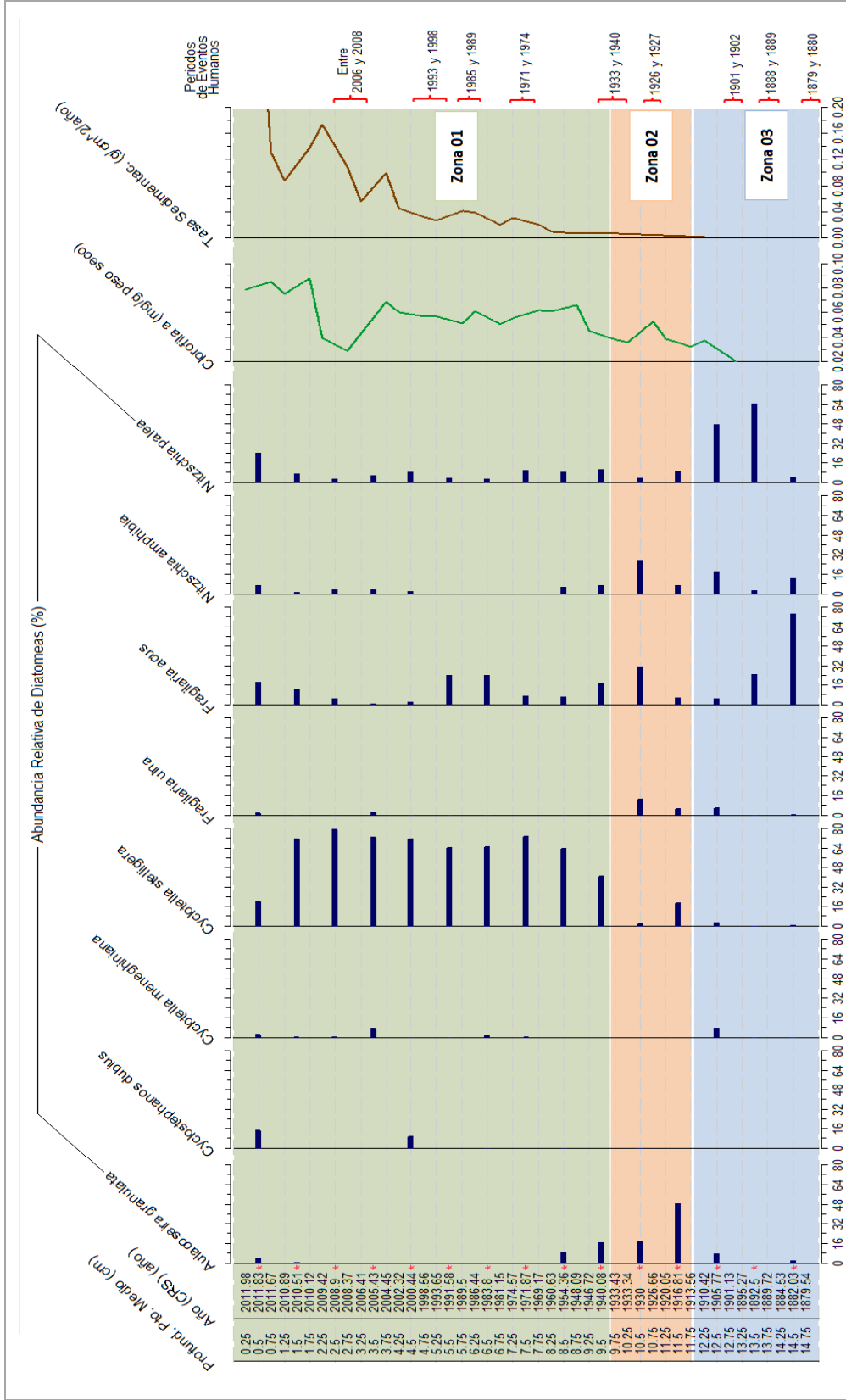


Gráfico 38. Perfil paleolimnológico N°2 del Lago Masaya

*Fechas inferidas (modelo CRS). Se representan: secciones de los cores analizados, fechas, especies más abundantes, concentración de clorofila *a* en sedimentos, la tasa de sedimentación y las zonas establecidas mediante el análisis CONISS de clúster, así como las fechas más relevantes en relación al uso del Lago.

En la **zona 2**, aun cuando *Aulacoseira granulata* fue la especie más abundante, permaneció en equilibrio –en términos de abundancia relativa– con la mayoría de las especies representativas (*Fragilaria acus*, *F. ulna*, *Nitzschia amphibia*, *N. palea*, *Cyclotella meneghiniana*), manteniéndose alta la biodiversidad (Simpson: 0.70 a 0.76). Sin embargo, los valores de clorofila *a* y tasa de sedimentación empezaron a incrementarse hasta 2.2 veces en relación a la zona 3, aunque sin todavía adquirir valores importantes.

En la **zona 1**, entre finales de los '30s e inicio de los '40s, la biodiversidad de bacillariophyta era de media a alta (Simpson: 0.74), con una comunidad de diatomeas medianamente uniforme (e^H/S : 0.29) y equitativa (J' :0.56). No obstante, a partir de este momento y durante los próximos 70 años la biodiversidad disminuyó considerablemente (Simpson: 0.29 en el 2008), siendo sumamente dominante *Cyclotella stelligera*, razón por la cual dicha comunidad se configuró menos uniforme (e^H/S : entre 0.20 y 0.24) y menos equitativa (J' : entre 0.33 y 0.39) durante casi toda la década del 2000.

De modo que el período de 1940-2008 estuvo marcado por un descenso generalizado de la biodiversidad, con *Cyclotella stelligera* como especie dominante, con abundancias relativas invariablemente superiores (entre 1940-2010) a las de otras diatomeas, aunque acompañada por fluctuaciones de *Fragilaria acus*, *Nitzschia palea* y *N. amphibia* así como por 'repuntes' eventuales de *Aulacoseira granulata* –entre 1940-1954 y en 2011-2012–, de *Cyclostephanos dubius*, *Cyclotella meneghiniana* y *Fragilaria ulna* entre 2000-2005 y nuevamente de *A. granulata* en 2011-2012.

La mayoría de estas especies representativas (*C. stelligera*, *F. acus*, *A. granulata*, *F. ulna*, *C. dubius*) son plantónicas y basófilas, prósperas en ambientes alcalinos. De éstas, *C. dubius* y *F. acus* suelen encontrarse en aguas muy eutróficas y productivas, respectivamente. De hecho, *C. dubius* fue la única especie correlacionada (Tau b Kendall=0.571, $p=0.048$, $n=8$) con la clorofila *a*, siendo una especie halófila, la que al igual que *C. stelligera* parece haberse beneficiado del incremento de aporte de material alóctono (tasa sedimentación) con correlaciones

altamente significativa para la primera (Tau b Kendall=0.982, $p=0.001$, $n=8$) y significativa para la última (Tau b Kendall=0.514, $p=0.029$, $n=11$).

Por su parte, *C. stelligera* se ha asociado con lagos que han sufrido calentamiento de sus aguas, inducido por cambios en las características de los mismos, afectando –por ejemplo– la duración de los períodos de estratificación (Prof. John P. Smol, comunicación personal 2014), lo que estaría en correspondencia con el aumento la evaporación y la velocidad del viento.

Entre inicios del 2000s y 2008 fue un período marcado por niveles más bajos del Lago ($\bar{X}_{\text{período}}$: 118.77 msnm) y de oxígeno disuelto (valor del 2008: 0.83 mg.l⁻¹). En relación a ello, Molina et al (2008) reportaron que, debido a la influencia de fuertes vientos, se dio una pérdida temporal de la termoclina y como consecuencia el proceso natural de inversión ocurrida en lagos profundos, sin embargo, esta vez la circulación de materia orgánica acumulada en el fondo tuvo que haber sido de tal magnitud como para disparar hasta niveles tóxicos las concentraciones de amonio y de dióxido de carbono en toda la columna de agua.

Sin embargo, luego de este período se observa una inflexión puesto que en 2008-2012 la diversidad retornó, en tan solo 2 años, a valores incluso mayores a los años ‘30s-‘40s (Simpson: de 0.45 a 0.82) con una comunidad más uniforme (e^H/S : 0.55) y equitativa (J' : 0.76).

Por otro lado, de manera simultánea a lo ocurrido con la biodiversidad desde finales de los ‘40s hasta mediados de los 2000s, la clorofila *a* total y por lo tanto la productividad primaria del Lago incrementó ‘suavemente’, oscilando entre 0.050 y 0.069 mg.g⁻¹ peso seco, sugiriendo esto una reducción del aporte de las diatomeas (N° de valvas) a la productividad primaria del Lago, compensada posiblemente por el aumento en la contribución de otros grupos algales: quizás Chlorophyta y/o Cyanophyta?. No fue sino a partir del 2004 que tanto el comportamiento de la clorofila *a* como el número de valvas ‘se acoplaron’ nuevamente. A pesar de ello, entre 2006 y 2009 la productividad total del lago tuvo una caída, coincidente con el aumento tanto de la evaporación, velocidad del viento y concentraciones de amonio, a la vez que con los menores niveles del Lago (2004-2008).

En 130 años, la clorofila *a* incrementó unas 4.4 veces desde 0.018 mg.g⁻¹ peso seco en 1879 a 0.079 mg.g⁻¹ en el 2012.

Finalmente, se encontró una correlación positiva y significativa entre la tasa de sedimentación y clorofila *a* total (Tau b Kendall= 0.477, p=0.042, n=11), sugiriendo esto que el coeficiente de exportación (tasa de sedimentación/producción) se ha mantenido proporcional con el tiempo, incrementando por un lado la cantidad de material alóctono (tasa de sedimentación) a la vez que aumentando la producción (material autóctono) (O'Sullivan & Reynolds, 2003), lo que se reflejaría en estados menos eutrofizados, sin embargo, el Lago Masaya ha sido considerado eutrófico desde hace décadas (CIRA/UNAN-Managua, 1988-2013), por lo cual, el incremento de la clorofila *a* sugiere un aumento de la actividad propia, en consonancia con las características de los cuerpos de agua eutrofizados (Brönmark & Hansson, 2005).

V. CONCLUSIONES

- Durante los últimos 50 años o menos las concentraciones de nitratos, nitritos, oxígeno disuelto, DBO₅ y DQO y, para aproximadamente el mismo período el Lago se ha visto afectado por un fuerte descenso de nivel. Por el contrario, *augmentaron* el amonio, la sílice disuelta y la temperatura del agua, así como la evaporación de pana.
- Aunque con pocos datos, el incremento de la proporción NT/PT sugiere que el Lago está limitado por fósforo.
- El fechamiento indicó que los sedimentos del Lago Masaya corresponden a un período de 130 años entre 1879 y el 2012.
- La tasa de sedimentación ha aumentado exponencialmente durante todo el siglo XX, incrementando fuertemente a partir de la década de los '60, alcanzando durante la década del 2000 valores cada vez mayores, sugiriendo que los últimos 10 años han sido dramáticos en cuanto al aporte de sedimentos hacia el Lago, paralelo al aumento en cantidad y frecuencia de huracanes y tormentas tropicales.
- En este sentido, las tendencias de los metales en sedimento indican que la concentración Al ha aumentado lo cual puede estar asociado al incremento de los sedimentos transportados desde los sectores Sur y Suroeste de la cuenca, arrastrando los silicatos de los que el Al suele ser constituyente. Para todos los caso los valores mínimos de Al, Cd, Cr y Pb se proponen como las concentraciones de fondo del Lago.
- De las 46 taxa de diatomeas identificadas, 8 son las de mayor abundancia relativa en todas y cada una de las secciones, siendo éstas las que mejor pueden registrar los cambios limnológicos ocurridos.

- Los parámetros de biodiversidad indican un descenso de la biodiversidad de diatomeas, prácticamente desde antes 1879, empezando a mostrar signos de recuperación hasta finales de la década del 2000.
- Las pruebas de ANOVA basadas en las 32 especies del período datado indicaron diferencias significativas entre los parámetros de diversidad del período 1879- '50s respecto al período '50s-2012, siendo mayores la riqueza e índice de Simpson en el período más antiguo y por lo tanto siendo mayor la dominancia en el más reciente, con 5 especies ampliamente dominantes desde los '50s.
- Los cambios en los ensambles de diatomeas y las variables autoecológicas, sugieren un marcado período de transición entre finales del s.XIX e inicios del XX, reflejándose en un pérdida neta de 10 especies: 1 planctónica, 1 bento-planctónica y 8 bentónicas. Este período se corresponde con las zonas sugeridas por el análisis CONISS, con el que se definieron las 'zonas' utilizadas en este trabajo.
- Por otro lado, la riqueza de especies indiferentes a halofóbicas⁵¹ disminuyó, mientras la riqueza de especies mesohalobias⁵² permaneció estable. La pérdida de especies halofóbicas sugiere un aumento (leve?) de las concentraciones de las sales, durante el último siglo, quizás en correspondencia con el incremento tanto de los sedimentos, velocidad del viento y evaporación, así como de los descensos del nivel del Lago.
- Para el mismo período reportado⁵³, hubo una disminución de especies xenosaprobias y oligosaprobias, así como de las β -mesosaprobias, especies que prosperan a rangos bajos de materia orgánica. A pesar de la pérdida de las xenosaprobias a finales del s. XIX, es notable una recuperación desde hace unos 60-70 años de las especies de las otras categorías mencionadas, asociado esto quizás a la disminución de la DBO₅ durante las últimas décadas. Siendo quizás degradada por el bacterioplancton.

⁵¹ tolerantes a bajas concentraciones de sales.

⁵² tolerantes a concentraciones considerables de sales.

⁵³ finales del siglo XIX a los años '30s.

- La productividad primaria total del Lago ha incrementado prácticamente sin detenerse desde antes del período datado, pero con un fuerte incremento desde mediados de la década del 2000.
- En el sector este, el incremento exponencial de la población de Masaya y de la clorofila *a*, sugieren un aumento del aporte de aguas residuales y con estas, de los nutrientes que han impreso el estatus de Lago eutrofizado.
- Los descensos en el nivel del lago por un lado, el aumento de la tasa de sedimentación asociado al incremento de huracanes y tormentas, así como al de la evaporación, sugieren una pérdida de volumen, alterando la proporción de diatomeas plantónicas en relación a las bentónicas.
- Finalmente, si bien es cierto que pocas especies han definido la biodiversidad de diatomeas desde antes de 1879, los cambios cualitativos inferidos sugieren una degradación acentuada del Lago Masaya, caracterizada por un estado eutrófico prolongado, manteniéndose las condiciones necesarias para un grupo reducido de especies, denominadas en este trabajo como 'representativas', hayan dominado la ecología del mismo desde hace casi un siglo, alterando negativamente la uniformidad y equidad de dicha comunidad.

VI. RECOMENDACIONES

Aumentar el número de cores para realizar una reconstrucción cuantitativa, con el propósito de construir funciones de transferencia que permitan hacer inferencias sobre los valores históricos de variables determinantes (ej.: pH, temperatura, nivel del lago, estado trófico) para la comprensión de la limnología y ecología del Lago Masaya.

Realizar un análisis histórico de uso del suelo que permita modelar la cantidad de sedimentos transferidos hacia el Lago a través de los cauces del sur y sureste, estimando la carga de nutrientes y contaminantes. De esta manera, en conjunto con la información facilitada por este trabajo, se podrá definir medidas urgentes para la protección de los suelos.

Sin ánimo de contradecir lo antes mencionado, como medida precautoria, se recomienda la protección de las laderas de los principales cauces: Monimbó y Venecia, lo que requerirá mayor coordinación entre las autoridades municipales.

Incluir otros proxies paleoambientales en los análisis futuros, tales como subfósiles de organismos (chironomidae, chrysophyta, huevos de resistencia de cladóceros), procurando dilucidar las relaciones ecológicas y estructuras tróficas pasadas, así como de otros trazadores geoquímicos como las cenizas volcánicas, para distinguir entre los aportes de metales pesados provenientes de la actividad agrícola o de la actividad volcánica. Estas cenizas aportadas por el Volcán Masaya podrían ser útiles como marcadores de referencia para la futura datación de núcleos sedimentarios.

Presentar este trabajo a las autoridades pertinentes (Alcaldías de la Subcuenca, ENACAL).

VII. BIBLIOGRAFÍA

- AECID. (2011).** *NIC-013-B - Masaya: Proyecto de mejora y ampliación del sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad de Masaya.* Recuperado el 11 de 12 de 2012, de <http://www.fondodelagua.aecid.es/es/fcas/donde-trabaja/proyectos/NIC-013-B.html>
- Alcaldía de Masaya, & AMICTLAN. (2009).** *Plan Ambiental Municipal de Masaya 2009-2029.* Agència Catalana de Cooperació al Desenvolupament (ACCD) y Geólogos del Mundo (WG), Masaya; 110p.
- Appelby, P. G. (1998).** Dating recent sediments by Pb-210: problems and solutions. In E. Illus (Ed.), *Dating of sediments and determination of sedimentation rate* (pp. 7-24). Finland: STUK A-145.
- Australian Government. (2014).** *S.O.I. (Southern Oscillation Index) Archives: 1876 to present.* Obtenido de Bureau of Meteorology: <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml>
- BANIC. (1977).** *Informe Financiero 1976.* Managua.
- Barber, H., & Haworth, E. (1981).** A guide to the morphology of the diatom frustule. *Freshwater biological association*, Scientific Publication N°44, 122p.
- Barlow, G. W. (1976).** The Midas Cichlid in Nicaragua. In T. B. Thorston (Ed.), *Investigations of the Ichthyofauna of Nicaraguan Lakes.* (pp. 333-358). Lincoln: University of Nebraska.
- Barlow, G. W., Baylis, J. R., & Roberts, D. (1976).** Chemical analysis of some crater lakes in relation to adjacent Lake Nicaragua. In T. B. Thorston (Ed.), *Investigations of the Ichthyofauna of Nicaraguan Lakes* (pp. 17-20). Lincoln: University of Nebraska.
- Battarbee, R. (1999).** The importance of palaeolimnology to lake restoration. *Hydrobiologia*(395/396), 149-159.
- Bellinger, E. G., & Sigeo, D. C. (2010).** *Freshwater algae. Identification and use as bioindicators.* Wiley-Blackwell, 271p.
- Belt, T. (1874).** *The Naturalist in Nicaragua.* London: John Murray.

- Benoit, G., & Rozan, T. F. (2001).** 210Pb and 37Cs Dating methods in lakes: a retrospective study. *Journal of Paleolimnology*(25), 455-465.
- Bernal, J. P., Beramendi, L. E., Lugo-Ibarra, K. C., & Daesslé, L. W. (2010).** *Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario.* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 62, N°3, p.305-323.
- Bice, D. (1985).** Quaternary volcanic stratigraphy of Managua, Nicaragua. *Geol. Soc. Am. Bull.*(96), 553-566.
- Birks, H. J., Line, J. M., Stvenson, A. C., & ter Back, C. J. (1990).** Diatoms and pH Reconstruction. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*(327), 263-278.
- Bolaños-Garay, M. (21 de 12 de 1988).** Fechas memorables de Masaya. *El Nuevo Diario.*
- Bovallius, C. (1977).** *Viaje por Centroamérica, 1881-1883* (Re ed.). (C. V. Tardón, Trad.) Managua, Nicaragua: Fondo de promoción cultural del Banco de América, 302p.
- Brönmark, C., & Hansson, L.-A. (2005).** *The biology of lakes and ponds.* Oxford University Press. 285p.
- Buczko, K., Korponai, J., Padisák, J., & Starratt, S. W. (Eds.). (2009).** *Paleolimnological proxies as tools of environmental reconstruction in fresh water.* Springer, 327p.
- Caballero, M., Vásquez, G., Lozano-García, S., Rodríguez, A., Sosa-Nájera, S., Ruiz-Fernández, A., & Ortega, B. (2006).** Present limnological conditions and recent (ca. 340 yr) palaeolimnology of a tropical lake in the Sierra Los Tuxtles, eastern Mexico. *Journal of Paleolimnology*(35), 83-97.
- Cann, A. J. (2002).** *Maths from scratch for biologists.* Wiley & Sons, LTD. 228pp.
- Castagnino, W. A. (1976).** *CEPIS Comunicación técnica N°239. Asunto: polución de aguas en nicaragua.* 9 págs.
- Castillo-Hernández, E., Calderón P., H., Delgado Q., V., Flores M., Y., & Salvatierra S., T. (2006).** Situación de los recursos hídricos en Nicaragua. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 127-146.
- Christian Brothers. (1928).** Geografía de Nicaragua. Obtenido de <http://www.sandinorebellion.com/PhotoPgs/2maps-ChristianBros1928.html>

- CIRA/UNAN-Managua. (1988-2013).** *Base de datos institucional: Registros limnológicos del Lago Masaya (1988-1993, 2001, 2003-2004, 2008, 2012-2013).* Managua, Nicaragua.
- CIRA/UNAN-Managua. (2013).** *Establecimiento de Línea de Base sobre la calidad actual del agua y sedimentos de la Laguna de Masaya - año 2012.* Informe Preliminar, ENACAL, UNAN Managua, 339p.
- Cohen, A. (2003).** *Paleolimnology: the history and evolution of lake systems.* Oxford University Press, 550p.
- Dokulil, M. T. (2003).** Algae as ecological bio-indicators. En B. A. Markert, A. M. Breure, & H. G. Zechmeister (Edits.), *Bioindicators and biomonitors* (págs. 285-327). Elsevier Science Ltd.
- Dolgonosov, B. M., & Moiseenko, T. I. (2006).** A method for describing thecnogenic succession of diatom paleocomplex. *Doklady Earth Sciences*, 411A(9), 1489-1492.
- Duidam, P., & Morales, C. (1990).** *Investigación sobre los desechos sólidos de la ciudad de Masaya.* Tesis de Maestría: Universidad Nacional de Ingeniería, UNI. Managua-Nicaragua.
- ENACAL. (2008).** *Plan de desarrollo institucional. Estrategia sectorial de agua propuesta por ENACAL [Tabla 7-programas y proyectos de arrastre].* Recuperado el 2012, de <http://www.enacal.com.ni/informacion/Wc89973b236e289.htm>
- Fallu, M.-A., Allaire, N., & Pienitz, R. (2002).** Distribution of freshwater diatoms in 64 Labrador (Canada) lakes: species-environment relationships along latitudinal gradients and reconstruction models for water colour and alkalinity. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 59, 329-349. doi:10.1139/F01-211
- García, B., & Báez, A. P. (2012).** Atomic Absorption Spectrometry (AAS). En D. M. Farrukh (Ed.), *Atomic Absorption Spectroscopy* (págs. 1-12). ISBN: 978-953-307-817-5, In Tech, DOI: 10.5772/25925. Obtenido de <http://www.intechopen.com/books/atomic-absorption-spectroscopy/atomic-absorption-spectrometry-aas->
- García-Orellana, J., & Sánchez-Cabeza, J. A. (2012).** El ^{210}Pb como trazador de procesos ambientales. En J. A. Sánchez-Cabeza, M. Díaz-Asencio, & A. C. Ruiz-Fernández (Edits.), *Radiocronología de Sedimentos Costeros*

- Utilizando 210Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones* (págs. 4-19). Organismo Internacional de Energía Atómica - IAEA.
- Grimm, E. C. (1987).** CONNIS: A Frotran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 13(1), 13-35.
- Guerrero, M. (1989).** *Estudio de las diatomeas en el litoral del Lago Masaya*. Informe Interno, CIRA/UNAN-Managua, 14p.
- GWP-Centroamérica. (2011).** *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*. (F. Tábor, & M. Argüello, Edits.) Tegucigalpa, M.D.C., Honduras: ZONAF, Unión Europea, BCIE. Recuperado en 2013, de www.gwp.org/Global/GWP-CAm_Files/SituaciondelosRecursosHidricos.pdf
- Hammer, Ø., Harper, D. A., & Ryan, P. D. (2001).** PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*, 4(1), Art.4:9págs. Recuperado de http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hawryshyn, J. C. (2010).** *A diatom-based paleolimnological study of water-quality changes related to multiple anthropogenic stressors in Lake Simcoe*. Master Thesis, Queen's University, Ontario, Canadá; 211p.
- Hernández, S., Fernández-Collado, C., & Baptista, L. P. (2006).** *Metodología de la Investigación* (4ta ed.). 850p.
- Hill, M. O. (1973).** Diversity and Evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54(2), 427-432.
- Hoback, W. W., & Stanley, D. W. (2001).** Insects in hypoxia. *Journal of Insect Physiology*(47), 533-542.
- Hooker, E., Chow, N., & Saavedra, R. (1992).** *Composición, biomasa y productividad primaria del fitoplancton del Lago de Masaya*. Informe Interno, CIRA/UNAN-Managua, 11p.
- Incer-Barquero, J., & Gutiérrez H., C. (1975).** *Plan Maestro para el Establecimiento y Manejo del área del Volcán Masaya como parque*. Universidad Centroamericana - UCA, Catastros e Inventarios de RRNN del Instituto Geográfico Nacional, Banco Central de Nicaragua, FAO/PNUD. 144p.

- INEC. (1996).** *VII Censo de Población y III de Vivienda, Nicaragua 1995.*
- INEC. (2006a).** *VIII Censo de Población y IV de Vivienda, Nicaragua 2005. Población de Municipios. Vol.IV. 551p.*
- INEC. (2006b).** *VIII Censo de Población y IV de Vivienda, 2005. Resumen Censal.* Recuperado en 2012, de <http://www.inide.gob.ni/>
- INETER. (1980).** *Levantamiento hidro-topográfico de la Laguna de Masaya y sus alrededores (Batimetría).* INETER, Departamento de Hidrografía.
- INETER. (1998).** *Hojas topograficas 2951-I, II, III y IV: Masaya y sus alrededores.* INETER, Departamento de Geodesia y Cartografía.
- INETER. (2001).** *Datos sobre la hidrología de Nicaragua. Lagos y lagunas de Nicaragua.* Información actualizada el 01/02/2001, INETER, Departamento de Recursos Hídricos. Recuperado en 2013 y 2014, de <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/dirgral/datoshidro.htm>
- INETER. (2006a).** *Batimetría de la Laguna de Masaya.* Base de Datos de Oct. 2006, INETER, Dirección General de Recursos Hídricos, Dirección de Hidrografía.
- INETER. (2006b).** *Datos sobre la "Laguna de Masaya".* Información actualizada el 27/04/2005, INETER, Dirección General de Recursos Hídricos, Dirección de Hidrografía. Recuperado en 2014, de <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/HIDROGRAFIA%20WEB/Lagunas/Masaya.htm>
- INETER. (2014).** *Huracanes que han afectado a Nicaragua, 1892-2002.* Recuperado en 2013 de: <http://web-geofisica.ineter.gob.ni/desliza/met/huracanes-list.html>
- INIDE. (2007).** *Anuario estadístico.* 384p.
- INIDE. (2008).** *Anuario estadístico.* 384p.
- INIFOM. (2010).** *Ficha técnica del Municipio de Masaya. Caracterización.*
- Juggins, S. (2007).** *C2, Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation.* User guide version 1.5, Newcastle University, U.K., 73p. Recuperado el 2014, de <https://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/software.htm>
- Juggins, S., & et al (Edits.). (2012).** *European Diatom Database (EDDI) On the web at Newcastle University.* Recuperado el 09 de 2014, de Base de datos de Europa, África y Asia.: <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/taxonomy.jsp?TaxId=Salinity> (última revisión de la DIF en 2012)

- Kasim, M., & Mukai, H. (2006).** Contribution of benthic and epiphytic diatoms to clam and oyster production in the Akkeshi-ko estuary. *Journal of Oceanography*, 62, 267-281.
- Koide, M., Soutar, A., & Goldberg, E. D. (1972).** Marine Geochronology with ²¹⁰Pb. *Earth and Planetary Science Letters*(14), 442-446.
- Krásný, J., & López, A. (1988).** *Más agua para Managua...¿Pero de Dónde?* INETER, Dirección General de Hidrometeorología y Suelos.
- Kühl, E. (2004).** *Nicaragua y su café.* Hispamer. 373p.
- Kutterolf, S., Freund, A., Perez, W., Whermann, H., & Schmincke, H. U. (2007).** Late Pleistocene to Holocen temporal succession and magnitudes of highly-explosive volcanic eruptions in west-central Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*(163), 52-82.
- La Prensa. (2006).** *80 años de lucha por la verdad y la justicia.* La Prensa, 182p.
Obtenido de http://enriquebolanos.org/context.php?item=coleccion-diversa&m=internal_book_detail&id=269
- Laflamme, M., Shiffbauer, J. D., & Dornbos, S. Q. (2011).** Quantifying the evolution of early life. Numerical approaches to the evaluation of fossils and ancient ecosystems. En N. H. Landman, & P. J. Harries, *Topics in Geobiology, Vol. 36* (pág. 199). Springer. ISBN 978-94-007-0679-8. Obtenido de http://books.google.com.ni/books?id=ezyIBGqi_DIC&pg=PA199&dq=Buzas+and+Gibson%27s+evenness&hl=es&sa=X&ei=WyxAVluFOtGQgwTKh4HgAQ&ved=0CB8Q6AEwAA#v=onepage&q&f=true
- Lampert, W., & Sommer, U. (2007).** *Limnoecology. The Ecology of Lakes and Streams* (2nd ed.). Oxford University Press, 324pp.
- Lightburn, M., & Montenegro-Guillén, S. (1979).** *Reporte de progresos de las investigaciones limnológicas e ictiológicas en la Laguna de Masaya.* UNAN-Managua.
- López M., C., & Prado B., V. (2013).** *Diagnóstico de la contaminación ambiental de la laguna de Masaya por residuos sólidos.* ENACAL, FCAS, AECID. VEOLIA water, TecniTasa. 78p.
- MAGFOR. (2000).** Base de datos cartográfica. *Uso del suelo.* Nicaragua.
- Magurran, A. E. (2004).** *Measuring biological diversity.* Blackwell Publishing. 256pp.

- MARENA. (2010).** *Caracterización de la Cuenca N°69, del Río San Juan.* MARENA, Dirección de Recursos Hídricos y Cuencas Hidrográficas, Managua, 47p.
- Martin, R. S., Mather, T. A., Pyle, D. M., Day, J. A., Witt, M. L., Collins, S. J., & Hilton, R. G. (2010).** Major and trace element distributions around active volcanic vents determined by analyses of grasses: implications for element cycling and bio-monitoring. *Bull. Volcanol.*(72), 1009-1020. doi:10.1007/s00445-010-0374-7
- Martínez, V. (2010).** Fechamiento de sedimentos en el Mar Caribe de Nicaragua, bahía de Bluefields, utilizando técnicas adicionales al análisis ²¹⁰Pb. *Universidad y Ciencia* (8), 8-12.
- Michelutti, N., Blais, J. M., Cumming, B. F., Paterson, A. M., Rühland, K., Wolfe, A. P., & Smol, J. P. (2010).** Do spectrally inferred determinations of chlorophyll a reflect trends in lake trophic status? *J. Paleolimnol.*(43), 205-217. doi:10.1007/s10933-009-9325-8
- Molina, J.; McCrarry, J.; Saavedra C., R. y Vammen, K. (2008).** Resumen del Estudio de mortandad de peces en Enero del 2008, Laguna de Masaya. CIRA/UNAN-Managua, FUNDECI/GAIA.
- Montgomery-Santos, & Heileman-Chan. (1979).** *Proyecto Más Agua para Managua, Fase I. Informe preliminar sobre la investigación de fuentes potenciales de abastecimiento de agua para Managua.* INAA, Managua.
- Moreno, C. E. (2001).** *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). Zaragoza, España: M&T-Manuales y Tesis SEA. 84p.
- Moss, B. (2010).** *Ecology of freshwaters : a view for the twenty-first century* (4ta ed.). Wiley-Blackwell. 470p.
- Nalepka, D., & Walanus, A. (2003).** Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobotanica*, 43(1), 125-134.
- Neiderlein, G. (1898).** *The State of Nicaragua of the greater Republic of Central America.* The Philadelphia Commercial Museum. 93p.
- Nikulina, T. V., & Kociolek, J. P. (2011).** Diatoms from hot springs from Kuril and Sakhalin Islands (Far East, Russia). En J. Seckbach, & J. P. Kociolek (Edits.),

- The Diatom World. Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology serie; Book 19* (págs. 335-363). Springer Science & Business Media.
- NOAA(a). (2014).** *Historical El Nino/La Nina episodes (1950-present)*. Obtenido de Climate Prediction Center del National Weather Service: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- NOAA(b). (2014).** *Historical Hurricane Tracks*. Obtenido de <http://coast.noaa.gov/hurricanes/>
- O'Sullivan, P. E., & Reynolds, C. S. (Edits.). (2003).** *The Lakes Handbook. Vol 1: Limnology and Limnetic Ecology*. Blackwell Publishing.
- Patterson, G. G. (1995).** *Changes in bathymetry for Lake Katherine and Wood Lake, Richland County, South Carolina, 1989-93*. Open-File Report 95-198., U.S. Geological Survey. Prepared in cooperation with the South Carolina Department of Transportation, Columbia, South Carolina.
- Pedroza, M. E. (2012).** *Curso de Metodología de la Investigación. IV Ciclo de la Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua, CIRA/UNAN-Managua*. Disco Multimedia. Revisado en el 2013.
- Pereira, R. S., Navas, N. M., & Mora, N. (2012).** *Caracterización de 15 municipios pobres de Nicaragua*. FIDEG, Managua-Nicaragua. 153p.
- Pérez, A. M. (2004).** *Aspectos conceptuales, análisis numérico, monitoreo y publicación de datos sobre biodiversidad*. Managua: ARAUCARIA XXI-MARENA, 300p. ISBN: 978-99924-809-7-7.
- Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002).** *Experimental design and data analysis for biologists*. United Kingdom. Cambridge University Press. 537pp.
- Reavie, E. D., & Smol, J. P. (2001).** Diatom-environmental relationships in 64 alkaline southeastern Ontario (Canada) lakes: a diatom-based model for water quality reconstructions. *Journal of Paleolimnology*(25), 25-42.
- Roldán P., G., & Ramírez R., J. (2008).** *Fundamentos de limnología neotropical* (2da ed.). Universidad de Antioquía. Medellín, Colombia. 440p.
- Rühland, K. M., Smol, J. P., & Pienitz, R. (2003).** Ecology and spatial distributions of surface-sediment diatoms from 77 lakes in the subarctic Canadian treeline region. *Can. J. Bot.*(81), 57-73. doi:10.1139/B03-005

- Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-Cabeza, J. A., & Díaz-Asencio, M. (2012).** *Radiocronología de sedimentos costeros utilizando ^{210}Pb : modelos, validación y aplicaciones.* Viena: OIEA. STI/PUB/1538. 105p. ISBN 978-92-0-325210-2.
- Rymer, H., van Wyk de Vries, B., & Stix, J. (1998).** Pit crater structure and processes governing persistent activity at Masaya Volcano, Nicaragua. *Bull. Volcanol*(59), 345-355.
- Salinas, M. (2007a).** *Estudios y diseño del sistema de agua potable, revisión y conclusión del diseño final del sistema de alcantarillado sanitario de la ciudad de Masaya.* ENACAL, 141p.
- Salinas, M. (2007b).** *Estudio y viabilidad ambiental del proyecto de "Mejoramiento y rehabilitación del sistema de alcantarillado de Masaya".* ENACAL, 102p.
- Seckbach, J., & Kociolek, J. P. (Edits.). (2011).** *The Diatom World. Series: Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology, Vol.19.* Springer, Dordrecht. 534p. e-ISBN: 978-94-007-1327-7.
- Simpson, E. H. (1949).** Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688.
- Sládeček, V. (1973).** System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie und Ergebnisse Limnologie*, 7, 1-218.
- Slate, J. E., Johnson, T. C., & Ted, C. M. (2013).** Impact of pre-Columbian agriculture, climate change, and tectonic activity inferred from a 5,700-year paleolimnological record from Lake Nicaragua. *J. Paleolimnol.*, 50: 139-149.
- Smol, J. P. (2002).** *Pollution of Lakes and Rivers. A paleoenvironmental perspective* (1st ed.). Hodder Headline Group. 280pp.
- Smol, J. P. (2008).** *Pollution of Lakes and Rivers. A paleoenvironmental perspective* (2nd ed.). Blackwell Publishing. 383pp.
- Smol, J. P. (2010).** The power of the past: using sediments to track the effects of multiple stressors on lake systems. *Freshwater Biology*, 55(Suppl. 1), 43-59.
- Smol, J. P., & Reavie, E. E. (2001).** Diatom-environmental relationships in 64 alkaline southeastern Ontario (Canada) lakes: a diatom-based model for water quality reconstructions. *Journal of Paleolimnology*, 25, 25-42.

- Smol, J. P., & Stoermer, E. F. (Eds.). (2010).** *The Diatoms. Applications for the Environmental and Earth Sciences.* (2nd ed.). Cambridge University Press. 667pp.
- Somarriba, E. (30 de 05 de 2001).** El Coyotepe y Cailagua: Monumentos nacionales abandonados en Masaya. *El Nuevo Diario.*
- Spaulding, S. A., Lubinski, D. J., & Potapova, M. (2010).** *Diatoms of the United States.* Recuperado el 20 de 01 de 2013, de <http://westerndiatoms.colorado.edu>
- Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., & Lowe, R. L. (Edits.). (1996).** *Algal Ecology. Freshwater Benthic Ecosystems.* USA: Aquatic Ecology Series; Academic Press, Elsevier. 753p.
- ter Braak, C. J., & van Dam, H. (1989).** Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia*(178), 209-223.
- The Rockefeller Foundation. (1927).** *Annual Report.* USA. 385pp.
- Thorston, T. D. (Ed.). (1976).** *Investigations of the Ichthyofauna of Nicaraguan Lakes.* Lincoln: University of Nebraska.
- UNEP. (2006).** *Water Quality for Ecosystem and Human Health.* Recuperado el 18 de 12 de 2012, de GEMS/Water Programme (Burlington, Canadá): <http://www.gemswater.org>
- UNEP. (2012).** *Water Quality section. Assessment and Indicators portal.* Recuperado en 2012 <http://www.unep.org/gemswater/AssessmentsandIndicators/WaterQualit>
- US EPA (Ed.). (2014).** *Aquatic Resources Monitoring: Aquatic Indicators.* (National Health Environmental Effects Research Laboratory (NHEERL)) Recuperado el 2014, de <http://www.epa.gov/nheerl/arm/indicators/indicators.htm>
- Valle-Castillo, J. (2006).** *Memorial de Masaya.* Ediciones de la Fundación Andrés Vega Bolaños, 251p. Obtenido de http://enriquebolanos.org/context.php?item=autores-selectos&m=internal_book_detail&id=238
- Vammen, K., Hurtado, I., Picado, F., Flores, Y., Calderón, H., Delgado, V., Sáenz, R. (2011).** Recursos hídricos en Nicaragua: una visión estratégica. In B. Jiménez Cisneros, & J. Galizia Tundisi (Eds.), *Diagnóstico del agua en las Américas* (pp. 359-403). Foro Consultivo, Científico y Tecnológico, AC. IANAS. ISBN: 978-607-9217-04-4.

- Vanegas, L. (1993).** *Estado de contaminación fecal en el Lago de Masaya, en un período comprendido de enero 1990 a enero 1991.* Monografía para optar a la Licenciatura en Ecología y Recursos Naturales, UCA, Managua. 42p.
- Vanegas, L. (2001).** *Eficiencia de las lagunas de estabilización de Masaya a través del uso de indicadores bacterianos de contaminación fecal y bacterias patógenas.* Informe Interno, CIRA/UNAN-Managua, 7p.
- Vollenweider, R. (1983).** *Eutrophication. Notes distributed during the II Meeting of the Regional Project on the Eutrophication of Tropical Lakes.*
- Vollenweider, R. A., & Kerekes, J. J. (1981).** Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication. In U.S. Environmental Protection Agency (Ed.), *Restoration of Inland Lakes and Waters* (pp. 25-36). Washington, D.C, USA.
- Vollenweider, R., & Kerekes, J. (1982).** *Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control.* OCDE, Paris.
- Waid, R., Raisley, R. L., McKaye, K. R., & McCrary, J. (1999).** Zoogeografía ictiológica de las lagunas cratéricas de Nicaragua. *Encuentro*(51), 65-81.
- Wetzel, R. G. (2001).** *Limnology* (3rd ed.). San Diego, California: Academic Press.
- Wetzel, R. G., & Likens, G. E. (2000).** *Limnological Analyses. 3rd Ed.* Springer. 429p.
- Wilson, S. E., Cumming, B. F., & Smol, J. P. (1996).** Assessing the reliability of salinity inference models from diatom assemblages: an examination of a 219-lake data set from western North America. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 53, 1580-1594.
- Wolfe, A. P., Vinebrooke, R., Michelutti, N., Rivard, B., & Das, B. (2006).** Experimental calibration of lake-sediment spectral reflectance to chlorophyll a concentrations: methodology and paleolimnological validation. *Journal of Paleolimnology*(36), 91-100. doi:10.1007/s10933-006-0006-6.
- Wong-Lanuz, A. (2004).** *Concepción ambiental del recurso agua en la población relacionada a la cuenca de la Laguna de Masaya.* Tesina -resumen-, CIEMA/UNI, Managua.

Zoppis de Senna, R. (1964). *Informe general sobre los estudios geológico-mineros efectuados durante el año 1955-1956.* Departamento de Minas e Hidrocarburos, Nicaragua. Revista Conservadora, N°43. Obtenido de http://enriquebolanos.org/coleccion_RC/305.pdf

ANEXOS

i. Anexos de la metodología



Figura 9. Extracción de los núcleos sedimentarios (Cores) en el PC-01 del Lago Masaya
Simbología: **a-b:** medición de parámetros físico-químicos del Lago, en el PC-01; **c-g:** extracción del Core; **h-i:** medición de parámetros en la fase líquida del Core; **j-k:** etiquetado del Core

Tabla 3. Datos generales sobre el punto de extracción y parámetros medidos en el Lago

Tabla 3a	Datos generales
Coord E	596273
Coord N	1323158
Altitud (msnm)	135±15
Profundidad de extracción de los Cores	77*
Fecha	01-jun-13
Hora inicio	06 h 40
Hora finalización	09 h 00
Sitio	Lago Masaya
Municipio	Masaya
Código del Punto	PC-01

*Metros bajo la superficie del Lago.

Continuación...

Tabla 3b	Parámetro	Profundidad	
		0 m	50 m
	Temperatura (°C)	29.62	-
	pH	9.26	7.90
	Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	428.00	425.00
	Sólidos Totales Disueltos (ppm)	214.00	215.00
	Oxígeno Disuelto (ppm)	7.49	0.80
	% Saturación de Oxígeno	103.90	9.80

Tabla 4. Parámetros medidos en la fase líquida de los núcleos sedimentarios

Parámetro	Core 1	Core 2	Core 3	Core 4
Profundidad de extracción (mbnsl)*	76.9	76.9	76.9	76.9
Hora de inicio extracción (hhmm)**	07h40	07h59	NR	08h19
Ascenso (min)	3.5	3	3	3
Hora en que se selló el core (previo a medición)	07h45	-	NR	-
Hora de medición de parámetros (hhmm)	07h55	MNR	MNR	08h25
Hora en que se selló definitivamente	07h46	08h05	-	08h26
Tiempo transcurrido extracción-mediación (min)***	15	-	-	6
Temperatura (°C)	28.8	-	-	28.4
pH	8.56	-	-	8.2
Presión (mm Hg)	735.6	-	-	735.5
Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	437	-	-	430
Sólidos Totales Disueltos (ppm)	220	-	-	218
Oxígeno Disuelto (ppm)	3.44	-	-	NR

*Metros Bajo el Nivel de la Superficie del Lago

**horas y minutos, en que se inició el ascenso del Core

***tiempo transcurrido entre la hora de inicio de extracción y medición de los parámetros

MNR: Medición No Realizada. Para los Cores 2 y 3, no se realizó medición de parámetros dado que durante la toma del mismo se perdió la fase líquida. Se cree que hubo demasiada fuerza de ingreso del Corer.

NR: No Registrado



Figura 10. Seccionamiento del Core 01

Simbología: **a:** balanza analítica, Lab. Radioquímica Ambiental (RQA), CIRA/UNAN-Managua; **b:** bitácora del Lab. RAQ; **c:** inspección previa al seccionamiento; **d:** drenado de la fase líquida; **e-k:** seccionamiento; **l-m:** pesaje de cada sección y registro en bitácora.



Figura 11. Oxidación de la materia orgánica para facilitar extracción de diatomeas

ii. Anexos de Resultados

Tabla 5. Estadísticos descriptivos del pH (1961-1970 al 2012)

	pH	
	(unidades)	
	BDD completa	Sin dato de 2008
n	12	11
Media	8.390	8.495
Mediana	8.401	8.406
Desv. típ.	0.430	0.236
Varianza	0.185	0.56
Mínimo	7.229	8.221
Máximo	8.963	8.963

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
pH	BDD completa	8.433031	8.469612	8.422531
	Sin dato de 2008	8.465203	8.476820	8.484720

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de la *temperatura* (1988-2012) y el OD (1991-2012)

	Temperatura	OD
	(°C)	(mg.l ⁻¹)
n	8	5
Media	26.849	3.124
Mediana	27.409	3.560
Desv. típ.	1.818	1.644
Varianza	3.304	2.704
Mínimo	23.000	0.834
Máximo	28.707	5.272

	Estimador-M de...		Media recortada al 5%
	Huber ^a	Hampel ^b	
OD	3.176	3.176	3.132

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

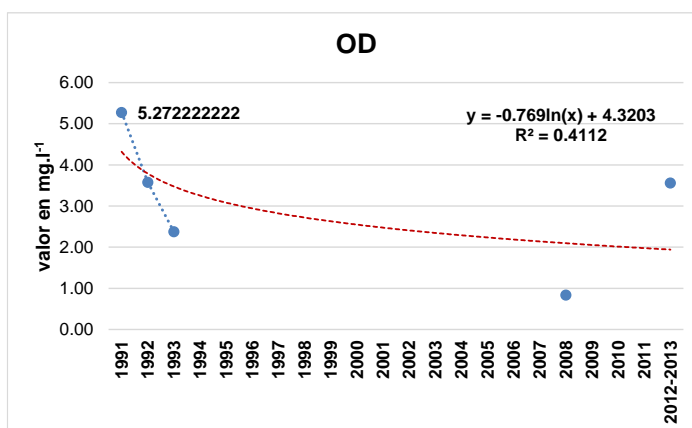


Gráfico 39. Comportamiento temporal del OD

En rojo y punteada la curva de mejor ajuste (R^2) –estrictamente para fines descriptivos–.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos del OD (1991-2012), DBO_5 y DQO, de 1988 al 2012.

	OD	DBO_5		DQO
		(mg.l ⁻¹)		
		BDD completa	Sin dato de 1989	
N	5	8	7	7
Media	3.124	5.399	4.813	31.625
Mediana	3.560	5.120	5.110	33.6380
Desv. típ.	1.644	1.923	1.051	9.336
Varianza	2.704	3.697	1.104	87.157
Mínimo	0.834	3.517	3.517	21.290
Máximo	5.272	9.504	6.557	46.518

	Estimador-M de...		Media recortada al 5%
	Huber ^a	Hampel ^b	
DBO_5	5.030	5.054	5.276
	4.730	4.778	4.788

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos de la turbidez de 1988 al 2012, STD y CE de 1965 al 2012.

	Turbidez		STD	CE
	(UNT)	(mg.l ⁻¹)	(mg.l ⁻¹)	(μS.cm ⁻¹)
	BDD completa	Sin dato de 1993	-	-
n	7	6	12	11
Media	20.310	6.681	311.495	427.265
Mediana	6.5830	5.881	297.644	428.576
Desv. típ.	36.131	2.506	74.326	21.955
Varianza	1305.456	6.278	5524.383	482.004
Mínimo	4.200	4.200	200.000	393.999
Máximo	102.083	9.900	413.066	459.639

Turbidez	Estimador-M de...	Media recortada al 5%		
		Huber ^a	Hampel ^b	
BDD completa		7.213	6.681	16.662
Sin dato de 1993		6.126	6.383	6.640

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

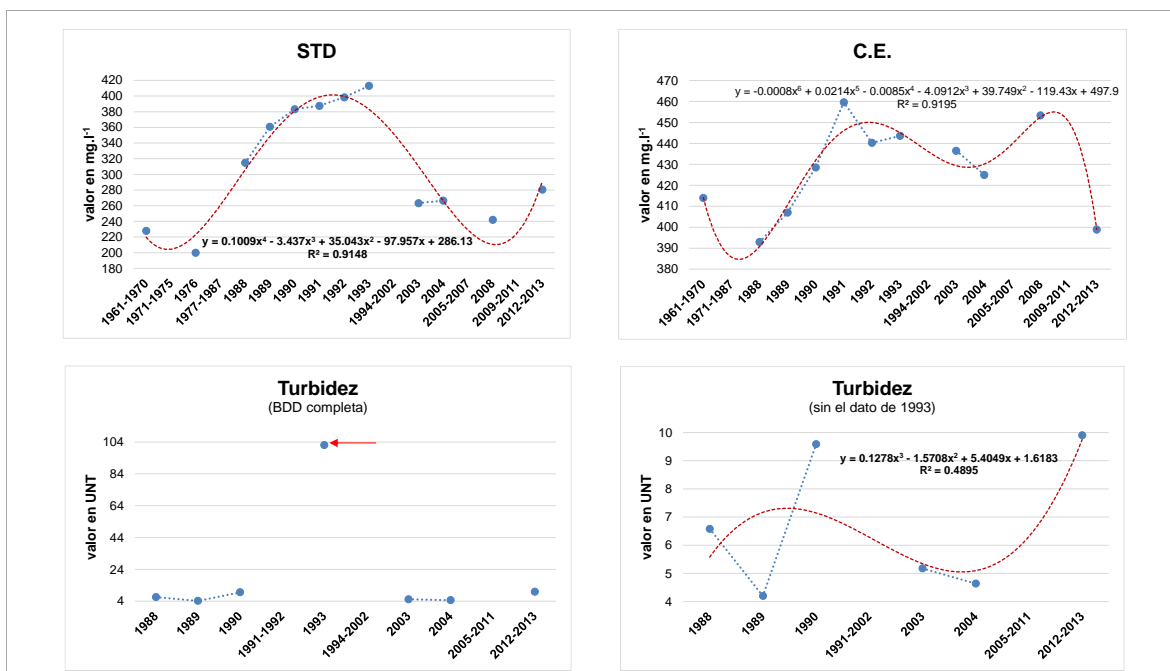


Gráfico 40. Comportamiento temporal de los STD, CE y Turbidez

Las curvas en rojo (punteadas) representan las curvas de mejor ajuste (R^2), presentada estrictamente para fines descriptivos.

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de NO_3^- , NO_2^- (1965-2012), de OD, NH_4^+ y NT (1990-2012).

	OD	NO_3^-	NO_2^-		NH_4^+	NT
	(mg.l ⁻¹)					
	-	-	BDD completa	Sin dato de 1991	-	-
n	5	10	10	9	7	3
Media	3.124	0.673	0.124	0.061	0.620	1.186
Mediana	3.560	0.313	0.050	0.048	0.366	0.954
Desv. típ.	1.644	0.801	0.208	0.060	0.419	0.734
Varianza	2.704	0.642	0.043	0.004	0.176	0.538
Mínimo	0.834	0.025	0.002	0.002	0.216	0.596
Máximo	5.272	2.200	0.693	0.183	1.252	2.007

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
NO_3^-	-	0.346	0.303	0.625
NO_2^-	BDD completa	0.059	0.054	0.099
	Sin dato de 1991	0.049	0.053	0.057
NH_4^+	-	0.460	0.461	0.607
NT	-	1.014	1.078	Valor demasiado bajo

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 10. Estadísticos descriptivos del *fósforo total* y *fósforo disuelto total*, de 1988 al 2012.

	FT		FDT	
	(mg.l ⁻¹)			
	BDD completa	sin dato de 1988	BDD completa	Sin dato del 2003
n	9	8	7	6
Media	0.067	0.056	0.020	0.016
Mediana	0.049	0.047	0.015	0.015
Desv. típ.	0.042	0.025	0.013	0.007
Varianza	0.002	0.001	0.000	0.000
Mínimo	0.026	0.026	0.005	0.005
Máximo	0.158	0.104	0.047	0.026

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
FT	BDD completa	0.057	0.057	0.065
	Sin dato de 1988	0.052	0.053	0.055
FTD	BDD completa	0.018	0.018	0.020
	Sin dato del 2003	0.016	0.016	0.016

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de los principales cationes: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, de 1965 al 2012.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺		K ⁺		Na ⁺
	(mg.l ⁻¹)					
		BDD completa	Sin dato de 1990	BDD completa	Sin dato de 1961-1970	
N	10	10	9	10	9	10
Media	14.869	16.744	13.993	15.462	15.735	61.786
Mediana	14.830	14.348	14.324	15.489	15.560	60.324
Desv. típ.	1.136	8.833	1.631	1.092	0.707	9.367
Varianza	1.290	78.029	2.662	1.192	0.500	87.740
Mínimo	13.445	10.343	10.343	13.000	14.782	50.000
Máximo	17.173	41.500	16.159	17.144	17.144	73.205

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
Mg²⁺	BDD completa	14.394	14.291	15.724
	Sin dato de	14.228	14.354	14.076
K⁺	BDD completa	15.549	15.592	15.505
	Sin dato de 1961-1970	15.667	15.667	15.710

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de los principales aniones: Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- (1960-2012).

	HCO_3^-	CO_3^{2-}		SO_4^{2-}		Cl^-	
		(mg.l ⁻¹)					
	-	BDD completa	Sin dato de 1991	BDD completa	Sin dato de 1988	BDD completa	Sin datos de 1988 ni 1991
N	10	10	9	11	10	10	8
Media	229.510	29.981	20.113	1.154	0.851	10.780	10.747
Mediana	227.549	20.774	20.418	1.037	0.891	10.588	10.588
Desv. típ.	25.110	31.948	7.261	1.167	0.627	1.533	1.070
Varianza	630.520	1020.694	52.726	1.362	0.393	2.349	1.145
Mínimo	186.159	8.959	8.959	0.000	0.000	8.356	9.085
Máximo	272.092	118.796	30.985	4.180	1.685	13.471	12.854

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
CO_3^{2-}	BDD completa	21.615	20.159	26.215
	Sin dato de 1991	20.417	20.342	20.129
SO_4^{2-}	BDD completa	0.974	0.897	1.050
	Sin dato de 1988	0.865	0.851	0.852
Cl^-	BDD completa	10.669	10.610	10.765
	Sin datos de 1988 ni 1991	10.671	10.626	10.722

a: constante de ponderación es 1.339.// b: constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

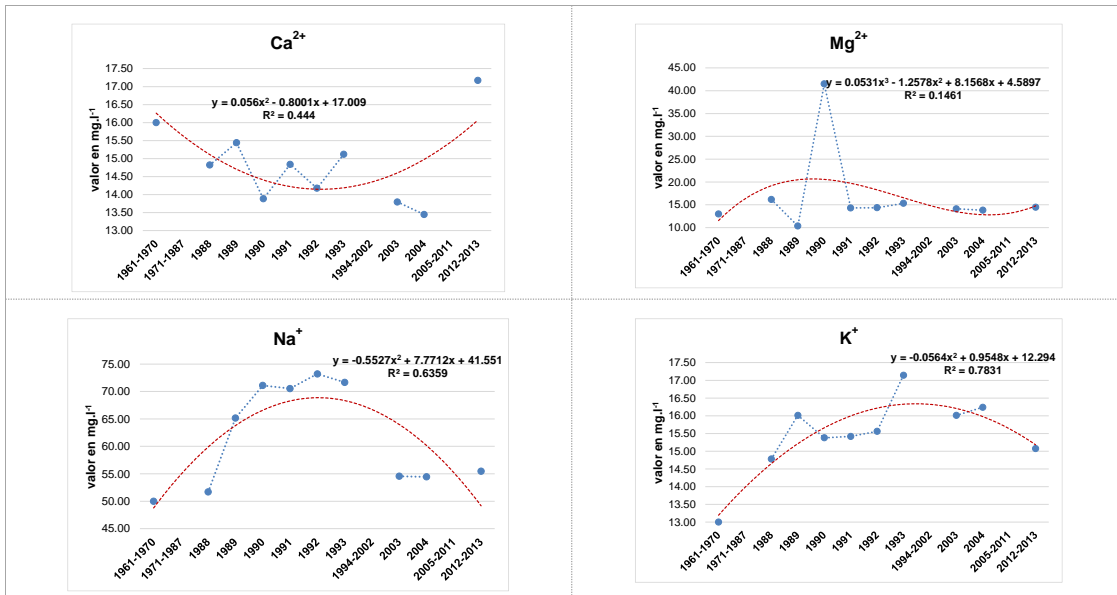


Gráfico 41. Comportamiento temporal de los principales cationes.

Las curvas en rojo (punteadas) representan las curvas de mejor ajuste (R^2).

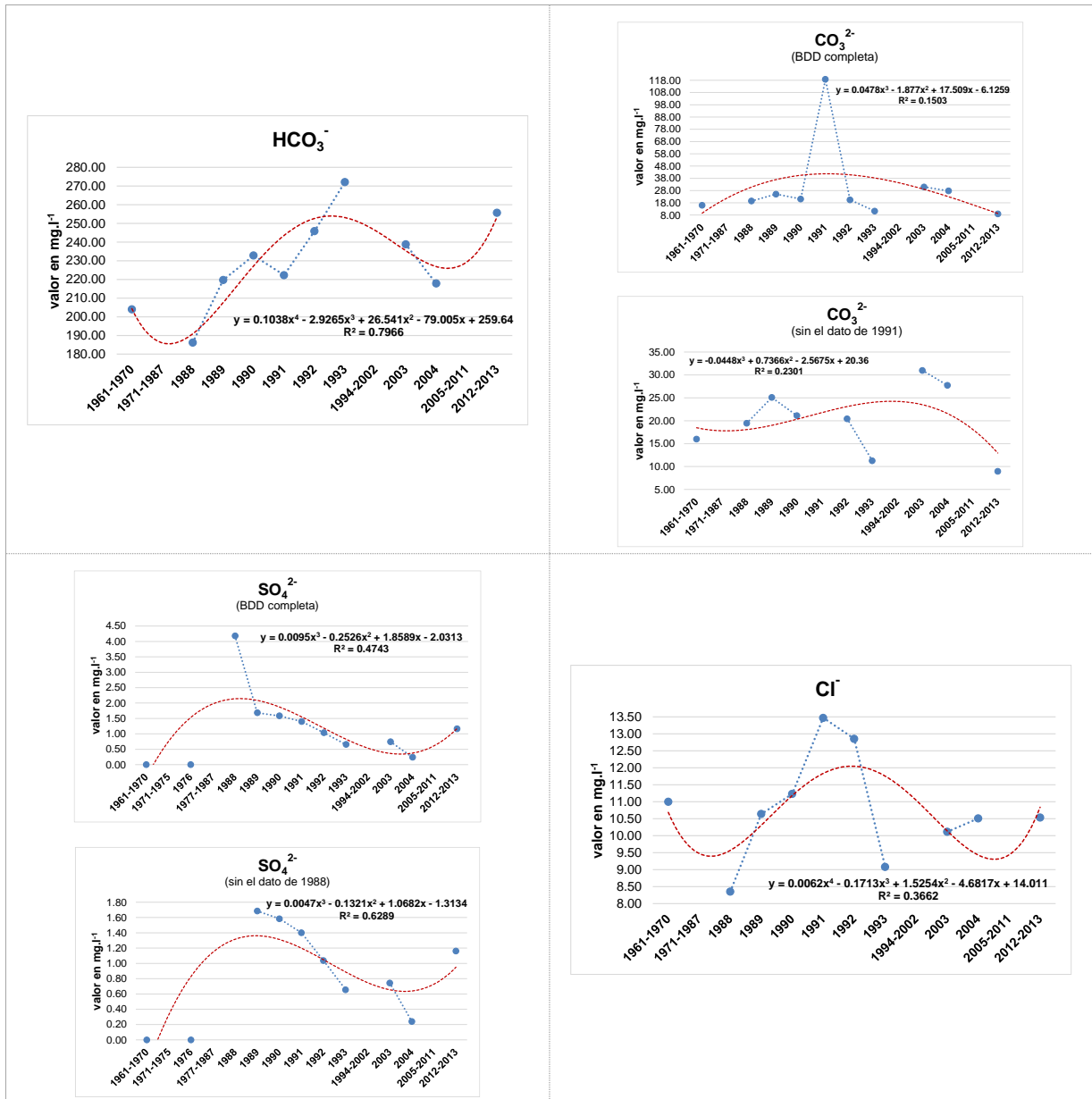


Gráfico 42. Comportamiento temporal de los principales aniones.

Las curvas en rojo (punteadas) representan las curvas de mejor ajuste (R^2).

Tabla 13. Estadísticos descriptivos de *alcalinidad total* (1988 al 2012) *dureza total* (60's al 2012) en relación a concentraciones de CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

	Alc-T		Dza-T	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}
	BDD completa	Sin dato de 1988	(mg.l ⁻¹)				
			-	-	-	-	-
N	9	8	10	10	10	10	10
Media	224.205	229.541	95.326	29.981	229.510	14.869	16.744
Mediana	227.738	228.819	93.726	20.774	227.549	14.830	14.348
Desv. típ.	17.744	8.180	7.921	31.948	25.110	1.136	8.833
Varianza	314.855	66.920	62.749	1020.694	630.520	1.290	78.029
Mínimo	181.513	218.030	81.640	8.959	186.159	13.445	10.343
Máximo	241.825	241.825	105.700	118.796	272.092	17.173	41.500

Nota: Para los iones (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}) verificar las Tabla 11 y 12.

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
Alc-T	BDD completa	227.780478	228.605357	225.597519
	Sin dato de 1988	229.288341	229.405251	229.498194

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 14. Estadísticos descriptivos de la concentración de *sílice disuelta* (1965-2012).

	SiO ₂	
	(mg.l ⁻¹)	
	BDD completa	Sin dato de 1961-1970
n	6	5
Media	17.106	19.843
Mediana	19.579	20.591
Desv. típ.	7.052	2.415
Varianza	49.729	5.832
Mínimo	3.400	16.425
Máximo	22.730	22.730

		Estimador-M de...		Media recortada al 5%
		Huber ^a	Hampel ^b	
SiO₂	BDD completa	19.127	19.653	17.551
	Sin dato de 1988	20.033	19.843	19.873

a: La constante de ponderación es 1.339.

b: Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 15. Estadística descriptiva de actividad de ^{210}Pb y masa seca acumulada del core datado.

	Actividad de ^{210}Pb	Masa Seca Acumulada
	(Bq.kg ⁻¹)	(g.cm ⁻²)
n	23	23
Media	59.03	1.45
Mediana	53.81	1.42
Desv. típ.	26.18	0.99
Varianza	685.37	0.98
Mínimo	9.15	0.03
Máximo	104.09	3.28
\bar{x} al 5%	59.32	1.43

\bar{x} al 5%: media recortada al 5%

Nota: se dataron un total de 23 secciones de 0.5 cm del Core 02.

Tabla 16. Fechas obtenidas bajo el modelo CRS e interpoladas.

Prof. Pto. \bar{x} (cm)	Año	Error (año)	Rango		Modelo
0.00	2013.410	0.000	2013.410	2013.410	CRS
0.25	2011.980	0.019	2011.961	2011.999	
0.75	2011.670	0.080	2011.590	2011.750	
1.25	2010.890	0.097	2010.793	2010.987	
1.75	2010.120	0.105	2010.015	2010.225	
2.25	2009.420	0.112	2009.308	2009.532	
2.75	2008.370	0.120	2008.250	2008.490	
3.25	2006.410	0.121	2006.289	2006.531	
3.75	2004.450	0.125	2004.325	2004.575	
4.25	2002.320	0.100	2002.220	2002.420	
4.75	1998.560	0.094	1998.466	1998.654	
5.25	1993.650	0.244	1993.406	1993.894	
5.75	1989.500	0.365	1989.135	1989.865	
6.25	1986.440	0.461	1985.979	1986.901	
6.75	1981.150	0.645	1980.506	1981.795	
7.25	1974.570	0.914	1973.656	1975.484	
7.75	1969.170	1.180	1967.991	1970.350	
8.25	1960.630	1.698	1958.932	1962.328	
8.75	1948.090	2.772	1945.318	1950.862	
9.25	*1946.724	*6.538	*1940.186	*1953.263	interpolado
9.75	1933.430	4.686	1928.744	1938.116	CRS
10.25	*1933.343	*6.699	*1926.643	*1940.042	interpolado
10.75	*1926.663	*6.760	*1919.904	*1933.423	
11.25	*1920.055	*6.802	*1913.253	*1926.857	
11.75	*1913.564	*6.830	*1906.734	*1920.394	CRS
12.25	1910.420	10.089	1900.331	1920.509	
12.75	*1901.125	*6.901	*1894.224	*1908.026	interpolado
13.25	*1895.271	*7.004	*1888.267	*1902.276	
13.75	*1889.724	*7.218	*1882.506	*1896.941	
14.25	*1884.530	*7.605	*1876.925	*1892.134	
14.75	1879.540	27.694	1851.846	1907.234	CRS
15.25 al 16.75	-	-	-	-	-
17.25	1817.78	193.782	1623.998	2011.562	CRS

*: Valores interpolados -: Secciones no datadas

En rojo: última fecha datada, descartada debido al error excesivo.

Tabla 17. Estadística descriptiva de la Tasa de Sedimentación.

Tasa de Sedimentación (g.cm ⁻² .año ⁻¹)			
n	19	Mínimo	0.0040
Media	0.0592	Máximo	0.1761
Mediana	0.0413	\bar{x} al 5%	0.0558
Desv. típ.	0.0512	Huber ^a	0.0468
Varianza	0.0026	Hampel ^b	0.0499

a. Estimador-M de Huber. La constante de ponderación es 1.339.

b. Estimador-M de Hampel. Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 18. Salidas de resultados asociados a los modelos de regresión de la variable Tasa de Sedimentación.

Resultados de las pruebas de normalidad de variable Tasa de Sedimentación para la *base de datos original y la transformada*.

	Variable	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Datos originales	Tasa de Sedimentación (g.cm ⁻² .año ⁻¹)	.873	19	.016
Datos transformados	ln (Tasa de Sedimentación)	.959	19	.556

Resultados de la prueba de correlación de Pearson entre la variable Tasa de Sedimentación transformada y el año al que corresponde.

	Año (modelo CRS)	ln (Tasa Sedimentación) ($\mu\text{g.g}^{-1}$)
Correlación de Pearson	1	*0.937
Sig. (bilateral)	-	.000
n	19	19

* La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Ecuación	Resumen del modelo				Estimaciones de los parámetros		
	R ²	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Lineal	.879	123.376	1	17	.000	-70.117	.034

La variable independiente es el Año, al que está asociado cada valor de la tasa de sedimentación.

Tabla 19. Presencia de taxa de diatomeas en cada sección analizada.

N°	Especie	Secciones de la Zona Datada (ZD)															Secciones de la Zona No Datada (ZND)											Σ1		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	*	16	17	18	19	20	25	30	35	40	43		**	
1	<i>Achnanthes exigua</i>	X				X											2	X					X	X					3	5
2	<i>Achnanthes minutissima</i>	X	X	X	X	X	X			X	X		X				9	X		X	X	X	X	X			X		7	16
3	<i>Achnanthes sp.</i>	X									X				X		3	X				X							2	5
4	<i>Amphora sp.</i>		X	X	X	X	X		X		X		X	X	X		11	X				X	X	X	X			5	16	
5	<i>Anemoeoneis sp.</i>						X			X	X		X	X			5	X	X	X	X		X		X	X	X	8	13	
6	<i>Aulacoseira granulata</i>	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10	24	
7	<i>Caloneis sp.</i>					X					X						2	X				X	X					3	5	
8	<i>Cyclostephanos dubius</i>	X			X	X	X	X	X	X	X	X			X		10	X	X	X	X	X	X	X	X		X	9	19	
9	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		14	X		X	X	X	X	X	X	X	X	9	23	
10	<i>Cyclotella stelligera</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10	25	
11	<i>Cymbella sp.</i>	X					X	X		X							4		X			X			X	X	X	5	9	
12	<i>Cymbella sp. N°1</i>										X			X	X		3	X	X	X	X							4	7	
13	<i>Cymbella sp. N°2</i>					X							X				2				X					X		2	4	
14	<i>Epithemia sp.</i>																				X							1	1	
15	<i>Eunotia sp.</i>																								X			1	1	
16	<i>Fragilaria acus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10	25	
17	<i>Fragilaria construens</i>																		X	X								2	2	
18	<i>Fragilaria pinnata</i>										X						1												1	
19	<i>Fragilaria sp.</i>				X				X						X		3				X				X			2	5	
20	<i>Fragilaria (Synedra) ulna</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		15		X	X	X	X	X	X	X	X	X	9	24	
21	<i>Gomphonema affine</i>									X		X	X	X			4	X		X					X	X		4	8	
22	<i>Gomphonema parvulum</i>				X				X			X					3						X					1	4	
23	<i>Luticola mutica</i>					X	X				X	X		X			5	X				X	X	X				4	9	
24	<i>Mastogloia sp</i>							X									1												1	
25	<i>Navicula confervacea</i>																				X							1	1	
26	<i>Navicula constans</i>																					X						1	1	
27	<i>Navicula cryptocephala</i>				X			X	X			X		X			5		X		X	X				X		4	9	
28	<i>Navicula halophila</i>							X						X	X		3	X			X							2	5	
29	<i>Navicula ovalis</i>									X					X		2												2	
30	<i>Navicula pupula</i>				X	X											2					X						1	3	
31	<i>Navicula sp.</i>									X							1			X				X		X		3	4	
32	<i>Navicula sp. N°1</i>																					X	X					2	2	
33	<i>Navicula sp. N°2</i>																							X				1	1	
34	<i>Navicula sp. N°3</i>													X			1												1	
35	<i>Nitzschia acicularis</i>																					X		X				2	2	
36	<i>Nitzschia amphibia</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10	25	
37	<i>Nitzschia amphioxys</i>																						X	X	X			3	4	
38	<i>Nitzschia claussi</i>																				X							1	1	
39	<i>Nitzschia palea</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10	25	
40	<i>Nitzschia sp.</i>									X	X	X					3					X				X		2	5	
41	<i>Nitzschia sp. N°1</i>																	X						X			2	3		
42	<i>Pinnularia sp.</i>																								X			1	1	
43	<i>Pinnularia sp. N°1</i>																						X					1	1	
44	<i>Pinnularia sp. N°2</i>																						X					1	1	
45	<i>Rhopalodia gibba</i>																						X					1	1	
46	<i>Stauroneis sp.</i>																	X										1	1	

Σ2 12 9 8 13 14 13 12 13 14 17 10 13 12 18 12 32

19 12 14 17 11 25 16 19 12 16 42

(Simbología en la siguiente hoja)

Simbología (Tabla 19)

* N° de secciones en la que está presente el taxón indicado en la ZD.

** N° de secciones en la que está presente el taxón indicado en la ZND.

$\Sigma 1$: N° de secciones en la que el taxón indicado está presente, pero en el Perfil Completo.

$\Sigma 2$: N° de taxa por sección.



Zona 1



Zona 2



Zona 3



Taxón/Especie ausente, según sea el caso: de la ZD o de la ZND

Tabla 20. Abundancia relativa de las especies de diatomeas, por zonas.

Especie	Abundancia Relativa (%)						Perfil Completo (PC)
	Zona 01: 2012-1940 (cm 0.0-9.5)	Zona 02: +1933 a ~1913 (cm 9.75-11.75)	Zona 03: 1911 a ~1879 (cm 12.25-14.75)	Zona datada completa: ~1879 a 2012 (cm 1-15)	Zona No Datada con ²¹⁰ Pb (cm 16-20, 25, 30, 35, 40 y 43)	ZD + ZND	
	ZD			ZND			
	tiempo equivalente en años de las secciones indicadas:						
	~72años	~20 a 30 años	~30 a 32años	~130años	No definido	-	
<i>Achnanthes exigua</i>	0.03	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	
<i>Achnanthes minutissima</i>	0.37	0.05	0.00	0.26	0.17	0.22	
<i>Achnanthes sp.</i>	0.03	0.00	0.10	0.04	0.03	0.04	
<i>Amphora sp.</i>	0.11	0.13	0.16	0.12	0.17	0.14	
<i>Anemoeoneis sp.</i>	0.04	0.00	0.23	0.07	0.14	0.10	
<i>Aulacoseira granulata</i>	3.53	33.53	3.85	7.59	20.93	12.93	
<i>Caloneis sp.</i>	0.02	0.00	0.00	0.01	0.06	0.03	
<i>Cyclostephanos dubius</i>	3.57	0.27	0.05	2.43	1.52	2.07	
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	2.11	0.14	3.12	2.05	0.51	1.43	
<i>Cyclotella stelligera</i>	63.39	11.42	1.87	44.16	17.53	33.50	
<i>Cymbella sp.</i>	0.10	0.00	0.00	0.07	0.10	0.08	
<i>Cymbella sp. N°1</i>	0.04	0.00	0.33	0.09	0.12	0.10	
<i>Cymbella sp. N°2</i>	0.01	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	
<i>Epithemia sp.</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	
<i>Eunotia sp.</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	
<i>Fragilaria acus</i>	12.49	18.90	35.25	17.90	23.23	20.03	
<i>Fragilaria construens</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	
<i>Fragilaria pinnata</i>	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	
<i>Fragilaria sp.</i>	0.04	0.00	0.10	0.05	0.02	0.04	
<i>Fragilaria ulna</i>	1.05	10.16	2.82	2.62	1.26	2.07	
<i>Gomphonema affine</i>	0.01	0.05	0.11	0.04	0.06	0.04	
<i>Gomphonema parvulum</i>	0.02	0.05	0.00	0.02	0.02	0.02	
<i>Luticula mutica</i>	0.02	0.09	0.05	0.04	0.63	0.27	
<i>Mastogloia sp</i>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	
<i>Navicula confervacea</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	
<i>Navicula constans</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	
<i>Navicula cryptocephala</i>	0.05	0.05	0.15	0.07	0.10	0.08	
<i>Navicula halophila</i>	0.01	0.00	0.14	0.04	0.03	0.03	
<i>Navicula ovalis</i>	0.02	0.00	0.05	0.02	0.00	0.01	
<i>Navicula pupula</i>	0.04	0.00	0.00	0.03	0.02	0.03	
<i>Navicula sp.</i>	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	
<i>Navicula sp. N°1</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	
<i>Navicula sp. N°2</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.04	
<i>Navicula sp. N°3</i>	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.01	
<i>Nitzschia acicularis</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	
<i>Nitzschia amphibia</i>	3.73	18.04	11.82	7.26	24.90	14.32	
<i>Nitzschia amphioxys</i>	0.00	0.00	0.09	0.02	0.20	0.09	

<i>Nitzschia clausii</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
<i>Nitzschia palea</i>	9.06	7.05	39.59	14.89	7.35	11.88
<i>Nitzschia sp.</i>	0.04	0.09	0.00	0.04	0.14	0.08
<i>Nitzschia sp. N°1</i>	0.00	0.00	0.05	0.01	0.21	0.09
<i>Pinnularia sp.</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
<i>Pinnularia sp. N°1</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
<i>Pinnularia sp. N°2</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02
<i>Rhopalodia gibba</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
<i>Stauroneis sp.</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
Suma*	100	100	100	100	100	100
n*	46	46	46	46	46	46
Media*	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17
Mediana	0.02	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03
D.E.	9.5259	6.4511	7.8439	7.3058	6.2302	6.3776
Varianza	90.74	41.62	61.53	53.37	38.82	40.67
Mínimo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Máximo	63.39	33.53	39.59	44.16	24.90	33.50
\bar{x} al 5%**	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17

*parámetros de control y comprobación; esto es: si la **suma** es 100%, **n** y la **media** son iguales para todas las zonas, entonces los cálculos son correctos.

** \bar{x} al 5%: media recortada al 5%

Cuadro vinculado a la Tabla 20. Abundancias relativas de las especies más representativas

Especie	Zona 1	Zona 2	Zona 3	ZD	ZND	PC
<i>Cyclotella stelligera</i>	63.39	11.42	1.87	44.16	17.53	33.50
<i>Fragilaria acus</i>	12.49	18.90	35.25	17.90	23.23	20.03
<i>Nitzschia amphibia</i>	3.73	18.04	11.82	7.26	24.90	14.32
<i>Aulacoseira granulata</i>	3.53	33.53	3.85	7.59	20.93	12.93
<i>Nitzschia palea</i>	9.06	7.05	39.59	14.89	7.35	11.88
<i>Fragilaria (Synedra) ulna</i>	1.05	10.16	2.82	2.62	1.26	2.07
<i>Cyclostephanos dubius</i>	3.57	0.27	0.05	2.43	1.52	2.07
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	2.11	0.14	3.12	2.05	0.51	1.43
$\Sigma >1\%$	98.92	99.09	98.33	98.89	96.72	98.2

En negrilla se indican las abundancias relativas más importantes (mayores).

Las celdas con valores resaltados en rojo corresponde a valores no representativos (<1%).

Tabla 21. N° de especies de diatomea por biotopo y por zona y, recambio de especies.

Biotopo	PC		ZND			ZD			Recambio		Pérdida Neta (ZD respecto a ZND)
	Tax	% PC	Tax	% ZND	%PC	Tax	% ZD	%PC	∃ en ZD, ∅ en ZND	∃ en ZND, ∅ en ZD	
B	28	60.87	26	61.90	56.52	18	56.25	39.13	↑ 2	↓ 10	↓ 8
B-P	13	28.26	11	26.19	23.91	9	28.13	19.57	↑ 2	↓ 4	↓ 2
P	5	10.87	5	11.90	10.87	5	15.63	10.87	= 0	= 0	= 0
Total	46	100.00	42	100.00	91.30	32	100.00	69.57	↑ 4	↓ 14	↓ 10

PC: Perfil Completo; ZND: Zona No Datada; ZD: Zona Datada; Tax: N° taxa presentes en cada biotopo; %PC: % respecto al total del PC; %ZND: % respecto al total de la ZND; %ZD: % respecto al total de la ZD; ∃: presente; ∅: ausente

Tabla 22. Parámetros de biodiversidad: Riqueza, N° de valvas, Dominancia, Índices de Simpson y de Shannon, Uniformidad, Equidad, por cada zona, indicando el estado para cada sección datada.

Zona	Año	Riqueza (S)	Valvas (#)	Dominancia (D)	Simpson (1/D)	Simpson (1-D)	Shannon (H)	Estatus	Uniformidad [(e^H)/S]	Equidad (J)
1	2011.83	12	1661	0.177	5.651	0.823	1.887	Alta diversidad	0.550	0.759
	2010.51	9	743	0.543	1.841	0.457	0.998	Baja diversidad	0.302	0.454
	2008.89	8	703	0.711	1.407	0.289	0.684	Baja diversidad	0.248	0.329
	2005.43	13	1022	0.558	1.793	0.442	1.036	Diversidad baja a media	0.217	0.404
	2000.44	14	822	0.539	1.856	0.461	1.042	Diversidad baja a media	0.203	0.395
	1991.58	13	781	0.487	2.055	0.513	1.021	Diversidad media	0.214	0.398
	1983.80	12	846	0.498	2.007	0.502	0.996	Diversidad baja a media	0.226	0.401
	1971.87	13	674	0.572	1.749	0.428	0.960	Baja diversidad	0.201	0.374
	1954.36	14	899	0.439	2.277	0.561	1.278	Diversidad media	0.257	0.484
	1940.08	17	1185	0.260	3.843	0.740	1.585	Media a alta diversidad	0.287	0.559
2	1930.00	10	1120	0.236	4.239	0.764	1.593	Alta diversidad	0.492	0.692
	1916.81	13	1081	0.303	3.302	0.697	1.502	Media a alta diversidad	0.345	0.586
3	1905.77	12	1095	0.292	3.430	0.708	1.578	Media a alta diversidad	0.404	0.635
	1892.50	18	675	0.494	2.025	0.506	1.053	Diversidad media	0.159	0.364
	1882.03	12	716	0.584	1.713	0.416	0.932	Baja diversidad	0.212	0.375
no datada	cm16	19	927	0.309	3.239	0.691	1.480	Diversidad media	0.231	0.503
	cm17	12	948	0.342	2.928	0.659	1.406	Diversidad media	0.340	0.566
	cm18	14	656	0.562	1.779	0.438	1.004	Diversidad baja a media	0.195	0.381
	cm19	17	1227	0.228	4.396	0.772	1.740	Alta diversidad	0.335	0.614
	cm20	11	1356	0.240	4.163	0.760	1.606	Alta diversidad	0.453	0.670
	cm25	25	1248	0.228	4.387	0.772	1.828	Alta diversidad	0.249	0.568
	cm30	16	1061	0.237	4.224	0.763	1.706	Alta diversidad	0.344	0.615
	cm35	19	1081	0.227	4.413	0.773	1.842	Alta diversidad	0.332	0.626
	cm40	12	922	0.552	1.813	0.448	0.965	Baja diversidad	0.219	0.388
	cm43	16	1272	0.233	4.298	0.767	1.646	Alta diversidad	0.324	0.594

Nota: Cálculos realizados en PAST 3.0

Tabla 23. Estadística descriptiva de los parámetros de biodiversidad de la ZD completa (zonas 1-3 juntas) y la ZND en función de la zonificación realizada en base a las 8sp representativas.

Estadístico	Riqueza (S)		Individuos (Valvas)		Dominancia (D)		Simpson (1-D)		Shannon (H)		Uniformidad [(e^H)/S]		Equitatividad (J)	
	ZD	ZND	ZD	ZND	ZD	ZND	ZD	ZND	ZD	ZND	ZD	ZND	ZD	ZND
N	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10
Media	12.67	16.10	934.87	1069.80	0.45	0.32	0.55	0.68	1.21	1.52	0.29	0.30	0.48	0.55
Mediana	13.00	16.00	846.00	1071.00	0.49	0.24	0.51	0.76	1.04	1.63	0.25	0.33	0.40	0.58
Desv. típ.	2.61	4.23	267.04	212.86	0.16	0.13	0.16	0.13	0.34	0.32	0.11	0.08	0.13	0.10
Varianza	6.81	17.88	71311.27	45307.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.11	0.10	0.01	0.01	0.02	0.01
Mínimo	8	11	674	656	0.18	0.23	0.29	0.44	0.684	0.965	0.16	0.20	0.329	0.38
Máximo	18	25	1661	1356	0.71	0.56	0.82	0.77	1.887	1.84	0.55	0.45	0.759	0.67
Rango	10	14	987	700	0.53	0.34	0.53	0.34	1.203	0.88	0.39	0.26	0.430	0.29
\bar{x} al 5%	12.63	15.89	909.02	1076.89	0.45	0.31	0.55	0.69	1.20	1.54	0.28	0.30	0.47	0.56
Huber ^a	12.67	15.63	894.93	1085.49	0.48	0.24	0.52	0.76	1.10	1.60	0.25	0.30	0.44	0.58
Hampel ^b	12.58	15.68	899.47	1085.36	0.47	0.23	0.53	0.77	1.08	1.58	0.25	0.30	0.43	0.58

Estimadores centrales: \bar{x} al 5%: media recortada al 5%. Huber^a: estimador-M de Huber. a: la constante de ponderación es 1.339. Hampel^b: estimad-M de Hampel. b: las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

Tabla 24. Resultados del ANOVA de un factor para los parámetros de biodiversidad entre zonas obtenidas en base a las 8 especies representativas.

Normalidad		Shapiro-Wilk					Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.			Estadístico	gl	Sig.
Riqueza (S)	Zona1 _{8sp}	0.926	10	0.409	Shannon (H)	Zona1 _{8sp}	0.849	10	0.057
	Zona2 _{8sp}	-	-	-		Zona2 _{8sp}	-	-	-
	Zona3 _{8sp}	0.750	3	0.000		Zona3 _{8sp}	0.885	3	0.338
	ZND	0.926	10	0.406		ZND	0.857	10	0.070
Individuos (Valvas)	Zona1 _{8sp}	0.799	10	0.014	Uniformidad [(e^H)/S]	Zona1 _{8sp}	0.663	10	0.000
	Zona2 _{8sp}	-	-	-		Zona2 _{8sp}	-	-	-
	Zona3 _{8sp}	0.822	3	0.169		Zona3 _{8sp}	0.903	3	0.395
	ZND	0.945	10	0.605		ZND	0.913	10	0.301
Dominancia (D)	Zona1 _{8sp}	0.902	10	0.231	Equitatividad (J)	Zona1 _{8sp}	0.802	10	0.015
	Zona2 _{8sp}	-	-	-		Zona2 _{8sp}	-	-	-
	Zona3 _{8sp}	0.953	3	0.584		Zona3 _{8sp}	0.780	3	0.068
	ZND	0.695	10	0.001		ZND	0.860	10	0.076
Simpson (1-D)	Zona1 _{8sp}	0.902	10	0.231					
	Zona2 _{8sp}	-	-	-					
	Zona3 _{8sp}	0.953	3	0.582					
	ZND	0.695	10	0.001					

Para todas las variables, tanto H₀ como H_a se plantean de la misma forma. Ej., para Riqueza:

H₀: La variable Riqueza sigue una distribución que tiende a la Normal.

H_a: La variable Riqueza sigue una distribución diferente a la Normal.

Homogeneidad de varianzas	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Riqueza (S)	0.805	3	21	0.505
Individuos (Valvas)	0.916	3	21	0.450
Dominancia (D)	0.470	3	21	0.707
Simpson (1-D)	0.470	3	21	0.707
Shannon (H)	0.785	3	21	0.516
Uniformidad [(e^H)/S]	0.272	3	21	0.845
Equitatividad (J)	0.430	3	21	0.734

Para todas las variables (parámetros), tanto H_0 como H_a se plantean de la misma forma. Ej., *riqueza*:

$$H_0: \sigma_{Rz1_8sp}^2 = \sigma_{Rz2_8sp}^2 = \sigma_{Rz3_8sp}^2 = \sigma_{R_ZND}^2$$

$$H_a: \sigma_{Rz1_8sp}^2 \neq \sigma_{Rz2_8sp}^2 \neq \sigma_{Rz3_8sp}^2 \neq \sigma_{R_ZND}^2 \text{ || esto es: en al menos en una de las zonas, la } \sigma^2 \text{ de la } \textit{riqueza} \text{ es diferente respecto a las otras zonas.}$$

Donde, σ^2 : varianza; R: *riqueza*; z1_8sp: zona1_{8sp}; z2_8sp: zona2_{8sp}; z3_8sp: zona3_{8sp}; ZND: zona no datada.

ANOVA de un factor		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Riqueza (S)	Inter-grupos	79.060	3	26.353	2.232	0.114
	Intra-grupos	247.900	21	11.805		
	Total	326.960	24			
Individuos (Valvas)	Inter-grupos	197962.193	3	65987.398	1.052	0.390
	Intra-grupos	1317405.167	21	62733.579		
	Total	1515367.360	24			
Dominancia (D)	Inter-grupos	0.175	3	0.058	2.893	0.059
	Intra-grupos	0.424	21	0.020		
	Total	0.599	24			
Simpson (1-D)	Inter-grupos	0.175	3	0.058	2.893	0.059
	Intra-grupos	0.424	21	0.020		
	Total	0.600	24			
Shannon (H)	Inter-grupos	0.853	3	0.284	2.686	0.073
	Intra-grupos	2.224	21	0.106		
	Total	3.077	24			
Uniformidad [(e^H)/S]	Inter-grupos	0.041	3	0.014	1.463	0.253
	Intra-grupos	0.196	21	0.009		
	Total	0.237	24			
Equitatividad (J)	Inter-grupos	0.089	3	0.030	2.227	0.115
	Intra-grupos	0.280	21	0.013		
	Total	0.368	24			

Para todas las variables (parámetros), tanto H_0 como H_a se plantean de la misma forma. Por ejemplo, para la variable (parámetro) *riqueza*:

$$H_0: \mu_{Rz1_8sp} = \mu_{Rz2_8sp} = \mu_{Rz3_8sp} = \mu_{R_ZND}$$

$$H_a: \mu_{Rz1_8sp} \neq \mu_{Rz2_8sp} \neq \mu_{Rz3_8sp} \neq \mu_{R_ZND} \text{ || esto es: en al menos en una de las zonas, la } \mu \text{ de la } \textit{riqueza} \text{ es diferente respecto a las otras zonas.}$$

Donde, μ : media; R: *riqueza*; z1_8sp: zona1_{8sp}; z2_8sp: zona2_{8sp}; z3_8sp: zona3_{8sp}; ZND: zona no datada.

Tabla 25. Resultados del ANOVA de un factor para parámetros de biodiversidad entre zonas obtenidas a partir de 32 especies identificadas en la zona datada.

Normalidad		Shapiro-Wilk					Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.			Estadístico	gl	Sig.
Riqueza (S)	Zona1 _{32sp}	0.835	8	0.066	Shannon (H)	Zona1 _{32sp}	0.689	8	0.002
	Zona2 _{32sp}	0.931	7	0.556		Zona2 _{32sp}	0.829	7	0.079
	ZND	0.926	10	0.406		ZND	0.857	10	0.070
Individuos (Valvas)	Zona1 _{32sp}	0.706	8	0.003	Uniformidad [(e^H)/S]	Zona1 _{32sp}	0.639	8	0.000
	Zona2 _{32sp}	0.865	7	0.166		Zona2 _{32sp}	0.980	7	0.960
	ZND	0.945	10	0.605		ZND	0.913	10	0.301
Dominancia (D)	Zona1 _{32sp}	0.813	8	0.039	Equitatividad (J)	Zona1 _{32sp}	0.659	8	0.001
	Zona2 _{32sp}	0.893	7	0.293		Zona2 _{32sp}	0.933	7	0.576
	ZND	0.695	10	0.001		ZND	0.860	10	0.076
Simpson (1-D)	Zona1 _{32sp}	0.813	8	0.039					
	Zona2 _{32sp}	0.893	7	0.290					
	ZND	0.695	10	0.001					

Para todas las variables, tanto H₀ como H_a se plantean de la misma forma. Por ejemplo, para la variable (parámetro) *Riqueza*:

H₀: La variable *Riqueza* sigue una distribución que tiende a la Normal.

H_a: La variable *Riqueza* sigue una distribución diferente a la Normal.

Homogeneidad de varianzas	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Riqueza (S)	1.268	2	22	0.301
Individuos (Valvas)	0.262	2	22	0.772
Dominancia (D)	0.118	2	22	0.889
Simpson (1-D)	0.119	2	22	0.888
Shannon_H	0.114	2	22	0.893
Uniformidad [(e^H)/S]	0.416	2	22	0.665
Equitatividad (J)	0.266	2	22	0.769

Para todas las variables (parámetros), tanto H₀ como H_a se plantean de la misma forma. Por ejemplo, para la variable (parámetro) *riqueza*:

$$H_0: \sigma_{Rz1_32sp}^2 = \sigma_{Rz2_32sp}^2 = \sigma_{Rz3_32sp}^2 = \sigma_{R_ZND}^2$$

H_a: $\sigma_{Rz1_32sp}^2 \neq \sigma_{Rz2_32sp}^2 \neq \sigma_{Rz3_32sp}^2 \neq \sigma_{R_ZND}^2$ || esto es: en al menos en una de las zonas, la σ^2 de la *riqueza* es diferente respecto a las otras zonas.

Donde, σ^2 : varianza; R: *riqueza*; z1_{32sp}: zona1_{32sp}; z2_{32sp}: zona2_{32sp}; z3_{32sp}: zona3_{32sp}; ZND: zona no datada.

ANOVA de un factor		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Riqueza (S)	Inter-grupos	85.131	2	42.566	3.872	0.036
	Intra-grupos	241.829	22	10.992		
	Total	326.960	24			
Individuos (Valvas)	Inter-grupos	123036.331	2	61518.166	0.972	0.394
	Intra-grupos	1392331.029	22	63287.774		
	Total	1515367.360	24			
Dominancia (D)	Inter-grupos	0.173	2	0.087	4.474	0.023
	Intra-grupos	0.426	22	0.019		
	Total	0.599	24			
Simpson (1-D)	Inter-grupos	0.174	2	0.087	4.480	0.023
	Intra-grupos	0.426	22	0.019		
	Total	0.600	24			
Shannon (H)	Inter-grupos	0.884	2	0.442	4.431	0.024
	Intra-grupos	2.193	22	0.100		
	Total	3.077	24			
Uniformidad [(e^H)/S]	Inter-grupos	0.007	2	0.003	0.315	0.733
	Intra-grupos	0.231	22	0.010		
	Total	0.237	24			
Equitatividad (J)	Inter-grupos	0.060	2	0.030	2.154	0.140
	Intra-grupos	0.308	22	0.014		
	Total	0.368	24			

Pruebas *post hoc*, de comparaciones por pares *b* de Tukey B^{a,b}

Tabla i: Con diferencias significativas		N	Subconjuntos para alfa = 0.05	
			1	2
Riqueza_S	Zona 1 _{32sp}	8	11.750	
	Zona 2 _{32sp}	7	13.714	13.714
	ZND	10		16.100
Dominancia (D)	Zona 1 _{32sp}	10	0.316	
	Zona 2 _{32sp}	7	0.373	0.373
	ZND	8		0.511
Simpson (1-D)	Zona 1 _{32sp}	8	0.489	
	Zona 2 _{32sp}	7	0.628	0.628
	ZND	10		0.684
Shannon (H)	Zona 1 _{32sp}	8	1.078	
	Zona 2 _{32sp}	7	1.360	1.360
	ZND	10		1.522

Tabla ii: Sin diferencias significativas		N	Subconjunto para alfa = 0.05	
			1	
Individuos (Valvas)	Zona 1 _{32sp}	8	906.500	
	Zona 2 _{32sp}	7	967.286	
	ZND	10	1069.800	
Uniformidad [(e^H)/S]	Zona 1 _{32sp}	8	0.270	
	Zona 2 _{32sp}	10	0.302	
	ZND	7	0.308	
Equitatividad (J)	Zona 1 _{32sp}	8	0.439	
	Zona 2 _{32sp}	7	0.528	
	ZND	10	0.553	

Comentarios válidos para las tablas i y ii:

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 8.155.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 26. Estadísticos descriptivos de la variable clorofila a en sedimentos.

	Clorofila a	
	(mg.g ⁻¹ peso seco)	
	PC	ZD
n	84	30
Media	0.02385	0.04788
DE	0.02387	0.02163
Varianza	0.00057	0.00047
Rango	0.08730	0.08240
Mínimo	0.00050	0.00540
Máximo	0.08780	0.08780

Tabla 27. Resumen de los modelos de regresión lineal y estimaciones de los parámetros de la clorofila *a* (mg.g⁻¹ peso seco) en sedimentos**PC**

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R ²	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Logarítmica	0.751	246.718	1	82	.000	.082	-.021		
Cuadrático	0.791	153.594	2	81	.000	.072	-.004	4.488E-05	
Cúbico	0.796	104.123	3	80	.000	.076	-.005	.000	-1.172E-06

La variable independiente es la Profundidad del punto medio (cm), la que está asociada a una fecha.

ZD

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros			
	R ²	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Cúbico	0.709	21.090	3	26	0.000	0.083	-0.012	0.002	-9.020E-05

La variable independiente es la Profundidad del punto medio (cm), la que está asociada a una fecha.

Tabla 28. Concentración de Al, Cd, Cr y Pb en sedimentos obtenidos de un core del Lago Masaya.

	Al			Cd			Cr			Pb		
	(μg.g ⁻¹)											
	ZD:cm	cm	cm	ZD:cm	cm	cm	ZD: cm	cm	cm	ZD:cm	cm	cm
	1-15	16-20	1-20	1-15	16-20	1-20	1-15	16-19	1-19	1-15	16-20	1-20
N	15	5	20	15	5	20	15	4	*19	15	5	20
Media	18897.15	13089.82	17445.32	4.309	5.570	4.625	5.517	5.300	5.471	43.879	43.998	43.909
Mediana	17468.32	13530.03	16681.25	4.450	5.320	4.665	5.180	3.950	4.990	46.420	41.960	45.645
Desv. típ.	6333.94	3161.25	6190.42	0.682	0.509	0.843	2.059	3.923	2.423	5.263	3.582	4.808
Varianza	40118754.41	9993531.61	38321344.29	0.466	0.259	0.711	4.241	15.393	5.872	27.697	12.831	23.112
Mínimo	9783.14	9526.10	9526.10	2.310	5.130	2.310	2.940	2.310	2.310	33.730	40.990	33.730
Máximo	31924.46	17738.22	31924.46	5.170	6.400	6.400	10.730	10.990	10.990	49.250	49.020	49.250
\bar{x} al 5%	18679.74	13029.56	17080.88	4.373	5.548	4.654	5.370	5.150	5.340	44.144	43.886	44.177
Huber ^a	18402.02	12826.68	16534.86	4.456	5.417	4.665	5.087	3.950	4.935	45.684	42.332	44.918
Hampel ^b	18589.26	13068.06	16665.63	4.480	5.412	4.678	5.008	3.741	4.865	45.908	42.006	44.794
Representa ^c	\bar{x}	N/A	Me	Me	N/A	Me	Me	N/A	Me	Me	N/A	\bar{x} o Me

a. Estimador-M de Huber. La constante de ponderación es 1.339.

b. Estimador-M de Hampel. Las constantes de ponderación son 1.700, 3.400 y 8.500.

c. Medida de tendencia central que mejor representa a la distribución de datos de cada variable.

* En el cm20 la concentración de Cr fue menor que el límite de detección, por ello la siguiente zona abarca hasta el cm19.

\bar{x} : media; Me: Mediana; N/A: No Aplica

Tabla 29. Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de la distribución de Al, Cd, Cr y Pb (concentración) en sedimento.

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Al	0.938	20	0.217
Cd	0.946	20	0.309
Cr	0.878	19	0.020
Pb	0.871	20	0.012

Nota: Al, Cd y Pb detectados en todas las secciones. Cr no detectado únicamente en el centímetro 20.

Tabla 30. Resultados de la prueba de correlación de Pearson entre la concentración de metales pesados (Al y Cd) y la profundidad en la fueron detectados.

		Profundidad (cm)	Al ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Cd ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
Profundidad (cm)	Correlación de Pearson	1	** -0.623	** 0.804
	Sig. (bilateral)	-	0.003	0.000
	n	20	20	20

** La correlación es altamente significativa al nivel 0.01 (bilateral).

Tabla 31. Resultados de la prueba de correlación Tau b de Kendall entre la concentración de metales pesados (Al y Cd) y la tasa de sedimentación.

		Ln Tasa de Sedimentación ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{año}$)	Ln [Al] ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Cd ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
Ln Tasa de Sedimentación (cm)	Coefficiente de correlación	1	* 0.491	* -0.564
	Sig. (bilateral)	-	0.036	0.016
	N	11	11	11

* La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral).

Tabla 32. Rangos y óptimos de referencia de algunas variables ambientales autoecológicas (Biotopo, pH, Salinidad y Saprobiidad), de las diatomeas identificadas.

N°	Especie [este estudio]	Taxa Report.	Biotopo (1), (2), (3), (4), (5), (6)	pH			Salinidad (g.l ⁻¹)			Saprobiidad
				Rango pH (7)	pH óptim (7) (8)	Categ. pH (1) (2) (5) (8)	Sal óptim (9)	Rango Sal (9)	Categ. Salin. (2)	
1	<i>Achnanthes exigua</i>	Ídem.	B	6.0-9.6	8.0-9.2	Alcalib.	0.11	0.05-0.26	-	-
2	<i>Achnanthes minutissima</i>	Ídem.	B	5.5-10.9	7.5-8.0	Indif.	0.38	0.01-12.39	-	-
3	<i>Achnanthes sp.</i>	Ídem.	B	-	-	Basóf., Indif.	-	-	Indif., Mesoh.	χ-o, χ-β, o, o-β, β, o-α
4	<i>Amphora sp.</i>	Ídem.	B	-	-	Basóf., Alcalib.	-	-	Indif., Halofób.	o-β, β-α, β-o
5	<i>Anemoeoneis sp.</i>	Ídem.	P-B, epip	-	-	Alcalib.	-	-	Halóf.	χ-β
6	<i>Aulacoseira granulata</i>	Ídem.	P	5.5-10.9	7.5-8.0	Basóf.	0.11	0.09-0.13	Indif.	β
7	<i>Caloneis sp.</i>	Ídem.	B, B-P	-	-	Basóf., Alcalib.	-	-	Indif.	o
8	<i>Cyclostephanos dubius</i>	Ídem.	P	-	-	-	-	-	-	-
9	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	Ídem.	P, B-P	-	-	Basóf.	1.37	0.06-30.02	Halóf.	α-β
10	<i>Cyclotella stelligera</i>	*	P	6.7-10.5	6.5-8.3	Indif., Neutróf.	0.03	0-1.1	-	-
11	<i>Cymbella sp.</i>	Ídem.	B: E o Per	-	-	Basóf., Indif.	-	-	Indif., Halofób.	o, o-β, β
12	<i>Cymbella sp. N°1</i>	-	B: E o Per	-	-	-	-	-	-	-
13	<i>Cymbella sp. N°2</i>	-	B: E o Per	-	-	-	-	-	-	-
14	<i>Epithemia sp.</i>	Ídem.	B	-	-	Alcalib., Basóf.	-	-	Indif.	β, β-α, o-α
15	<i>Eunotia sp.</i>	Ídem.	B:epilt/epip; E	-	-	Acidóf.	-	-	Halofób., Indif.	χ, χ-o, o, β, p
16	<i>Fragilaria acus</i>	**	P	-	-	-	0.34	0.04-3.1	-	-
17	<i>Fragilaria construens</i>	Ídem. ²⁷	P	5.5-10.9	8	Indif.	0.08	0.03-0.22	-	-
18	<i>Fragilaria pinnata</i>	Ídem.	P-B	5.5-10.9	8	Indif., Alcalib.	0.1	0.01-0.66	-	-
19	<i>Fragilaria sp.</i>	Ídem.	B: E o Epip; B-P	-	-	Acidóf.	-	-	Indif.	o-β, o, β, β-α
20	<i>Fragilaria ulna</i>	***	P, B	5.5-10.1	7.8-8.0	Basóf.	0.42	0.04-4.31	Indif.	β-α
21	<i>Gomphonema affine</i>	-	B: Per	-	-	-	-	-	-	-
22	<i>Gomphonema parvulum</i>	Ídem.	B: Per	-	8.29	Acalib., Basóf.	0.29	0.02-3.33	-	-
23	<i>Luticola mutica</i>	-	B	-	-	Indif.	-	-	Indif.	o-β
24	<i>Mastogloia sp.</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
25	<i>Navicula confervacea</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
26	<i>Navicula constans</i>	Ídem.	B	-	-	-	0.09	0.03-0.3	-	-
27	<i>Navicula cryptocephala</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
28	<i>Navicula halophila</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
29	<i>Navicula ovalis</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
30	<i>Navicula pupula</i>	Ídem.	B	5.5-9.6	8.0-9.2	Indif., Alcalib.	0.38	0.06-2.43	-	-
31	<i>Navicula sp.</i>	Ídem.	B:epip., P, B-P	-	-	Acidóf.	-	-	Halóf. a Mesoh., Indif.	χ-o, χ-β, o-β, β, β-α
32	<i>Navicula sp. N°1</i>	-	B, P	-	-	-	-	-	-	-
33	<i>Navicula sp. N°2</i>	-	B, P	-	-	-	-	-	-	-
34	<i>Navicula sp. N°3</i>	-	B, P	-	-	-	-	-	-	-
35	<i>Nitzschia acicularis</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
36	<i>Nitzschia amphibia</i>	Ídem.	B, B-P	-	8.15	Basóf.	0.58	0.04-8.59	Indif.	o
37	<i>Nitzschia amphioxys</i>	agg.	B	5.5-10.35	8.3	Indif., Alcalib.	-	-	-	-
38	<i>Nitzschia claussi</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
39	<i>Nitzschia palea</i>	Ídem.	B	5.5-10.1	6.9-7.95	Indif., Neutróf.	0.6	0.11-3.46	-	-
40	<i>Nitzschia sp.</i>	-	B, B-P, P	-	-	Basóf., Alcalib.	-	-	Halóf. a Mesoh., Indif.	o, o-β, α-β, α
41	<i>Nitzschia sp. N°1</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
42	<i>Pinnularia sp.</i>	Ídem.	B: epip	-	-	Acidóf.	-	-	Indif.	o-χ, χ, o, β, β-α
43	<i>Pinnularia sp. N°1</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
44	<i>Pinnularia sp. N°2</i>	-	B	-	-	-	-	-	-	-
45	<i>Rhopalodia gibba</i>	Ídem.	B, B-P	6.0-10.0	7-8.6	Alcalib.	0.87	0.18-4.14	Halóf. a Mesoh., Indif.	χ-o, o
46	<i>Stauroneis sp.</i>	-	B: epip	-	-	Acidob., Acidóf.	-	-	-	-

Referencias citadas: (1) Stevenson et al. (1996); (2) Nikulina & Kociolek (2011); (3) Seckbach & Kociolek (2011); (4) Spaulding et al. (2010); (5) Dokulil (2003); (6) Kasim & Mukai (2006); (7) Juggins et al (2012); (8) Smol & Reavie (2001); (9) Wilson et al. (1996).

Taxa Report.: Se refiere a las taxa indicadas en las referencias citadas. //*: incluye *C. pseudostelligera*. //**: incluye *cf. F. ulna var. acus*; *cf.*: confer -en latín- se usa en paleontología cuando no se confirmó la identificación. Comparado con... //***: Fallu, Allaire & Pienitz (2002) la reportan como "complejo *Fragilaria ulna*". //agg.: *N. amphioxys agg.* Categoría que se refiere a un agregado de especies, grupo en que ha sido difícil distinguir la especie que se sospecha. //27: Wilson, Cumming & Smol (1996) lo reportan como *Fragilaria construens f. binodis* y *Fragilaria construens f. venter*. //f. forma. Mínimo rango de principio reconocido en la jerarquía taxonómica, subordinado a especies, subespecies, variedades y otras.

Biotopo/Sustrato, categorías: P: planctónica, B: bentónica, B-P: bentoplanctónica, E: epífita, Per: perífita.

Categorías en función de la salinidad: Halóf.: halófilo; Indif.: indiferente; Mesoh.: Mesohalobio; Halofób.: Halofóbico.

Categorías en función de la saprobiidad: χ, χ-o, o-χ: Xenosaprobio; χ-β, o, o-β: Oligosaprobio; β-o, o-α, β, β-α: Beta-mesosaprobio; α-β, β-p, α, α-p: Alfa-mesosaprobio; α-p, p: Polisaprobio.