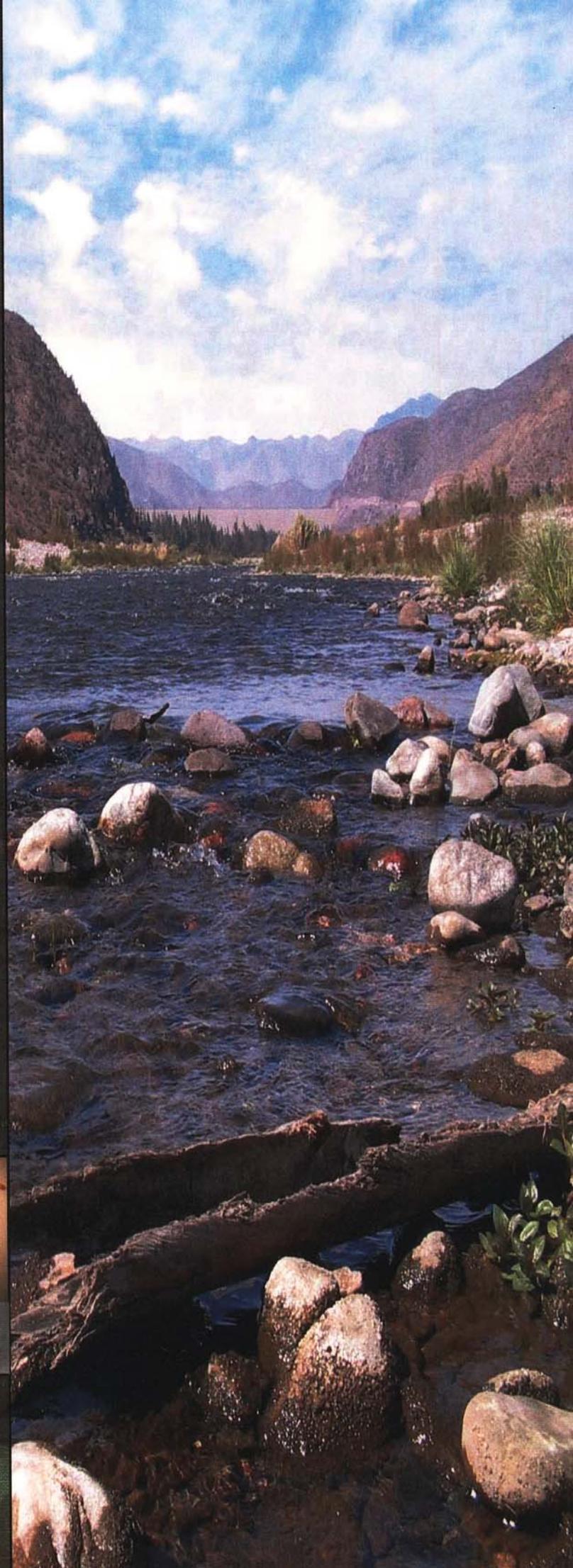


MANUAL DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

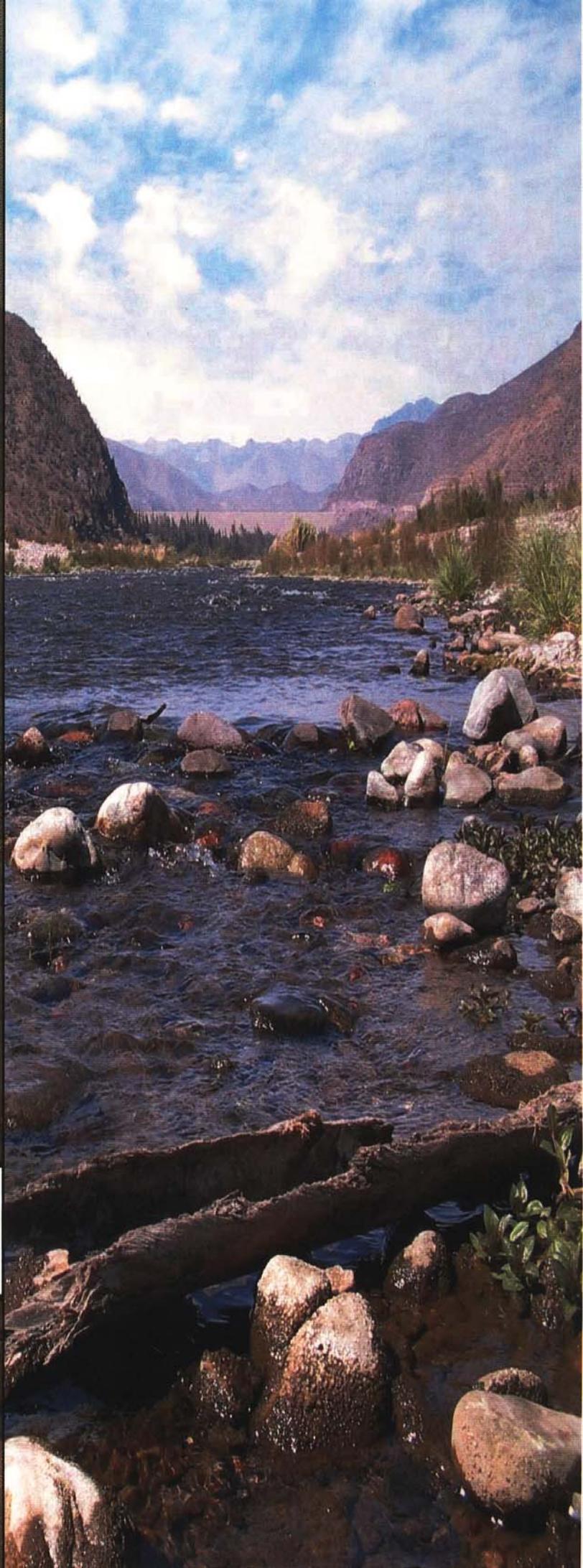


Editores
Ximena Molina Paredes
Irma Vila Pinto



El presente manual esta dirigido a todas las personas interesadas en resguardar uno de nuestros principales recursos naturales. Documento de consulta rápida, con conceptos básicos que permite trabajar en cursos de aguas superficiales.

Se genera en base al esfuerzo realizado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) y La Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile en el marco del proyecto "Desarrollo de un modelo para el uso de bioindicadores y Bioensayos como medida de la condición biológica de un cuerpo de agua", llevado a cabo en conjunto con La junta de vigilancia río Cachapoal primera sección, y la Asociación de Canalistas San Pedro, población y derivados. Este proyecto fue financiado por el FONSAG, enmarcado en el gran esfuerzo realizado por el Estado de Chile a través de la CONAMA, para impulsar la realización de Normas Secundarias de calidad ambiental para la protección de las agua continentales superficiales a lo largo de todo Chile



Manual de Evaluación de la Calidad del Agua



Manual de Evaluación de Calidad del Agua

Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA)

Avenida Larraín N° 9975 – Santiago –Chile

Fono: (56-2) 2994152 – Fax: (56-2) 2751688

<http://www.cenma.cl>

Laboratorio Limnología, Facultad de Ciencias

Universidad de Chile

Las Palmeras N° 3425 – Santiago – Chile

Fono: (56-2) 9787320 - Fax: (56-2) 2727363

<http://www.ciencias.uchile.cl/limnología>

Fondo de Mejoramiento del Patrimonio Sanitario,
Servicio Agrícola Ganadero (SAG), Ministerio de Agricultura.

Gobierno de Chile.

Avda. Bulnes N° 140, 8° piso – Santiago – Chile.

Fono: (56-2) 672 55 50 - Fax: (56-2) 699 53 11

<http://www.sag.gob.cl>

Fotografía Portada

Proyecto SAG N° C3-73-14-42

Río Elqui M. Ximena Molina P.

Diseño Portada

Maribel López

INDICE de CONTENIDOS

Prefacio

IRMA VILA PINTO. Lab. Limnología, Fac. Ciencias, Universidad de Chile V

Presentación

M. XIMENA MOLINA PAREDES.
Lab. Bioensayos y Microbiología, CENMA;
Fac. Ciencias, Universidad de Chile VII

| | |
|---|----|
| I.- Calidad de las aguas | 1 |
| II.- Hidrología | 5 |
| III.- Variables química y biológicas | 15 |
| IV.- Evaluación de la calidad del agua para la protección de los ecosistemas | |
| 1. Método de muestreo de macroinvertebrados bentónicos | 19 |
| 2. Monitoreo de la calidad de agua y aseguramiento de la Calidad en Laboratorios de ensayo químicos medio ambientales | 23 |
| 3. Bioindicadores | 29 |
| 4. Muestreo y análisis estadístico | 41 |
| 5. Tecnologías Computacionales Inteligentes. Herramientas para el Análisis de problemas ambientales | 49 |
| 6. Bioensayos | 57 |

ANEXOS

| | |
|---|----|
| 1.- Guía de Identificación de Macroinvertebrados Bentónicos de la Zona Central de Chile | 67 |
| 2.- Uso de Índice Biótico para determinación de la calidad de agua | 77 |
| 3.- Glosario | 83 |
| 4.- Tabla de metodologías para la detección de compuestos químicos | 89 |

Prohibida la reproducción total o parcial, de cualquier forma, sin autorización del poseedor de los derechos de autor y propiedad intelectual, salvo con fines educativos gratuitos, siempre y cuando se indique la fuente. Esta publicación no se puede utilizar para la reventa ni para ningún otro fin comercial salvo autorización del poseedor de los derechos de autor y dueño de la propiedad intelectual. El Servicio Agrícola Ganadero (SAG), Ministerio de Agricultura, solicita se le proporcione un ejemplar de las publicaciones educativas que utilicen como fuente esta publicación.

Las opiniones expresadas en esta publicación pertenecen a los autores y no representan necesariamente las del Fondo de Mejoramiento del Patrimonio Sanitario del Servicio Agrícola Ganadero (SAG).

Se terminó de imprimir esta Primera Edición de 100 ejemplares en el mes de Mayo del año
2006 en Santiago de Chile.

Impreso en Chile/Printed in Chile

Proyecto financiado por el Fondo de Mejoramiento del Patrimonio Sanitario del Servicio Agrícola y Ganadero – Ministerio de Agricultura – Gobierno de Chile, el Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, y la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.
Abril 2006

La propiedad intelectual de los resultados del proyecto pertenece al SAG. Asimismo, el Servicio Agrícola y Ganadero y el CENMA, podrán utilizar los informes, procedimientos, resultados del proyecto o experiencia de campo en la forma que estimen conveniente, señalando en todas ellas la fuente y la asistencia del SAG y del CENMA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Fondo de Mejoramiento del Patrimonio Sanitario del Servicio Agrícola Ganadero (SAG), por haber hecho posible la elaboración de éste Manual de Evaluación de la Calidad de Agua, como parte del proyecto “**Desarrollo de un modelo para el uso de bioindicadores y bioensayos como medida de la condición biológica de un cuerpo de agua**” (código C3-73-14-42). Estos agradecimientos se hacen extensivos al Director Nacional del SAG Sr. Francisco Bahamonde Medina, al Secretario General Sr. Fernando Peña Royo, así como a la Secretaria Ejecutiva del Fondo Sra. Ana María Roca Jimeno y el equipo de Supervisión del SAG, en especial al Supervisor Técnico Sr. Pedro Enríquez Alfaro.

Nuestros agradecimientos a Don Eugenio Figueroa, Director Ejecutivo de CENMA a Don Raúl Morales Segura, Decano de la Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, por haber facilitado la ejecución de este trabajo.

PREFACIO:

El crecimiento demotécnico, es decir la relación directa entre el incremento poblacional humano y el desarrollo tecnológico del siglo recién pasado, han incidido negativamente en las características del agua dulce, tanto en su calidad como en su cantidad.

La extensión latitudinal y la especial geografía de Chile, determinan gran diversidad climática. Desde el desierto árido del norte del país a las lluvias abundantes de Aysén y Magallanes, diversos problemas afectan especialmente la calidad de los sistemas límnicos y especialmente los fluviales. Las aguas naturales contienen sales minerales en pequeñas cantidades, las que se han incrementado aceleradamente por actividades humanas en las cuencas de drenaje. La calidad de las aguas, considerada como la cantidad de solutos en ellas, tiene relación directa con factores diversos entre los cuales para los sistemas del país representan importancia los siguientes:

- 1) Clima. En especial la pluviometría y temperatura, en las zonas áridas y semiáridas (I a III Región), las aguas naturales presentan un contenido salino alto debido a un balance hidrológico negativo, lo cual implica tasas de evaporación y contenido de electrolitos altos lo cual las limita para el riego. En las regiones VIII hacia el sur el incremento de la materia orgánica asociada a los sistemas acuáticos disminuye los valores de pH y oxígeno disuelto.
- 2) Las características fisiográficas del país determinan sistemas fluviales cortos y con pendiente alta. Esto influye en mayor capacidad erosiva, transporte y contenido de material particulado de los ríos andinos.
- 3) Litología. La calidad de las rocas y suelos que al lixiviar sales minerales incrementan su contenido en las aguas, especialmente en los ríos de la zona norte del país. Es de importancia considerar que los rangos naturales de metales disueltos en algunas cuencas es mayor que los rangos de valores de otras regiones del mundo.
- 4) Infiltración de suelos. La entrada de agua en los suelos y su posterior ingreso a los sistemas acuáticos influye en la calidad del agua, especialmente por el riego, la textura del suelo, su grado de compactación y las características químicas de los mismos. La calidad de las sales en el agua es determinante en la velocidad de infiltración.
- 5) Salinidad. Definida como la cantidad total de sales y tipo de ellas presentes en el agua.
- 6) Material particulado. La orografía, la topografía y la presencia de vegetación aledaña influyen principalmente junto con las tasas de evapotranspiración en la calidad natural de las aguas.
- 7) Contaminación. Los riesgos de contaminación de las aguas naturales se han visto incrementados durante las últimas décadas por el ingreso de compuestos químicos industriales, agrícolas y domésticos. A esto se añaden los efectos de la deforestación y la roturación de tierras marginales de las laderas, las cuales incrementan la erosión y el ingreso de material particulado.

En consideración a las significativas diferencias climáticas y limnológicas del país los estudios deberían ser realizados considerando cuencas individuales o regiones con sistemas similares atendiendo a la influencia del clima y la hidrología en:

- 1) la distribución espacio-temporal de las especies químicas en las fracciones disueltas y particuladas y su efecto directo en la biota.
- 2) El transporte de especies químicas.
- 3) El análisis de las especies químicas presentes y las posibles interacciones sinérgicas o antagónicas entre la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos y factores como la temperatura, O₂ disuelto, pH y salinidad.
- 4) El análisis de los procesos que ocurren en la interfase sedimento-agua, por efecto de sedimentación y removilización de especies hacia la columna de agua.
- 5) Bioensayos de toxicidad y bioacumulación, especialmente con Cu, Mn, Mo y Cd en vegetales receptores de diferentes calidades de agua de riego.

La disponibilidad de las aguas epicontinentales con la calidad requerida para sus diversos usos debería además considerar las variaciones estacionales y de variabilidad física de los sistemas acuáticos, con el propósito de establecer la distribución espacio-temporal de las especies químicas y los posibles efectos en la biota.

Finalmente, la importancia de la mantención de la calidad del agua requiere necesariamente de redes de control de monitoreo adecuadas acorde con el desarrollo tecnológico del país, conjuntamente con una base de datos que permita sustentar niveles deseables de calidad del agua junto con capacidad de predicción y prevención de posibles problemas ambientales.

Irma Vila Pinto.
Lab. Limnología.
Fac. Ciencias, U. de Chile

PRESENTACION

Uno de los problemas ambientales más importantes de Chile es el deterioro del recurso hídrico principalmente por aguas servidas domésticas, vertimiento de efluentes mineros, residuos industriales líquidos (RiLes), actividad agrícola entre otros que genera contaminación de las aguas superficiales y muchas veces de aguas subterráneas.

La política nacional del recurso hídrico tiene entre sus objetivos:

- Asegurar, la disponibilidad de agua con el abastecimiento de las necesidades básicas de la población.
- Mejorar la eficiencia de uso, a nivel de cuenca hidrográfica, de acuerdo con la factibilidad económica, considerando su condición de bien escaso en gran parte del territorio.

La Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) está coordinando la elaboración de un conjunto de normas secundarias de calidad ambiental en las principales cuencas hidrográficas de Chile en el corto plazo, con el fin de permitir resguardar la salud de la población, proteger los ecosistemas y mejorar la competitividad de los sectores involucrados.

En estas normas ambientales la calidad del agua se determina por variables físicas y químicas, en uno de sus artículos se menciona la integración de la biología, para contribuir a determinar impactos del sistema en eventos que se pudiesen producir por situaciones de emergencia. Sin embargo, a nivel internacional como por ejemplo en la Directiva Marco Europea se incorpora el aspecto biológico específicamente indicadores biológicos así como también hidromorfológicos y fisicoquímicos como información básica necesaria en los protocolos para determinar la salud de los sistemas fluviales (Munné y Prat, 2005), lo cual sería necesario incorporar en el país para mejorar el diagnóstico, muchas veces complejo, del estado del recurso.

En este contexto el Servicio Agrícola Ganadero (SAG), Fondo de Protección Ambiental financió el proyecto N° C37314-42 **“Desarrollo de un modelo para el uso de bioindicadores y bioensayos como medida de la condición biológica de un cuerpo de agua”** proyecto realizado entre el Laboratorio de Bioensayos del Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA y el Laboratorio de Limnología, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile como entidades ejecutoras y La junta de vigilancia Río Cachapoal primera sección y la asociación de canalistas Canal San Pedro, población y derivados como entidades asociadas.

Por lo trascendente del tema de calidad de agua y los avances a nivel de gestión del recurso que se están llevando a cabo en el país, el SAG consideró necesario la elaboración de un manual de divulgación relacionado con el tema del proyecto, para contribuir de este modo a la educación ambiental del país.

El propósito de este manuscrito “Manual de Evaluación de Calidad de Agua” es el de servir de guía para conocer y diagnosticar la calidad del agua de los sistemas fluviales y aplicar bioensayos y/o bioindicadores para la evaluación de la misma. Está dirigido a todos los actores relacionados con el recurso hídrico tales como servicios públicos, privados, organizaciones no gubernamentales y comunidad en general.

M. Ximena Molina Paredes
Lab. Bioensayo y Microbiología, CENMA
Fac. Ciencias, U de Chile.

I. CALIDAD DE LAS AGUAS (*)

La “calidad de aguas continentales” es un término relativo que depende del uso final que se le dé al recurso en relación con las actividades de la cuenca hidrográfica. La cuenca se identifica con el espacio de drenaje y volúmenes de agua donde opera el flujo hídrico, condicionado a la cantidad de precipitaciones y al efecto de los recursos suelo y vegetación generando en su conjunto el ciclo hidrológico. El espacio está definido por sistemas topográficos y geológicos que delimitan territorialmente una superficie de drenaje común donde interactúan los sistemas físicos, bióticos y socioeconómicos.

El manejo sustentable del recurso agua involucra procesos hidrológicos, biológicos, físicos, químicos y aspectos sociales y económicos (Karr, 1991; Norris & Thoms, 1999). La evaluación de la calidad del agua se ha realizado en base a análisis físicos y químicos y bacteriológicos, sin embargo en varios países latinos (Panamá, Venezuela, Norte de Brasil, Colombia) se ha iniciado la inclusión de las comunidades acuáticas, situación que es realidad en Estados Unidos y Europa (DMA, 2000; EPA, 2003), desarrollando un enfoque de “integridad biológica” (Davis & Simon, 1995) para la evaluación de los sistemas acuáticos naturales e intervenidos, Figura 1.

Las actividades de la cuenca determinan los diversos requerimientos de uso del agua que se requiere en el país. Estos son: Usos *in situ* como turismo, deportes y recreación, acuicultura, pesca deportiva y recreativa; Usos extractivos tales como riego, captación para agua potable, hidroelectricidad, actividad industrial, actividad minera; Usos ambientales que involucra la biodiversidad, sitios prioritarios (Sistema Nacional de Areas

Protegidas (SNASPE); Usos ancestrales reservados a los pueblos nativos (DGA, 2005). En la Figura 2 se ejemplifican algunas actividades que se realizan en la sub cuenca Cachapoal y que inciden en la calidad del recurso.

En el país aún no se establece un manejo integrado de cuenca, pero su desarrollo lo contempla bajo modificaciones a la legislación actual en el Código de Aguas (DGA, 2005).

La disponibilidad y calidad química de las aguas naturales de los ríos de Chile ha estado influenciada por diversos factores, tales como: el clima oceánico (temperaturas, precipitaciones y viento), el comportamiento hidrológico de los escurrimientos superficiales y subterráneos.

La disponibilidad y calidad química de las aguas naturales para riego son diferentes a lo largo del país (Vila *et al*, 1996), las zonas áridas y semiáridas son las de mayor contenido salino en sus aguas naturales. Por litología (calidad de las rocas y componentes del suelo) los ríos del Norte de Chile poseen rangos naturales de metales disueltos altos en comparación con otras regiones del mundo. Se han detectado altos valores de concentración de boro desde la I a la IV región (llegando en algunos casos a 5 (mg/l)), también de arsénico en la I y II región (detectándose concentraciones de 0,7 (mg/l)). Esto se ha incrementado por las malas prácticas de riego y/o por descargas mineras, como fué la situación del río Loa (II región). También hay altas concentraciones de cobre en la IV, VI, y RM y hierro en la IV región. En la zona central los ríos Maipo (RM), Aconcagua (V región) y Cachapoal (VI región) han presentado metales pesados de origen natural y de vertidos mineros tales como arsénico, cobre y molibdeno (OECD-CEPAL, 2005). En 1990 se determinó que de 102 acuíferos, 45 tuvieron un alto nivel de nitratos y 35 altas concentraciones de hierro y magnesio.

(*) M^a. XIMENA MOLINA PAREDES Lab. Bioensayos y Microbiología, CENMA; Fac. Ciencias, Universidad de Chile e IRMA VILA PINTO. Lab. Limnología, Fac. Ciencias, Universidad de Chile.

La calidad del agua ha ido decreciendo en gran parte por las actividades productivas que se desarrollan en las cuencas (deforestación, ruptura de tierras marginales, minería, pesquería, agricultura, extracción de áridos), por su creciente demanda y por el mal uso que los habitantes le dan al recurso al tratarlas como receptora de residuos. Ha aumentado la erosión, el ingreso de material particulado y el vertimiento de riles y agroquímicos al cauce, modificando así los tramos bajos de los ríos (Vila, *et al.*, 1996; OECD-CEPAL, 2005). En la “Política Nacional de Recursos Hídricos” se contempla aspectos de calidad de agua y medioambiente bajo un enfoque preventivo y de reducción de la contaminación. Entre sus objetivos se contemplan: “asegurar la disponibilidad de agua, abastecer las necesidades básicas de la población, mejorar la eficiencia de uso del recurso a nivel de cuenca hidrográfica, disminuir el impacto de la variabilidad hidrológica en la actividad del país, recuperar el pasivo ambiental existente”, entre otros.

En el día mundial del agua del año 2005 la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA se comprometió a impulsar la elaboración de un conjunto de normas secundarias de calidad del agua, para asegurar la protección de las principales cuencas hidrográficas de Chile en el corto plazo, con el fin de permitir resguardar la salud de la población y la protección de los ecosistemas.

La norma que hasta ahora se relaciona con la evaluación de la calidad de agua en el país es la NCh 1333, Of. 78, que establece los “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos” bajo criterios que tienen por objeto proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen. Esta norma trata sobre agua para consumo humano, agua para la bebida de animales, riego, recreación y estética y vida acuática. La norma se basa en los parámetros físicos y químicos y se incorpora la parte biológica sólo en base a concentración de coliformes.

Actualmente, en conformidad a una “Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas” (CONAMA, 2005), se está desarrollando el proceso normativo en el país. El objetivo de esta guía es servir de base técnica para la elaboración y homogenización de las normas secundarias, proveer a los Comités Operativos y Ampliados que se constituyan en cada región de propuestas, criterios, definiciones, clases de calidad, valores, parámetros, metodologías y de gestión de programas de vigilancia, entre otros aspectos.

Los objetivos específicos de las Normas Secundarias son la mantención y/o recuperación de: “la calidad de las aguas para proteger y conservar las comunidades acuáticas; la conservación de especies hidrobiológicas de importancia para la pesca deportiva y recreativa y para la acuicultura; la calidad de las aguas para la bebida de animales, sea que vivan en estado silvestre o bajo el cuidado y dependencia del hombre; proteger la calidad de las aguas para riego de manera de conservar los suelos y la flora silvestre o cultivada y proteger cuerpos o cursos de agua de extraordinaria calidad como componentes únicos del patrimonio ambiental”. La elaboración y dictación de las normas secundarias requiere ser asumido por cada región del país, incorporando su realidad ambiental, económica y social de dicho territorio, pero también deben ser procesos homogéneos y estandarizados acordes con criterios nacionales de calidad.

El valor de concentración del compuesto o elemento, podrá ser modificado según la calidad natural y de los criterios sitio-específicos; como por ejemplo la sensibilidad de las especies a las condiciones del medio natural en que habitan, las características físicas y químicas del lugar que influyen en la biodisponibilidad, la toxicidad y/o recursos hídricos con características únicas, escasas y representativas.

El Anteproyecto de Norma Secundaria de Calidad Ambiental para la protección de las aguas superficiales continentales establecen clases (C) de calidad objetivo:

Clase 0: aguas de excepción, por su extraordinaria pureza y escasez forma parte única del patrimonio ambiental de la República, utilizable para cualquier situación.

Clase 1: aguas de muy buena calidad, adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto.

Clase 2: buena calidad, agua apta para el desarrollo de la acuicultura, la pesca deportiva y recreativa.

Clase 3: regular calidad, adecuada para bebida de animales y para riego restringido.

Las aguas que excedan los límites establecidos para la Clase 3, indicarán agua de mala calidad (Clase 4) no adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas ni para los usos prioritarios, sin perjuicio de su utilización en potabilización con tratamiento (CONAMA,2004).

Hoy en día se dispone de un informe sobre un diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad (DGA, 2005).

Referencias

CONAMA, Gobierno de Chile, 2004. Guía CONAMA para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas.

Davis W.S. & T. P. Simon, 1995. Biological Assessment and Criteria. Tools water resource planning and decision making. CRC press, Inc. 415 pp.

DGA, 2005. “Objetivos y Alcances de la Reforma del Código de Aguas de Chile”.

Conferencia Internacional CEPAL, DGA y GWP.

DGA, 2005. Dirección General de Aguas ,2005. DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD. INFORME FINAL. Ministerio de Obras Públicas, Cade-Idepe.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de las aguas.

Karr, J.R., 1991. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management. Ecological Applications 1:66-84.

NCh 1333, Of. 78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

Norris, R. H. & M.C. Thoms, 1999. What is a river health? Freshwat. Biol. 41:1-13.

Vila I., M.Contreras & J. Pizarro, 1996. Análisis del Efecto del Material Particulado en aguas de riego. I-IX región. Antecedentes Preliminares. Informe Final. S.I.T. N° 35. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Conservación y Protección de Recursos hídricos. Convenio Lab. Limnología, Fac. Ciencias, Depto. Cs Ecológicas, U. de Chile.90 pp.

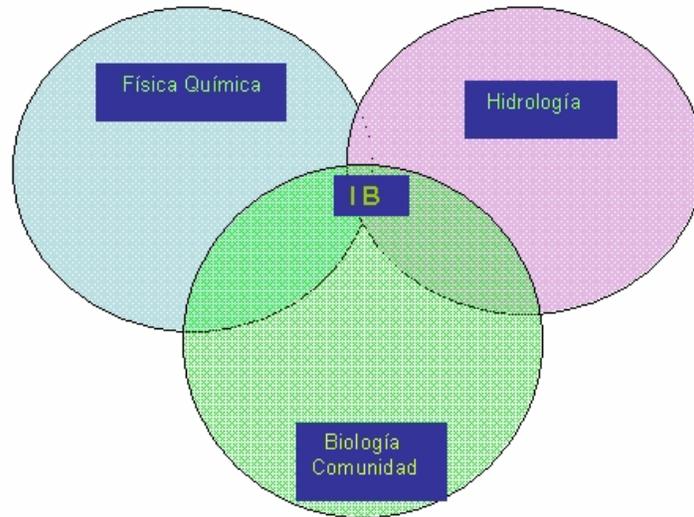
OCDE , 2005. Evaluaciones del desempeño ambiental CHILE. Naciones Unidas, CEPAL. 246 pp.

Páginas web

- www.CONAMA.cl

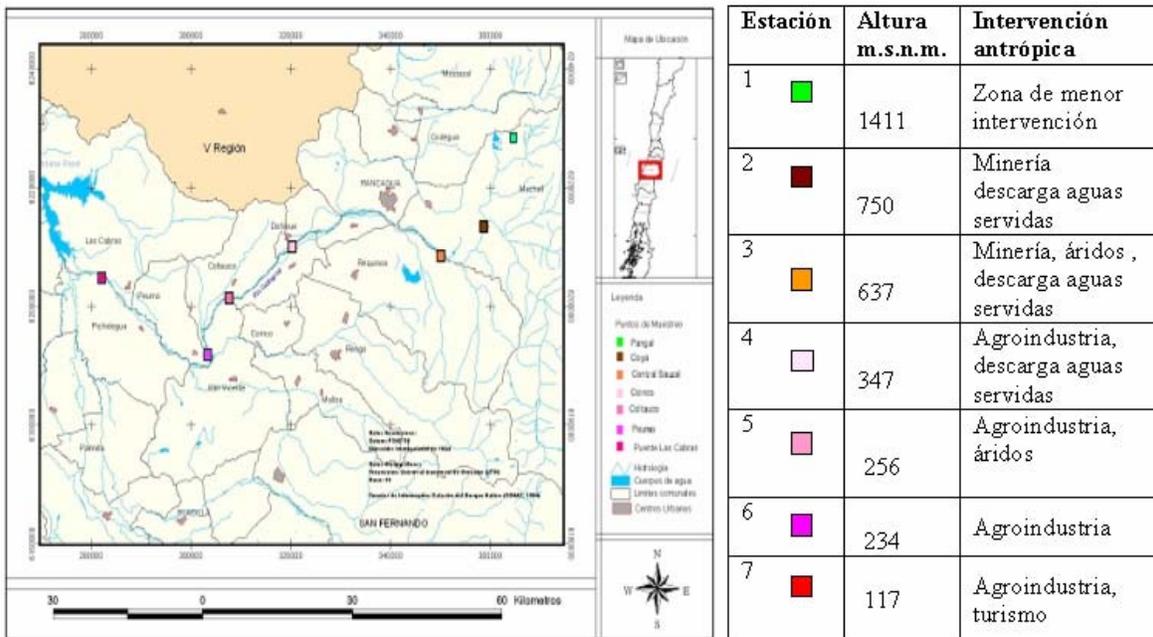
- *EPA OWOW Monitoring and Assessing Water Quality Recent Additions*
<http://www.epa.gov/owow/monitoring/new.html>

Figura N° 1: Esquema del Enfoque de “integridad biológica”.



Este esquema indica la interrelación entre variables físicas, químicas y biológicas.
IB: Integridad Biológica

Figura 2: Intervenciones antrópicas en la sub cuenca Cachapoal.



II. HIDROLOGÍA (*)

1.- Generalidades

Los recursos hídricos se definen como “Recursos disponibles o potencialmente disponibles en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable” (Política Nacional de Recursos Hídricos, 1999).

El recurso agua es de importancia estratégica para el crecimiento económico de las regiones del país, sin embargo presenta problemas tanto en calidad como en cantidad. Respecto a la cantidad su condición es escasa en la zona Norte – Centro de Chile dado por la relación demanda/disponibilidad, la demanda supera ampliamente las disponibilidades desde la I a la XI regiones (Fig. 1a y 1b). Así se presenta un desajuste entre la distribución de la oferta hídrica y la distribución de las necesidades por lo que resulta imprescindible compatibilizar los procesos de desarrollo con la protección del recurso.

El uso del agua en el país, alcanza los 2.000 (m³/s) de caudal continuo, de los cuales el 67,8 % corresponde a usos no consuntivos (hidroeléctricos) y el 32,2 % a usos consuntivos. De estos últimos usos un 84,5 % se destina a riego con un caudal medio de 546 (m³/s), un 11 % a faenas mineras e industriales, un 4,4 % a abastecimiento de un 98 % de población urbana y 52,4 % de población rural, con 35 (m³/s) de caudal medio (Fig. 2). Según estudios de Dirección General de Aguas (DGA) realizando estimaciones al año 2017, los requerimientos para los usos domésticos, mineros e industriales aproximadamente se duplicarán (Fig. 3) acentuándose las restricciones a las

(*) IRMA VILA P (1). y M. XIMENA MOLINA PAREDES(2). (1)Lab. Limnología, Fac. Ciencias, U. de Chile; (2)Lab. Bioensayo, CENMA ; Fac. Ciencias U de Chile.

demandas por el recurso (Política Nacional de Recursos Hídricos, 1999).

Los ríos son sistemas lineales que evacúan hacia los océanos el agua caída sobre las masas continentales. La energía cinética contenida en el agua es disipada y la morfología de los cauces fluviales se modifica según la pérdida de esta energía a lo largo del curso del río. El proceso hidráulico se desarrolla en forma previsible dentro del cauce, las condiciones geográficas de las cuencas fluviales imponen ciertas características al río, se observan morfologías similares cuando se asemejan la topografía, altitud y pluviosidad (Leopold, *et al.*, 1964). Las diferencias suelen ser mayores entre los distintos sectores de un mismo río que entre sectores homólogos de ríos distintos, para su estudio el sistema fluvial debe tomarse en su conjunto como un todo estableciendo los diversos tramos basados en la graduación de características a lo largo de su curso.

Los ríos chilenos que drenan la vertiente occidental de la Cordillera de Los Andes tienden a nacer sobre los 3000 m.s.n.m. por ello son de pendiente alta y cortos lo que influye en la alta capacidad erosiva, transporte y contenido de material particulado.

Chile es un país con una longitud de más de 4000 km que se desarrolla entre los 66° 30' W -76° W y con latitudes que van desde los 17° 30' S a los 56° 30" S., con gran diversidad de clima, rasgos morfológicos y características litológicas que influyen en distintos grados de escurrimiento. Basado en este último aspecto se distinguen tres zonas hidrográficas endorreica, arreica y exorreica. La primera “endorreica”, son ríos de cursos efímeros que no llegan al mar típicos del Norte de Chile, se observan hasta el río Loa e incluye la Puna de Atacama. La segunda zona “arreica” son áreas carentes de escurrimientos superficiales pero con afloramientos de aguas subterráneas, se encuentran desde los ríos Loa al Copiapó. La tercera zona “exorreica” contiene ríos que

desembocan en el mar y se extiende desde Copiapó a la Patagonia.

2.- Zonas Hidrológicas de Chile:

(Figura 4)

Similitudes en los caudales y regímenes de escurrimientos, del tipo de la red de drenaje permite definir zonas hidrográficas más o menos homogéneas (Niemeyer y Cereceda, 1984). De acuerdo con estas características los sistemas fluviales chilenos se clasifican en general en seis zonas.

2.1 - **Norte árido:** ríos de régimen esporádico por condiciones extremas de aridez, en el altiplano se forman algunos ríos por lluvias y derretimiento de nieves, se forman salares con las aguas acumuladas en depresiones y aguadas que son afloramientos de aguas subterráneas. Presentan salinidades elevadas con contenidos altos de sulfatos y cloruros. Incluye las regiones de Tarapacá, Antofagasta y la parte norte y nororiental de Atacama. Entre sus ríos principales se citan el Lauca (18°30'S ; 69°14'W) y el Loa (21°25'S ; 69°48'W).

2.2.- **Zona semiárida:** región sin relieve altiplánico. Los ríos que presentan cabecera en la alta cordillera tienen régimen permanente tomando dirección E-W dado por la tectónica local. El clima es semiárido con lluvias centradas en los meses de invierno, los ríos son de régimen mixto pluviales y nivales. Esta zona contiene los valles transversales, se extiende desde la región de Atacama, excluida su parte nororiental altiplánica, y las regiones de Coquimbo y Valparaíso hasta el cordón de Chacabuco. Se destacan los ríos Huasco (28°30'S; 70°59' W), Elqui y Choapa (31°39' S; 71°38'W).

2.3.- **Región subhúmeda:** formada por parte de la Zona Central de Chile y caracterizada por la presencia de la depresión intermedia o Valle Central. Se extiende desde el cordón de Chacabuco (33° S.W.) por el norte y la zona centro sur hasta el canal de Chacao y Seno de Reloncaví (42 °S.), abarcando una distancia aproximada de 1.000

km, con una extensión de 188.500 km². El clima dado por las temperaturas y precipitaciones junto a la topografía dividen a la región en dos. a) una centro norte de ríos de régimen mixto que se extiende desde el cordón de Chacabuco (33° S.W.) a la hoya del río Bío Bío. Se destacan los ríos Maipo (33°46'S; 71° 32'W) y Bío Bío (37 °45'S; 71°45'W). b) otra zona sur de ríos tranquilos con regulación lacustre y flujo constante. Presentan gran similaridad entre las zonas ritrónicas, potámicas y de humedales (Welcomme, 1992). El río más representativo es el río Valdivia (39°52'S; 73° 18' W).

2.4.- **Ríos de la Isla Grande de Chiloé** (42°S): Son ríos cortos de bajo caudal de origen exclusivamente pluvial. Con gran cantidad de materia orgánica por descomposición arbórea. Algunos ríos presentan alta salinidad por efecto de mareas.

2.5.- **Ríos trasandinos septentrionales de la Patagonia:** Este grupo de ríos se forma en el macizo andino en profundos glaciares. Hay presencia de alto contenido de material particulado. Se destaca el río Aysén (45°).

2.6.- **Ríos Magallánicos** (52° 31'S; 69° 19'W): Zona de hoyas hidrográficas cortas y caudal bajo. Ejemplo el río Rasmussen.

3.- Perfil Longitudinal

Los ríos tienden a tener perfiles longitudinales, en forma de línea cóncava abierta hacia arriba (Fig. 5), lo que implica que en un mismo río dependiendo de los accidentes del terreno, se suceden una serie de tipos de corriente con fuerte pendiente cerca de la fuente y mínima pendiente cerca de la desembocadura.

4.- Categorías del río

Los diferentes tipos de curso fluvial sustentan diferentes comunidades de

organismos lo que ha sido la base para clasificaciones por zonas geográficas y ecológicas (Welcomme, R.L. 1992). En la figura 6, se observan pozas y rápidos que conforman la morfología fluvial, Illies y Botosaneanu, (1963) propusieron una clasificación basada en las corrientes del río, las cuales dependiendo del curso rápido o lento generan hábitats ritrales y potamales en cortas distancias (Campos 1985). La zonación de los ríos según Illanes y Botasaneanu (op. Cit) es dependiente de los factores morfodinámicos tales como la pendiente, la anchura, la granulometría y la temperatura. Entre las zonas se distinguen el ritrón (foto 1) y el potamón (foto 2).

El ritrón se define como la región que se extiende desde las zonas de nacimiento del río hasta el punto en que las temperaturas medias mensuales ascienden a 20C, con concentraciones de oxígeno elevadas, velocidades de corrientes altas y turbulentas y la composición del lecho es de sustrato de bolones, piedras o grava con espacios ocasionales de arena o limo. Morfológicamente hay alternancia de pozas o charcos.

El potamón es el curso bajo del río, es la zona en que las temperaturas medias mensuales ascienden a más de 20C, se pueden presentar deficiencias de oxígeno, la corriente es lenta de tipo mas bien laminar y predomina en el lecho la arena o el cieno. Los componentes principales son el cauce y la zona inundable, es decir los lechos del río en sus dos fases principales, aguas bajas y de crecida.

También los viejos meandros que son tramos abandonados de un cauce antiguo; bancos que son depósitos de acarreos; zonas de aguas estancadas; diques naturales que son lomas que sobresalen de la superficie de la llanura inundable adyacente al cauce; depósitos de marismas formadas por sedimentos finos.

5. Formación de afluentes y orden de las corrientes

Los cauces fluviales tienen una disposición arbórea en el conjunto de una cuenca, hay varias formas de clasificación de las corrientes con este tipo de estructura, la mayormente aceptada es la que jerarquiza en función del orden de las corrientes.

-primer orden: son corrientes que carecen de afluentes.

-segundo orden: están formadas por la unión de dos corrientes de primer orden.

-tercer orden: nacen de la unión de otras corrientes de segundo orden y así sucesivamente.

En la figura 7 se muestra un ejemplo de sistema de ordenación (Strahler, 1957 en Welcomme, 1992).

6.- Procesos físicos y químicos

a) **Variabilidad de flujo:** La configuración del flujo depende principalmente de la escorrentía producida por precipitaciones o fusión de nieve sobre la cuenca fluvial y en menor grado por retención y afluencia del agua subterránea. La proporción de agua que se traduce en escorrentía dependerá del tipo de terreno y cubierta vegetal.

b) **Velocidad de la corriente:** En general la velocidad es afectada por la forma, la pendiente, anchura del río, profundidad y rugosidad del lecho, también hay que considerar las precipitaciones y ritmo de deshielo. Por ejemplo la velocidad es menor al disminuir la pendiente, los ríos de orden menor tienden a tener flujos más rápidos (Simth y Smith, 2001). La velocidad de corriente puede deducirse aproximadamente del tamaño de partículas en el lecho (Fig. 8).

c) **Temperatura:** es un factor altamente variable, dado por: latitud y altitud,

composición del sustrato, turbiedad, aportes freáticos o pluviales, viento y cubierta vegetal, lo que se acentúa en aguas con menor profundidad. Los ríos por su turbulencia en general se mantienen bien mezclados pero se puede establecer una gradualidad de temperaturas entre el borde y el agua ubicada al centro en una misma zona. En las zonas templadas los ríos pueden helarse en latitudes y altitudes más altas. A lo largo del día se han encontrado fluctuaciones por sobre 10 °C lo que varía de acuerdo a la profundidad y porcentaje de exposición a la radiación solar. La cantidad de radiación retenida por la corriente depende del flujo de calor, del área comprendida y de las descargas que recibe el río.

d) **Inundaciones:** las inundaciones pueden ser causadas por desbordamiento del agua sobre el cauce del río dado por lluvias locales y mareas. Cuando el flujo aumenta significativamente y el cauce no tiene capacidad para evacuar el volumen de agua que recibe el río (nivel de cauce lleno), el agua se desborda sobre la cuenca. Por lluvias locales las precipitaciones en las cuencas inmediatamente circundantes de corriente de orden inferior saturan el suelo y producen anegamientos.

Referencias

Campos H., 1985. Distribution of the fishes in the Andean rivers in the south of Chile. Archives of Hydrobiology 104: 169-191.

Illies, J. y L. Botosaneanu, 1963. Problemes et methodes de la classification de la zonation écologique des eaux courantes, considerees surtout du point de vue faunistique. Mitt.Int.Verein.Theor.Angew.Limnol. 12:1-57.

Leopold, L.B., M. B. Wolman y J. P. Miller 1964. Fluvial processes in geomorphology. San Francisco, W. H. Freeman, 522 p.

Niemeyer H. & P. Cereceda, 1984. Geografía de Chile. Tomo VIII Hidrografía. Instituto Geográfico Militar. 320 pp.

Política Nacional de Recursos Hídricos, 1999 en www.dga.cl

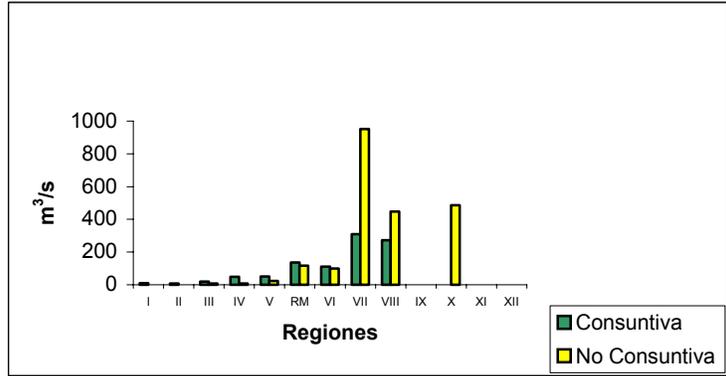
Simth R.L. & T.M. Smith, 2001.. Ecología. 4ta Ed. Addison Wesley. 642 pp.

Welcomme, R.L. 1992. Pesca Fluvial FAO Documento Técnico de Pesca N° 262.

Página web

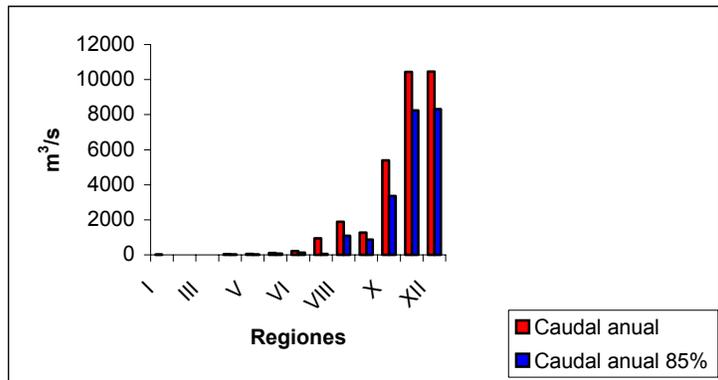
Dirección General de Aguas (DGA):
www.dga.cl

Figura 1 a: Demanda de agua a nivel regional.



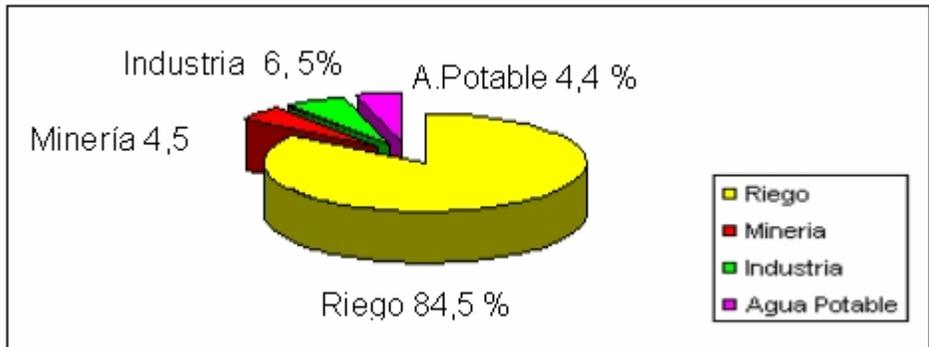
Fuente: Dirección General de Aguas.

Figura 1 b: Disponibilidad de agua a nivel regional.



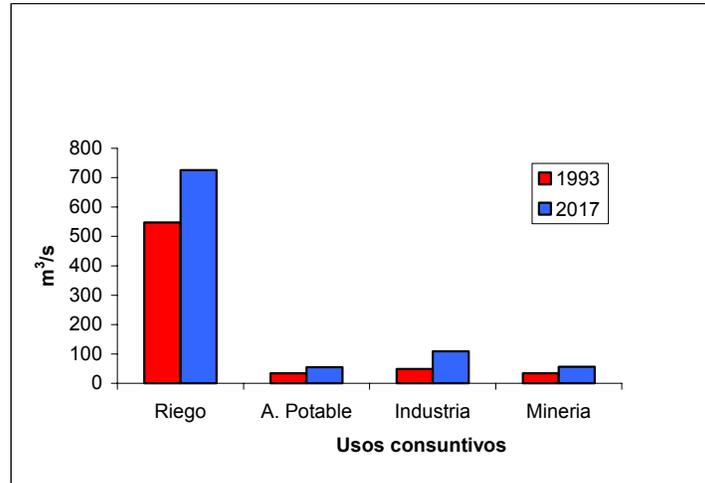
Fuente: Dirección General de Aguas.

Figura 2: Demanda Actual Uso Consuntivo.



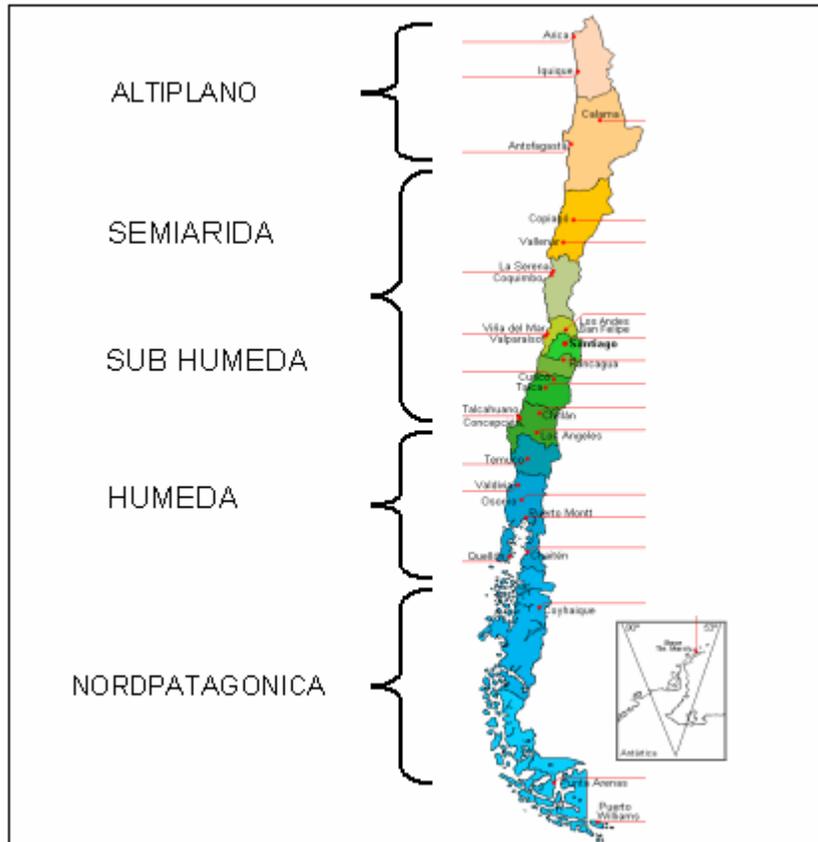
Fuente: Dirección General de Aguas.

Figura 3: Estimación incremento para las demandas en el período 1993-2017.



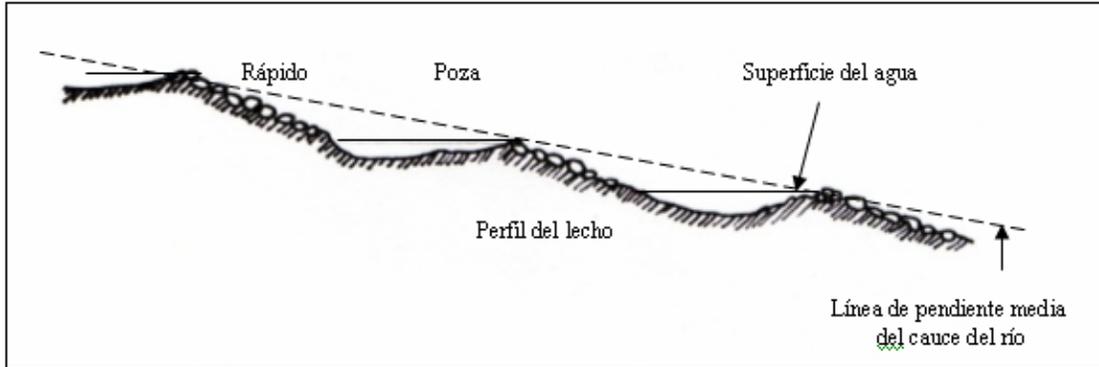
Fuente: Dirección General de Aguas.

Figura 4: Zonas hidrológicas de Chile.



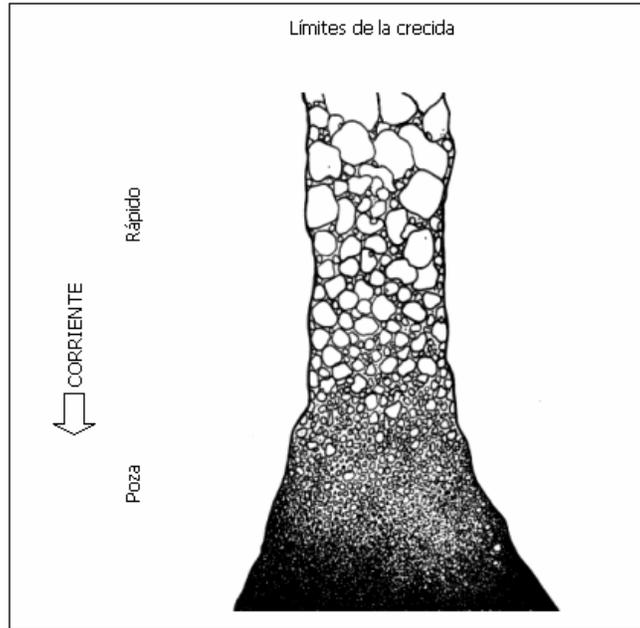
Niemeyer y Cereceda 1984.

Figura 5: Perfil longitudinal teórico, de un sistema fluvial.



Vanesa Acuña

Figura 6: Morfología fluvial; se indica la división del cauce, pozas y rápidos.



Vanesa Acuña

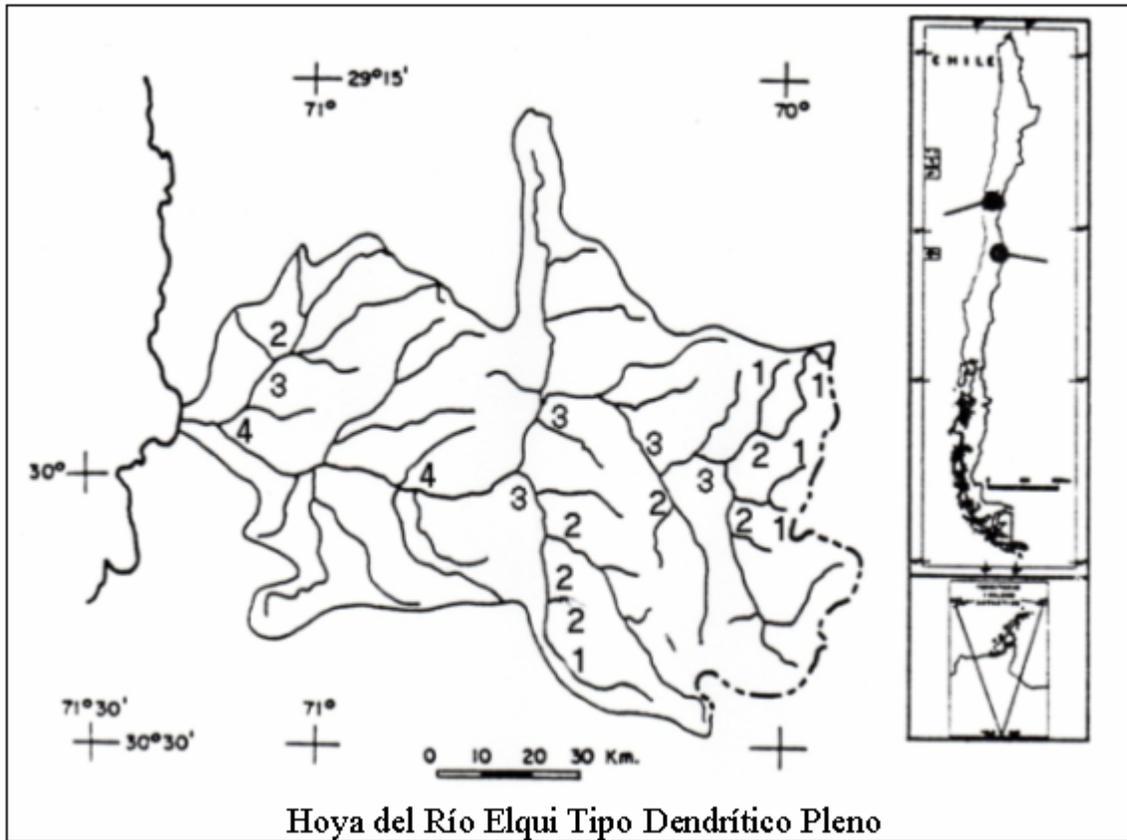
Fotos 1: Hábitat de rítrón.



Fotos 2: Hábitat de potamón.

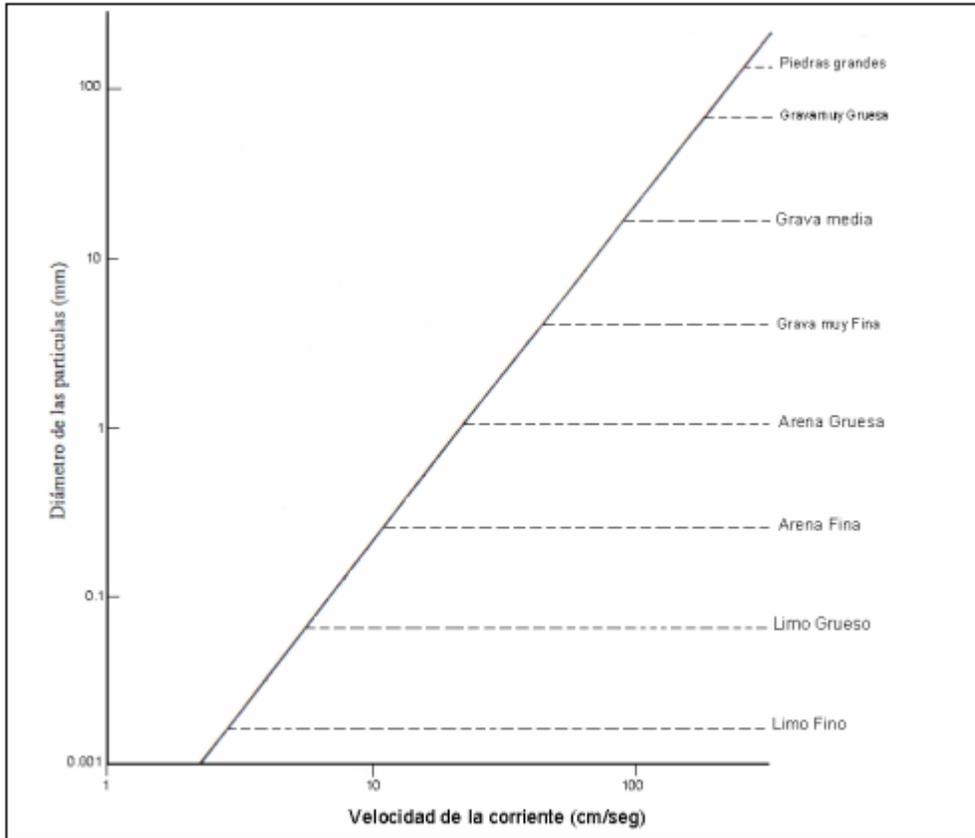


Figura 7: Diferentes sistemas de ordenación de los sistemas fluviales representados en la Hoya del río Elqui.



Vanesa Acuña

Figura 8: Velocidades de la corriente necesarias para mover partículas minerales de varios tamaños (línea trazada a partir de datos de Nelson, 1950 en Welcomme 1992).



III. VARIABLES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS (*)

A.- Características químicas

La composición química de aguas naturales es regulada por factores climáticos tales como las precipitaciones, procesos de erosión, meteorización, evaporación, sedimentación y también la influencia de componentes biológicos del sistema como por ejemplo la vegetación, la actividad microbiológica del suelo que influye en la composición de las aguas de escurrimiento. La relación entre la velocidad de la corriente y la cantidad de carga sólida, como se demuestra en la Figura 8, repercute en la morfología del río y la biología de los organismos que lo habitan. Al disminuir la velocidad aumentará la tasa de sedimentación formando bancos y zonas de anegamiento, al contrario al aumentar la velocidad de corriente se favorecerán los factores erosivos, aumenta la inestabilidad del río y se dificulta el asentamiento de organismos bentónicos.

Gran porcentaje de la energía que entra al río proviene de la cuenca adyacente o de aguas arriba, en menor grado por arrastre de material descompuesto por substrato geológico y flujo subsuperficial. La energía se incorpora como material orgánico grueso, fino y disuelto. Es importante poder mantener los nutrientes tanto particulados como disueltos aguas arriba y reducir las pérdidas de éstos aguas abajo. Los nutrientes son reciclados en el mismo sitio como también hay un componente espacial que es el transporte horizontal.

De acuerdo con Newbold *et al.*, 1981, la eficiencia del uso de nutrientes en un sistema determinado incluye reciclado, retención y transporte aguas abajo y se representa como un modelo que consiste en una espiral

(*) IRMA VILA PINTO y M. XIMENA MOLINA PAREDES. Lab. Limnología, Fac. Ciencias, U. de Chile; Lab. Bioensayo, CENMA; Fac. Ciencias U de Chile.

hipotética trazada longitudinalmente a lo largo del río como se muestra en la Figura 1.

El río recibe aportes de materia orgánica del componente terrestre de la cuenca tanto particulada como disuelta a lo largo de su tramo que se va transportando río abajo hasta el océano. También indirectamente el río recibe productos de material lixiviado geológico y de los suelos tales como carbonatos. Los procesos biológicos van disminuyendo el tamaño de partículas aumentando la concentración río abajo de las sustancias disueltas.

Existen tres mecanismos que regulan la composición química natural de las aguas de río: precipitaciones, naturaleza geológica de las rocas y el proceso de evaporación-cristalización (Gibbs, 1970). Por ejemplo en la región árida nuestros ríos presentan alta salinidad dado en gran parte por la tasa de evaporación y de cristalización de las sales concentradas.

La conductividad es una medida de la suma total de iones en una masa hídrica, la cual depende de variables físicas, químicas y biológicas. Las variaciones entre ríos tributarios dentro de un mismo sistema fluvial pueden ser mayores que las que se observan en los cauces principales, dado que las corrientes de orden inferior, son más sensibles a los condicionamientos locales de la geología y la vegetación que los cauces de orden superior, los que resultan de un promedio de las condiciones de todos los efluentes de orden inferior. La conductividad puede cambiar a lo largo del año y podría ser mayor en estaciones secas comparado con estaciones húmedas dado por las concentraciones de sustancias disueltas. Relevantes son los factores de dilución, efectos de ribera, desagües, evaporación, cristalización de sales, absorción por los organismos vivos entre otros y en importancia creciente hoy en día las actividades antrópicas industriales, agrícolas y domésticas.

El grado de acidez (pH) puede fluctuar haciéndose más ácido por aportes forestales, grados de descomposición, inundaciones según

el tipo de suelo o más básico al concentrarse las sales de calcio por evaporación. Este factor presenta fluctuaciones diurnas, por actividades respiratorias y fotosintéticas de la biota.

El oxígeno disuelto este es uno de los principales factores que influye en la distribución de algunos organismos, además de la dinámica física del cuerpo de agua, la vegetación, localidad en el río, desarrollo de la zona litoral, profundidad entre otros. La acción de los vientos mantienen las masas de agua bien oxigenadas, más aún en ríos de alta pendiente como es el caso de los ríos chilenos. Las pozas con un flujo mínimo pueden llegar a la desoxigenación total por efecto de descomposición de la materia orgánica, por el aumento de temperatura y consumo de oxígeno por parte de la biota. La solubilidad del oxígeno depende de la presión atmosférica e hidrostática y la temperatura. Presenta variaciones a lo largo del día, en lugares con actividad fotosintética aumenta la concentración de oxígeno en el día disminuyendo en la noche, por la demanda bioquímica del mismo oxígeno causado en parte por limo y sólidos orgánicos suspendidos y también por agentes contaminantes.

B.- Características biológicas

Comunidades acuáticas

En las diferentes zonas de los sistemas fluviales se observa dominancia de diversas comunidades tales como Bacterias, Fitoplancton, Macrófitas, Bentos y Necton.

Estas están directamente relacionadas por la estructura trófica del sistema fluvial.

Productividad biológica

Los ecosistemas fluviales desde la cabecera a la desembocadura constituyen un sistema, que está bajo un continuo cambio de condiciones ambientales, reflejándose en las comunidades biológicas que los componen. Las corrientes arrastran material de las orillas y del fondo del río aguas abajo para ser usado

por los organismos bentónicos, entre los cuales los insectos en distintos estados de desarrollo son los más abundantes y serían adecuados para evaluar cambios en la calidad de aguas de los ambientes acuáticos (Rosemberg & Resh, 1993). Estos habitan bajo piedras, rocas, enterrados o en cualquier otro tipo de superficie que les sirva de soporte o sustrato (Figura 2).

Las variables geofísicas presentan una constante gradación donde la composición de la biota refleja un uso eficiente de la energía, concepto denominado continuum fluvial (Vannote *et al.*, 1980). En general se distinguen tres ordenaciones morfológicas en el río: cabeceras (de orden 1 a 3), corrientes de longitud media (de orden 4 a 6) y grandes ríos (de orden 6). En las corrientes de cabecera predominan los procesos erosivos, son zonas heterótroficas, con más del 90 % del total de carbono orgánico proveniente de la materia orgánica y detritus de la vegetación terrestre aledaña. Esto conlleva a un dominio de organismos trituradores, filtradores y recolectores. A medida que aumenta el caudal de la corriente el material autóctono es importante y en menor grado el material alóctono procedente de los afluentes secundarios (orden 4 a 6) constituyendo una zona autotrófica, en este tramo los filtradores y recolectores se alimentan de la materia orgánica particulada fina transportada aguas abajo que junto a los ramoneadores son los consumidores dominantes alimentándose de la producción autotrófica. Se observa que la biomasa de depredadores aumenta de tamaño aguas abajo. La composición de las comunidades acuáticas vivas refleja los cambios en la naturaleza de los sustratos, nutrientes y en la forma física de estos ecosistemas. A medida que aumenta su número de orden, el río se hace más ancho y profundo, el caudal aumenta y la velocidad de la corriente se hace más lenta, los sedimentos se acumulan en el fondo y la producción vegetal disminuye dando una vuelta gradual a la heterotrofia. La fuente de energía deriva del material particulado fino la cual es usada por recolectores y sedimentívoros que son en este caso la comunidad dominante. También

el hecho de que las aguas sean más lentas y profundas la materia orgánica disuelta presente puede soportar la comunidad de fitoplancton y zooplancton. Este concepto teórico del continuum fluvial puede aplicarse a la evolución espacial de las condiciones dentro del cauce principal pero es necesario considerar la influencia de los afluentes e irregularidades geomorfológicas, entre otros aspectos (Smith & Smith, 2001).

Referencias

Gibbs, R.J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, Wash., 170:1088–90.

Newbold, J.D., *et al.*, 1981. Nutrient spiralling in streams: the concept and its field measurement. Can.J.Fish.Aquat.Sci., 38(7):860–3.

Rosemberg D. M. & Resh V. H. 1993. Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates. Chapman & Hall, New York. 488 pp.

Vannote, R.L.G. W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell & C.E. Cushing.1980. The river continuum concept. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37:130-137.

Simth R.L. & T.M. Smith, 2001. 4ta Ed. Ecología. Addison Wesley. 642 pp.

Figura 1: Espiral de nutrientes con sus componentes

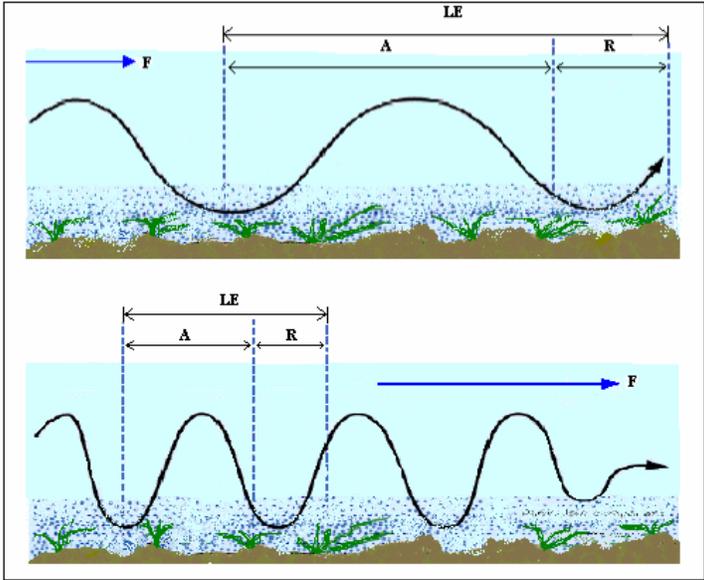
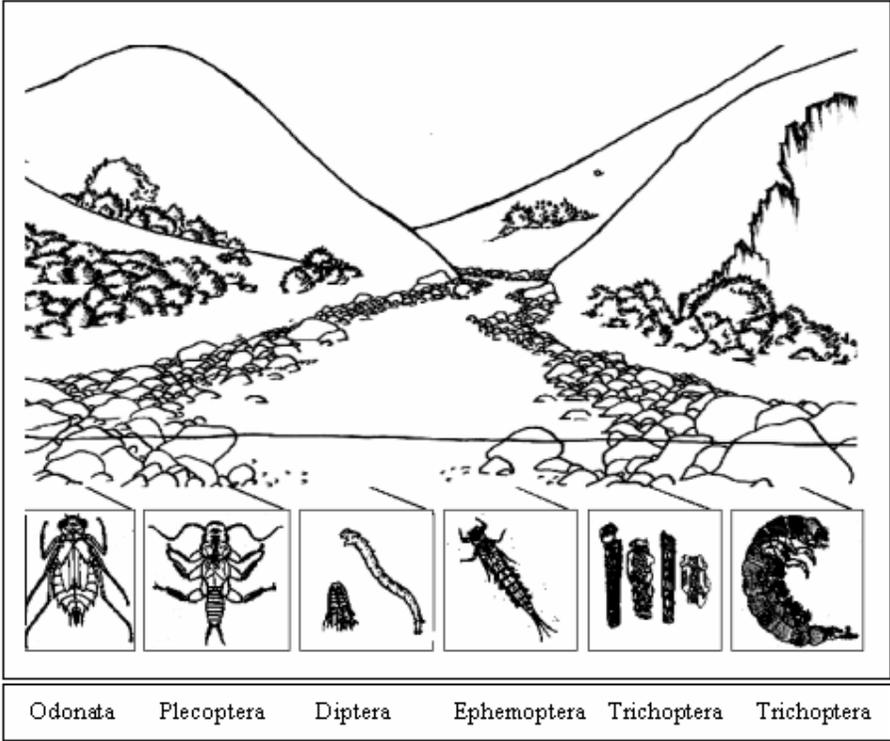


Figura 2: Ejemplo de comunidad de macroinvertebrados bentónicos.



IV. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA PROTECCIÓN DE LOS ECOSISTEMAS

1.-Método de Muestreo de Macroinvertebrados Bentónicos (*)

La gran mayoría de los macroinvertebrados acuáticos (alrededor del 80 %) corresponden a grandes grupos de artrópodos, y dentro de estos los insectos, y en especial sus formas larvianas son los más abundantes (Rosemberg & Resh, 1993).

Para la ejecución del muestreo se determinan de acuerdo al objetivo planteado, con un procedimiento adecuado en la toma, manejo y transporte de las muestras según NCh-ISO 411/6 Of. 98., 411/2 Of. 96, 411/3 Of. 96.

Se reúne toda la información que aporte a un conocimiento lo más actualizado de la zona tales como: líneas base de datos ambientales que contengan datos físicos, químicos, biológicos y de los diferentes usos del agua. También información de aspectos del clima, suelo, geología, etc. Una de las estaciones determinadas debe corresponder a la estación de referencia, ubicada en un hábitat no perturbado, representativo de la zona, con el fin de poder estimar el impacto de la contaminación y poder realizar comparaciones río arriba y río abajo antes y después de la perturbación

De cada lugar de muestreo se elabora una ficha denominada "protocolo de campo" con datos de terreno básicos de la localidad, tipo de macrohábitat y microhábitat y medidas de variables físicas y químicas tomadas en situ, (Jáimez-Cuellar, 2002; Roldán, 2003)

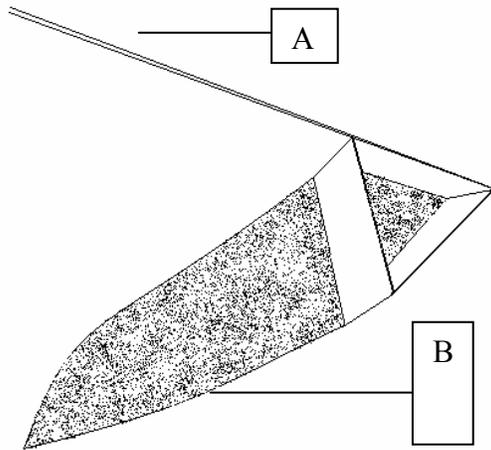
(*) M. XIMENA MOLINA PAREDES. Lab. Bioensayo, CENMA; Fac. Ciencias, U de Chile.

Para la recolección de la biota propiamente tal, se miden con una huincha 25 mt paralelo al río, dentro del cual al azar se determina un transecto perpendicular a la línea de ribera donde se extraerán las réplicas definidas en el diseño del muestreo (ver capítulo 4:4). Es fundamental recolectar la mayor diversidad de organismos en los diferentes habitats, sustrato de fondo (bolones, arena, vegetación, etc), macrófitas, sustratos artificiales en un área y período de tiempo lo suficientemente representativo.

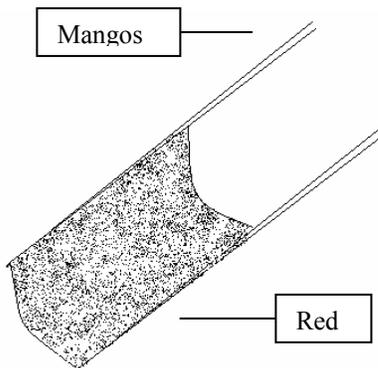
Hay métodos de recolección cualitativos y cuantitativos que dependerán de varios factores entre los más relevantes cabe citar a: profundidad, flujo, propiedades físicas y químicas del sustrato y tipo de hábitat. Esto con el objeto de seleccionar redes de abertura de malla adecuada para una colecta representativa (ISO 7828; ISO 8265). Para un correcto muestreo se sugiere llevar a cabo primero un muestreo cualitativo, lo que entrega un conocimiento de la riqueza y posteriormente realizar un muestreo cuantitativo. Las mediciones registradas deben reflejar atributos comunitarios, tales como por ejemplo riqueza de taxa y estructura trófica (Karr, 1991; margalef 1983; Parra *et al* 1999)

Tipo de red para un muestreo Cualitativo:

Red tipo D: es recomendable para hacer un barrido en aguas poco profundas, se adapta a las irregularidades de las orillas, recodos. Se hace un muestreo intensivo de unos 10 m a lo largo de ambas orillas. La red consiste en un mango (de 1,5 a 2 m de longitud) de metal, madera o plástico reforzado (A) y un bastidor que sostiene una red de 200 – 400 mm de ancho, de 200 - 300 mm de altura y de 100 - 200 mm de espaldón (B). La malla debe estar constituida por un material resistente con un tamaño de poro de 300–500 µm. La red va cosida a una lona fuerte y ésta se sujeta firmemente al bastidor.

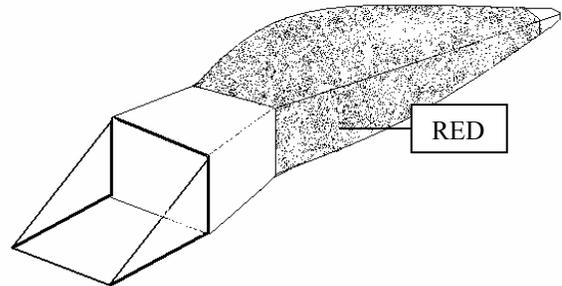


Red de mano o pantalla: red de 1m² de malla de 500 µm sujeta a dos mangos de madera o aluminio. Una persona se coloca en contra de la corriente sujetando la red y otra persona en dirección de la corriente remueve el sustrato con los pies o manos. El material queda atrapado en la malla, se recomienda repetirlo hasta cubrir un área de 6 m²,



Tipo de red para un muestreo Cuantitativo:

Red surber: está constituida por dos marcos de fierro o aluminio cuadrados de 30,5 cm de lado unidos por bisagras, un marco sirve para delimitar la superficie (250 cm²) a muestrear mientras que el otro soporta la red. En posición de funcionamiento los dos marcos están en ángulo recto mediante dos fijaciones, la red debe tener aproximadamente 70 cm de longitud y un cuello de material más pesado como de lona, para protegerla de la abrasión. En el muestreo la red se coloca en el fondo del río contra la corriente, el sustrato pedregoso dentro del área de la red Surber se lava bajo el agua de manera que los organismos arrastrados sean atrapados en la malla y se debe remover el sustrato con el pie para liberar la biota presente.



El material recolectado se limpia lo mejor posible y se vierte en un frasco, dejándolo inmerso en fijador alcohol al 70 % o formalina al 10 %. El frasco debe ser etiquetado con el lugar de recolección, fecha, recolector, número de la muestra. En el laboratorio la muestra se limpia y se separan los organismos para su identificación (Hauer & Lamberti, 1996).

Se debe tener cuidado de manipular con pinzas y cuidadosamente las muestra para no romper estructura de validez taxonómica.

Ver anexo 1: Guía de identificación de macroinvertebrados Bentónicos de la zona central de Chile

Ver anexo 2: Uso de índices bióticas para determinación del agua

Referencias

INN, 1996. Norma Chilena oficial NCh-ISO 411/2 Of. 96. Calidad del agua-Muestreo-Parte 2: Guía sobre técnicas de muestreo continentales superficiales.

INN, 1996. Norma Chilena oficial NCh 411/3. Of. 96. Calidad del agua-Muestreo-Parte 3: Guía sobre la preservación y manejo de las muestras.

INN, 1998. Norma Chilena oficial NCh-ISO 411/6. Of. 98. Calidad del Agua, Muestreo Parte 6: Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua.

ISO 7828: 1985. "Water quality – Methods of biological sampling – Guidance on handnet sampling of aquatic benthic macro-invertebrates".

ISO 8265:1988. "Water quality – Design and use of quantitative samplers for benthic macro-invertebrates on stony substrata in shallow freshwaters".

Jáimez-Cuéllar P., S.Vivas, N.Bonada, S. Robles, A. Mellado, M.Alvarez, J.Avilés, J. Casa, M.Ortega, I.Pardo, N.Pratt, M.Rieradewall, C.E.Sáinz-Cantero, A. Sanchez-Ortega, M.L.Suárez, M.Toro, M.R.Vidal-Abarca, C.Zamora-Muñoz & J.Alba-Tercedor, 2002. Protocolo GUADALMED (PRECE). *Limnética* 21 (3-4):187-204.

Karr J.R., 1991. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management. *Ecol. Appl.* 1: 66-84.

Margalef R. 1983. *Limnología*. Barcelona, España, Ed. Omega. 1010 pp.

Parra O., C. Valdovinos, H. Campos, R. Figueroa, P. Debels & C. Zaror, 1999. Diagnóstico de la calidad del río Damas, X, Región, lineamientos para un plan de prevención y/o descontaminación. Informe final. Centro Eula-Chile, Universidad de Concepción. 1: 1-286.

Roldán, G., 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/col. *Ciencia y tecnología* Editorial Universidad de Antioquia. 170 pp.

Rosemberg D. M. & Resh V. H. 1993. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Chapman & Hall, New York. 488 pp.

2.- Aseguramiento y Control de la Calidad en Laboratorios de Ensayo Medio Ambientales.^(*)

Por calidad de un agua se entenderá al conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para un uso determinado (Wanielista, M. 1997). Esta definición ha dado lugar a diversa normativa, que asegura la calidad suficiente para garantizar determinados usos, pero que no recoge los efectos y consecuencias que la actividad humana tiene sobre las aguas naturales; de este modo también se habla de calidad intrínseca o natural que da cuenta de las condiciones fisicoquímicas y biológicas de un medio natural que no ha experimentado intervención humana.

La determinación de la calidad de recursos hídricos y la gestión de los recursos hídricos, no siempre ha estado regido con criterios técnico-científicos, ni ha sido realizada con la información adecuada; aun cuando se puede encontrar con gran cantidad de datos e información. La pérdida de conocimientos no difundida o no recolectado de manera adecuada repercute en el planteamiento de actuaciones indebidas con la concomitante pérdida de recursos económicos.

De este modo resulta fundamental para establecer modelos de gestión medio ambiental sustentables, el contar con resultados con la exactitud y precisión adecuadas que permitan la correcta toma de decisiones. Lo anterior implica considerar modelos de monitoreo, metodologías de laboratorio, técnicas de muestreo y de análisis de ensayos medio ambientales cuenten con un sistema de aseguramiento y control de la calidad (ISO 2).

Es así que los resultados obtenidos de un laboratorio analítico, con el objeto de establecer la calidad de un recurso hídrico y en establecer planes de gestión, deben ser de calidad.

Aseguramiento de la calidad en un laboratorio de ensayo

^(*)MANUEL A. LEIVA G ^(1,2) y MARLY LÓPEZ C.⁽²⁾ ¹Lab. Química y Referencia Medio Ambiental, CENMA y ² Centro de Química Ambiental (CQA), Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.

Se entenderá como calidad a la totalidad de las características de una entidad que la capacitan para satisfacer necesidades especificadas o implícitas por el cliente o la legislación. La calidad se materializa en los denominados sistemas de calidad que pueden definirse como un conjunto de actividades planeadas y desarrolladas en un ente u organismo para satisfacer los requisitos del cliente o usuario.

En el caso de resultados de mediciones analíticas se entenderá que estos son de calidad si todas las actividades tendientes a controlar, minimizar, trazar, garantizar y asegurar que todos los procesos y actividades del proceso analítica del laboratorio se han, se ejecutan y serán ejecutados dentro de especificaciones técnicas definidas y documentadas. Todo lo anterior involucra la implementación de un sistema de calidad.

Los sistemas de calidad aplicados en los laboratorios de ensayo pueden tener diferentes enfoques que dependen de una amplia variedad de factores, de los cuales el seguimiento de normas y el cumplimiento de la legislación son los más relevantes. Siendo la más frecuentemente usada la guía ISO-17025, titulada "Requisitos Generales para la Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración".

La norma ISO-17025 fue dictadas por Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en ingles) y tiene su base en las normas ISO-9000, que describen genéricamente los elementos marco para gestionar la calidad. Una certificación ISO-9000 establece que la empresa o laboratorio está capacitado para ofrecer productos elaborados o proveer servicios a través de procesos estandarizados minimamente de acuerdo a la calidad exigida internacionalmente. Y en el caso de la ISO-17025 que el laboratorio tiene las competencias y capacidades necesarios para realizar los ensayos analíticos y/o calibraciones para los cuales ha sido acreditado por un organismo competente, que en el caso de Chile es el instituto nacional de normalización (INN).

En el caso de la gestión ambiental y específicamente en la del recurso hídrico resulta fundamental el contar con información adecuada y que se ajuste a los requerimientos de necesidad

de información. Es garantía necesaria entonces, pero no suficiente, para la correcta toma de decisiones en base a resultados analíticos que estos sean obtenidos bajo un sistema de control de la calidad.

Monitoreo de aguas y sistema de la calidad

El monitoreo es definido por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) como: “el proceso programado de probar, medir, registrar y analizar de manera subsecuente de variadas características del agua, a menudo con el objetivo de evaluar la conformidad a los objetivos especificados”. De este modo el proceso de monitoreo y gestión empieza con la definición de las necesidades de información y termina con la utilización de la misma, que no es más que el producto del proceso (ver Figura 1). A continuación se describen los principales pasos y consideraciones que deben realizarse para establecer una adecuada metodología de monitoreo en la calidad de aguas.

a. Necesidades de información

En el inicio de un monitoreo es fundamental establecer la necesidad y/o requerimientos de información, para responder a preguntas tales: (i) ¿Cómo se ajusta la calidad y cantidad de un cuerpo de agua a los requisitos de usuarios y su efecto en los procesos naturales?, (ii) ¿Cuál es la capacidad del cuerpo de agua para asimilar un aumento en las descargas sin causar niveles inaceptables de contaminación?, (iii) ¿Son adecuadas y efectivas las estrategias de gestión en orden a reducir o controlar la contaminación de un cuerpo de agua?, entre otras.

A estas interrogantes de carácter global es necesario sumarle información adicional sobre la normativa para calidad de aguas vigente y sobre las metodologías requeridas para obtener la información, que en el caso de los laboratorios serán las metodologías analíticas.

b. Objetivos del Monitoreo

Toda vez que contamos con las necesidades de información se requiere de plantear objetivos del monitoreo medio ambiental, es decir los propósitos del monitoreo, estos se deben ser

descritos adecuadamente de modo de planificar luego las actividades y establecer que los costos del mismo sean adecuados para el propósito.

Los propósitos del monitoreo, deben ser descritos adecuadamente para planificar las actividades y determinar los costos del mismo. Al plantear los objetivos de un programa de monitoreo pueden estar enfocados a establecer: (i) Escalas espaciales debido a la variabilidad del recurso lo que define el número de estaciones, (ii) Escalas temporales, lo que define la frecuencia, (iii) Contaminantes emitidos al efluente, lo que conlleva a establecer un inventario de emisiones de contaminantes.

Una vez que se establecen los objetivos se debe planificar un plan de llevarlos a cabo y que debe incluir ¿Qué?, ¿Dónde?, ¿Cómo? y ¿Cuándo? se muestrea. Para ello se debe realizar un plan de muestreo.

Desde el punto de vista analítico una vez que se han establecidos los objetivos del monitoreo; es necesario reunir los antecedentes necesarios sobre niveles base de los constituyentes que se desean estudiar y escoger metodologías analíticas adecuadas al problema que se quiere enfrentar. En el caso de que el objetivo sea el cumplimiento de la normativa de calidad del agua vigente del país, los aspectos a considerar son los límites permisibles de cada norma y los límites de detección del laboratorio en el que se efectuaran los análisis.

c. Plan de muestreo

Una muestra puede definirse como una parte representativa del medio que se está investigando, es por ello que la representatividad¹ junto a la correcta elección del tamaño de la muestra², número y frecuencia del muestreo³ e integridad⁴ de la misma resultan ser

1 **Representatividad.** Una muestra posee las mismas características o propiedades que el material en estudio. El grado de semejanza entre las muestras y el material en estudio se determina por las características a estudiar y por las técnicas analíticas usadas.

2 **Tamaño de muestra.** Se debe seleccionar cuidadosamente, con base en las propiedades físicas de la matriz y los requerimientos y/o limitaciones del muestreo y las técnicas de análisis.

3 **Número y/o frecuencia del sub-muestreo.** Estas consideraciones deben basarse en el tipo de información estadística que se desea y en la naturaleza del material a coleccionar.

relevantes al momento de establecer los criterios y forma de muestrear. De allí que el diseño de un plan de muestro debe considerar todos estos aspectos.

La etapa de muestreo es fundamental en el monitoreo de calidad de aguas dado que esta etapa es donde se pueden cometer los errores mas grandes, mas aun si consideramos que los errores se propagan en los análisis posteriores en el laboratorio. Por ejemplo si no se han definido los puntos de muestreo de manera adecuada y estos resultan no ser representativos por lo que se puede sub estimar o sobrevalorar la calidad del recurso hídrico y por ende se podrían tomar decisiones erróneas en torno al manejo del recurso. De allí que obtener muestras representativas en campo así como conservar su integridad durante los procedimientos analíticos, es fundamental para la generación de datos significativos y de calidad.

En el plan de muestreo las actividades relacionadas con la manipulación de la muestra desde la preparación de los contenedores hasta que la muestra llega al laboratorio. Los procedimientos de muestreo usualmente se encuentran incluidos en protocolos internacionales como las normas recomendadas por la ISO (ISO-5667 de la 1 a la 17⁵)

-
- 4 **Mantenimiento de la integridad de las muestras.** La muestra debe conservar las propiedades de las condiciones originales en el sitio (al tiempo del muestreo), durante la colección, transporte y entrega al laboratorio.
- 5 ISO 5667-1:1980 Sampling. Part 1: Guidance on the design of sampling programmes
 ISO 5667-1:1991 Part 2: Guidance on sampling techniques
 ISO 5667-3:1994 Part 3: Guidance on the preservation and handling of samples
 ISO 5667-4:1987 Part 4: Guidance on sampling from lakes, natural and man-made
 ISO 5667-6:1990 Part 6: Guidance on sampling of rivers and streams
 ISO 5667-10:1992 Part 10: Guidance on sampling of waste waters
 ISO 5667-12:1995 Part 12: Guidance on sampling of bottom sediments
 ISO 5667-13:1997 Part 13: Guidance on sampling of sludges from sewage and water treatment works
 ISO 5667-14:1998 Part 14: Guidance on quality assurance of environmental water sampling and handling
 ISO 5667-15:1999 Part 15: Guidance on preservation and handling of sludge and sediment samples
 ISO 5667-16:1998 Part 16: Guidance on biotesting of samples
 ISO 5667-17:2000 Part 17: Guidance on sampling of suspended sediments

La toma de muestras debe ser necesariamente un proceso planificado, detallado y escrito. Al respecto la Norma Chilena NCh-ISO 17025: 2005 que establece los requisitos generales para la competencia en la realización de ensayos y calibraciones, señala que los laboratorios que efectúen la toma de muestras deben tener planes y procedimientos para el muestreo. Más específicamente la Norma Chilena NCh 411/10 Of. 2005, establece los procedimientos necesarios para llevar a cabo la toma de muestras de aguas residuales.

Una vez desarrollado el plan de muestreo y aprobado, teniendo en consideración aspectos técnicos y económicos, se procede a la toma de muestras y su posterior análisis en el laboratorio de ensayo.

d. Mediciones en el laboratorio

Como hemos mencionado, un rol principal de un laboratorio de ensayos es proveer los resultados que permitan caracterizar la composición y naturaleza química de una muestra, tanto desde un punto de vista cualitativo como cuantitativo, con la calidad requerida.

Las medidas químicas son obtenidas a partir de sucesivos pasos, que podemos llamar proceso analítico, que en general consisten en un conjunto de procedimientos realizados para solucionar un determinado problema analítico o responder a necesidades de información, es decir se debe ajustar a las necesidades de información.

De este modo es fundamental preguntarse antes de iniciar un monitoreo ¿Cuáles son las técnicas analíticas disponibles que permitan responder a los objetivos del monitoreo?. De allí que el requerimiento fundamental de una técnica de medición es que sea apropiada para el propósito (APHA 1998).

La confiabilidad de las mediciones se establece mediante medidas de control que permitan garantizar la calidad de los resultados analíticos entregados por un laboratorio. Es así que se plantea para ello: (i) Verificación del método antes de analizar las muestras reales (uso de materiales de referencia), (ii) Determinación del Limite de detección, cuantificación y intervalo de aplicación del método; (iii) Inserción de muestras de control de calidad en

cada grupo de muestras (blancos, materiales de referencia, duplicados, muestras spike, etc.); (iv) Uso de Cartas Control y (v) Participación en programa de ensayos de aptitud.

En general, de la efectividad de las medidas de control dependerá en gran medida la validez de los resultados informados por un laboratorio de ensayos. Es por ello que los datos obtenidos de un laboratorio deben estar sustentados en un programa adecuado de control y aseguramiento (QA/QC, por sus siglas en inglés).

El programa de QA/QC establece criterios de calidad para las variables analizadas para cada parámetro, considerando las etapas previas al análisis hasta la toma de muestras.

Validación de metodologías de ensayo

La validación de un ensayo o metodología analítica, en concordancia con la norma ISO 9000 (ISO 9000:2000) se define como: “La confirmación por examen y el suministro de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos particulares para una utilización o aplicación específica prevista”.

La validación de un método de ensayo es un requisito primordial para obtener resultados técnicamente válidos, exactos y confiables. La validación del método es necesaria ya que permite conocer los parámetros de desempeño de un método y proporcionar un mayor grado de confianza y seguridad en los resultados que se obtienen al aplicarlo.

El laboratorio debe demostrar en el proceso de validación que se ha establecido las siguientes consideraciones: (i) Las tolerancias requeridas de todas las mediciones realizadas dentro del método; (ii) Las formas de determinación del mensurando, incluyendo su especificación; (iii) El efecto de las posibles interferencias se ha investigado ampliamente y se ha cuantificado; (iv) Una identificación de las fuentes significativas de error y los medios adecuados de controlarlos; (v) Un estimado de la incertidumbre de la medición, siempre que sea posible.

De este modo un estudio de validación efectuado por un laboratorio debiera considerar el establecimiento de Límites de Detección (LD) y de Cuantificación (LC) considerando los efectos de la matriz para las metodologías empleadas. Es importante mencionar que la

detección de un constituyente depende de la interacción de varios factores entre los que se incluyen: el método, la instrumentación, el analista y la naturaleza de la matriz.

e. Análisis de datos y Reporte de Resultados

Es importante señalar que resultados provenientes de un laboratorio corresponden a información con la que se obtendrán conclusiones y se tomarán decisiones importantes relacionadas por ejemplo con la salud de las personas o el medio ambiente.

De esta forma una vez obtenidos los resultados analíticos, se debe considerar el informar los datos de manera adecuada, con la precisión y exactitud requerida.

Los resultados deben considerar las unidades adecuadas en un formato que permita su fácil uso, actual y futuro, y su almacenamiento y transmisión. Estos datos deben ser almacenados en planillas de cálculo o una base de datos.

Antes de iniciar el análisis de los datos recibidos del campo y del laboratorio, todos los datos originales deben ser verificados y cotejados. Esta actividad empieza revisando todos los formularios con estos datos para ubicar errores o valores faltantes. Luego deberá revisarse los datos para detectar valores atípicos e inferir si estos corresponden a errores (datos inexactos) o anomalías (datos verdaderos que representan valores atípicos para el parámetro medido). Una vez que todos los datos han sido verificados y aceptados, es posible producir gráficos para mostrar cambios espaciales y temporales y estadísticos para una mayor evaluación.

La NCh-ISO 17025 señala requerimientos específicos para informar los resultados, así como las actividades tendientes al control de calidad y el aseguramiento de la calidad de los resultados de ensayo.

f. Utilización de la información.

Finalmente, los resultados analíticos son tomados en cuenta para determinar la calidad del recurso hídrico y establecer planes de manejo del mismo. Si la información no respondiera a las necesidades de información se debe iniciar nuevamente el ciclo realizando nuevos requerimientos. De allí que resulta importante

definir adecuadamente las etapas previas de modo de evitar pérdida de recursos innecesarios.

Aseguramiento y control de la calidad

En el ciclo antes propuesto, para la gestión y planificación de recursos hídricos se requiere contar con mecanismos que permitan asegurar y controlar la calidad de la información obtenida, en el plan de muestreo, la toma de muestras y trabajo de campo, las mediciones en el laboratorio y en el análisis y reporte de resultados, como se presenta en la figura 2.

Del análisis de la figura 2, es posible ver que para obtener resultados confiables la calidad o el aseguramiento de la calidad debe estar presente en todas las etapas del proceso analítico, lo que debe quedar plasmado en un plan de muestreo apropiado y acorde con los objetivos planteados en los distintos programas de monitoreo de calidad de aguas.

Por su parte es necesario también considerar las propiedades analíticas (LD y LC, principalmente) de los métodos de ensayo a utilizar durante la etapa de planificación de un monitoreo, de modo de escoger metodologías de ensayo apropiadas a las necesidades de información de monitoreo de calidad de aguas y programas de vigilancia. En este punto es importante recordar que es la metodología analítica la que se ajusta a las necesidades de información y no viceversa.

La aparición de nuevas normativas para calidad de agua hace necesario también un estudio sobre la capacidad de los laboratorios nacionales para responder a las nuevas exigencias. El uso de métodos normalizados o internacionales no garantizan un adecuado desempeño por sí mismos, sino que es necesario efectuar estudios de validación antes de aplicarlos a muestras reales. Lo anterior debe considerar los límites máximos permisibles para los distintos parámetros normativos de modo de que el método empleado satisfaga los requerimientos regulatorios.

Referencias

APHA 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* 20 th edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association

(AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), Washington, D.C.

NCh-ISO 17025. c 2005 . requisitos para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. INN-Chile.

NCh 411/10 Of. 2005. Calidad del agua – Muestreo – Parte 10: Guía para el muestreo de Aguas. INN-Chile.

ISO 2. Quality management and Quality System. Elements for laboratories - Guidelines.

ISO 9000:2000 Quality management systems. Fundamentals and vocabulary.

ISO/IEC 17025, "General Requirements for the technical competence of testing laboratories"

Winpenny, James 1994"Managing water as economic resource Development Policy Studies Ed. John Farrington and Tony Killick for the Overseas Development Institute , London and New York, pp. 133,

Wanielista, M. 1997.- Hydrology and Water Quality Control 2ª edición. Ed. Wiley.

Figura 1: Principales elementos del monitoreo medio ambiental

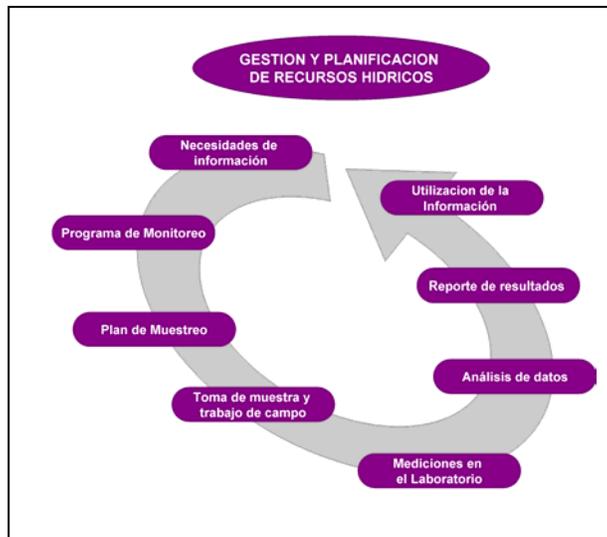


Figura 2: Principales elementos del monitoreo medio ambiental que requieren metodologías de control y aseguramiento de la calidad.



3.- Bioindicadores (*)

El proceso de elaboración de la “Norma de Calidad para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales” contempla en el Artículo N° 12 la incorporación de bioensayos e indicadores biológicos como herramienta de aproximación para determinar el impacto producido por situaciones de emergencia relacionadas con la protección de comunidades acuáticas, usos prioritarios y/o el nivel trófico de los lagos. El uso de bioindicadores debería simplificar el conocimiento de la condición del río a los gestores y los actores involucrados en la comunidad respectiva.

La respuesta de los organismos permite detectar condiciones ambientales específicas así se han incorporado criterios biológicos que son “valores numéricos o expresiones narrativas que describen la integridad biológica de la estructura y función de las comunidades de aguas destinadas a diferentes usos (USEPA_(a), 2003).

En 1909 se sentaron las bases para el sistema saprobio en Alemania lo que se extendió a otros países europeos (Roldán, 2003), en la década de los sesenta comenzó a discutirse el concepto de diversidad biológica basado en índices matemáticos derivados de la teoría de la información (Shannon y Weaver, 1963; Simpson, 1949; Margalef, 1951). Hynes (1959), consideró a los macroinvertebrados como indicadores de calidad del agua., en 1984 se presentaron 18 índices de diversidad 19 índices bióticos y 5 índices de similitud, Pratt *et al* (1986) los estudió para España, en 1991 Karr incorporó el concepto de Integridad biológica IBI, herramienta multiparamétrica que basa la evaluación de los sistemas fluviales en la comunidad de peces y posteriormente se crea el sistema computarizado River invertebrate prediction and classification system (RIPACS), como un sistema aplicado

(*) M. XIMENA MOLINA PAREDES e IRMA VILA PINTO. Lab. Bioensayo, CENMA; Fac. Ciencias, Universidad de Chile. Lab. Limnología, Fac. Ciencias, Universidad de Chile.

sólo a nivel local. Barbour *et al*, (1995), presentaron 63 tipos de mediciones para ecosistemas acuáticos los que corresponden a medidas de riqueza, índices de diversidad, índices bióticos y funcionales, estos últimos consideran la función del organismo en la comunidad (colectores, filtradores, trituradores, entre otros) y también índices combinados que incorporan a la comunidad de macroinvertebrados junto al puntaje de su condición biológica. Resh *et al*, 1995 desarrolló métodos rápidos de evaluación de calidad de agua usando macroinvertebrados en Maryland (USA), Alba-Tercedor en 1996 usó también macroinvertebrados con el mismo fin adaptando el BMWP' en la península ibérica.

Lorenz (1997) desarrolló un sistema en base a bioindicación para el río Rhin basado en conceptos teóricos que describen los ríos naturales, considerando aspectos de zonación, hidráulica, espiral de nutrientes, jerarquía de tributarios y concepto de río continuo. La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE originó un cambio en la gestión del agua, e introdujo el concepto de “estado ecológico” como objetivo a conseguir para todas las masas de agua antes del año 2016. El estado ecológico de las aguas, es un indicador de la salud de los ecosistemas acuáticos evaluados en tres ejes: biótico, fisicoquímico e hidromorfológico, lo que se relaciona con la escala de cuenca hidrográfica.

La USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) sugiere la aplicabilidad de los indicadores ambientales desde los años setenta en adelante, para dar información de la estructura y función de las comunidades biológicas presentes y/o sus cambios históricos, incorporando la salud de los sistemas biológicos a los programas en vías a restaurar y mantener la integridad de las aguas esto ya se ha usado para aguas destinadas a regadío (Helawell, 1989).

En general *el concepto de especie indicadora* ampliamente aceptado, está definido como: “*especie (o conjunto de especies) que tienen un particular requerimiento en relación de variables físicas o químicas, tales que los cambios en la*

presencia/ausencia, número, morfología, fisiología o de comportamiento de esas especies indican que las variables físicas o químicas consideradas, están por fuera de los límites acostumbrados o normales” (Rosemberg y Resh, 1993). (Tabla 1)

Características de un buen indicador:

La tolerancia o nivel de respuesta de los organismos que componen el bentos, difiere según el tipo de contaminante a que han sido expuestos, lo que determina que ciertos organismos sean utilizados como bioindicadores (Figuroa, 2003), permitiendo estimar el efecto de las intervenciones antrópicas en los cuerpos de agua (Norris y Hawkins, 2000).

El uso de bioindicadores presenta ciertas ventajas entre las cuales están:

- 1.- son de validez taxonómica y de fácil reconocimiento.
- 2.- presentan baja variabilidad genética y ecológica.
- 3.- son de tamaño corporal grande y movilidad limitada
- 4.- es posible realizar integraciones espaciales y temporales.
- 5.- son útiles y sensibles a la variabilidad ambiental.
- 6.- sus patrones de distribución se pueden estimar cuantitativamente.
- 7.- se obtiene información del estado del hábitat y los datos pueden ser transformados a expresiones numéricas.
- 8.- incorporan información biológica que pueden proveer información más robusta que otros descriptores para cierto tipo de contaminación.
- 9.- es posible realizar estudios de bioacumulación en especial en los grupos de alto nivel de organización biológica.
- 10.- pueden dar conocimiento de las contaminaciones crónicas y puntuales, sin embargo a veces tienen baja sensibilidad temporal y dificultades de cuantificación y estandarización (De Zwart, 1995).
- 11.- algunos poseen ciclo de vida manejable.

La mayoría de los organismos acuáticos son potencialmente posibles de utilizar para estos estudios, pero en la literatura se señala que los más indicados son los macroinvertebrados bentónicos, entre los cuales se citan a los moluscos, crustáceos, anélidos e insectos, entre otros (Hellawell, 1989).

Un buen indicador de la calidad del agua, es cuando el organismo se encuentra invariablemente en un ecosistema de características definidas y su población es porcentualmente superior, o ligeramente similar, al resto de los organismos con los que comparte el hábitat. Los insectos acuáticos, al ser uno de los componentes más abundantes de la comunidad bentónica, serían adecuados para realizar monitoreos biológicos, su tolerancia a diferentes calidades del agua ha sido ampliamente estudiada sobre todo en el hemisferio norte (Resh *et al.* 1996).

En la Unión Europea 11 países ya utilizan los macroinvertebrados, la mayoría a nivel de familia, son considerados buenos indicadores por sus características tales como (Rosemberg y Resh, 1993 y 1996; Roldán, 2003):

- 1.- son organismos abundantes.
- 2.- son ubicuos de amplia distribución y fáciles de recolectar.
- 3.- por lo general son sedentarios lo que facilita el poder reflejar condiciones locales.
- 4.- es posible su identificación taxonómica.
- 5.- son de distribución cosmopolita o distribución que involucre una analogía ecológica, así se distribuyen en forma similar en zonas altas, medias y bajas de diferentes ríos.
- 6.- son longevos, acumulando los efectos de la contaminación a lo largo del tiempo.
- 7.- sensibles a perturbaciones.
- 8.- presentan largos ciclos de vida.
- 9.- se pueden cultivar en laboratorio y poseen baja variabilidad genética.
- 10.- presentan una alta diversidad de especies.
- 11.- en algunos países se cuenta con muestreos y análisis bien desarrollados, la taxonomía de muchos grupos es bien conocida y las

respuestas de varias especies a distintos contaminantes están bien documentada.

El uso de la composición de las comunidades de macroinvertebrados en los países de la Unión Europea, les ha permitido un conocimiento del estado ecológico de sus ríos y lagos, lo cual les sirvió de base para elaborar planes de manejo para sus ríos en los últimos veinte años.

Para usar a estos organismos en la evaluación de la calidad del agua, se han usado distintos niveles de precisión. En Alemania, el sistema de evaluación se ha basado en el método saprobio que usa el nivel taxonómico de especie. En Bélgica, Francia, Gran Bretaña, Italia, Portugal, Dinamarca, Holanda e Irlanda, se han adoptado sistemas que llegan al nivel de orden, familia y en algunos casos a género. Una de las ventajas del método, es el poder realizar una evaluación rápida del ecosistema a bajo costo (Roldán, 2003), en general en Latinoamérica no es posible un sistema de evaluación refinado por el desconocimiento taxonómico de la fauna (exceptuando a Colombia), pero es posible comenzar a construir los primeros mapas de calidad del agua por regiones, para elaborar planes de recuperación de ecosistemas acuáticos deteriorados. En Colombia hay un mayor conocimiento de esta metodología porque se aplica hace unos 25 años, han comprobado que bajo el criterio cualitativo de ausencia y presencia a nivel de familia ha sido suficiente para conocer el estado ecológico del sistema (Roldán, com.pers).

Los hábitats acuáticos de los macroinvertebrados son muy variados y a cada uno de ellos corresponde una comunidad determinada. Así por ejemplo, unos viven adheridos a la superficie de las rocas, pequeñas piedras, troncos sumergidos o restos de vegetación; otros habitan en las orillas, adheridos a la vegetación emergente o sumergida. Unos viven sobre la superficie del agua, en tanto que otros nadan en ella como los peces. Otros se entierran en sustratos arenosos, fangosos o pedregosos. Unos prefieren corrientes rápidas, en tanto que otros lo hacen

en aguas quietas o en remansos de los ríos. La fauna acuática que se encuentra en remansos es muy diferente a la de las corrientes, así como lo es la de fondos lodosos, pedregosos o en zonas ribereñas. Por ello es básico que cuando se realicen estudios para evaluar la calidad del agua, estos deben considerar todos los posibles hábitats presentes en el área de muestreo (Roldán, 2003).

Los macroinvertebrados bentónicos varían en su composición específica y abundancia con la materia orgánica presente, la que está relacionada con la productividad (Valdovinos & Figueroa, 2000), a mayor enriquecimiento orgánico disminuyen las comunidades características de aguas limpias y desaparecen taxa intolerantes (Rosenberg y Resh, 1993).

El indicador biológico es un detector, que refleja la existencia de condiciones que son complejas de interpretar resultante de una multitud de factores difíciles de medir directamente. Como se puede utilizar más de uno en la interpretación del proceso, todos ellos se combinan dentro de un índice simple llamado “*índice biológico*”.

Índices biológicos:

Los más usados para establecer índices dentro de los macroinvertebrados bentónicos son los insectos, pues se afectan por perturbaciones en hábitats acuáticos diferentes, tienen una amplia variedad de respuestas al estrés ambiental, son sedentarios, permiten una evaluación efectiva espacial de las perturbaciones (Rosenberg y Resh, 1993).

Es importante tener presente que el uso de índices es a nivel local, al aplicar índices de otras regiones estas deben ser de las mismas características locales, lo cual es muy poco factible. Hay que considerar la condición de sitio de referencia, uso de cuenca, espacio, evaluación del hábitat. Con estos aspectos presentes en Europa como en otros lugares,

han demostrado que para monitoreos rutinarios de los ríos, los métodos biológicos basados en los macroinvertebrados son los más apropiados. Se recomienda, por tanto, utilizar estos métodos cuando las circunstancias lo permitan (Roldán, 2003).

Los índices son una de las formas numéricas biológicas que nos entrega información y criterios para la evaluación de la contaminación basado en la Integridad biológica. Metcalfe (1989) distingue tres enfoques principales para evaluar la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos a la contaminación. Estos son: el de diversidad, el saprobio y el biótico (Welch, 1992; Johnson *et al.*, 1993).

Enfoque de la diversidad

Este enfoque considera tres componentes fundamentales de la comunidad: riqueza, uniformidad y abundancia. La comunidad natural sin perturbación presenta gran diversidad de especies y bajo número de individuos por especie; o bajo número de especies y muchos individuos de estas especies. A pesar de la claridad del concepto sus resultados pueden variar dependiendo del método de muestreo, naturaleza del sustrato, época del año. Una comunidad bajo perturbación es esperable que presente bajo número de especies con gran número de individuos por especie. Se han desarrollado varios índices para medir la calidad del agua, siendo uno de los más conocidos el de Shannon Weaver (1949); el de Simpson (1949) y el de Margalef (1951).

Shannon Wiener (Shannon & Weaver, 1963), basado en la teoría de la información, es el más usado para medir la entomofauna, sin embargo es poco sensible a los cambios en el número de especies raras en la comunidad (Segnini S. 1981). Mientras más uniforme es la distribución entre especies mayor es su valor.

Índice de Shannon-Wiener

$$H' = -\sum_{i=1}^S (ni/n) \ln (ni/n)$$

Donde:

H' = índice de diversidad
 ni = número de individuos por especie
 n = número total de individuos
 \ln = logaritmo natural

Simpson (1949), deriva de la teoría probabilidades, es sensible a los cambios en las abundancias de las especies mas frecuentes. Es adecuado para muestras pequeñas, pero hay dependencia de las especies dominantes.

$$I = \frac{\sum ni (ni-1)}{N (N-1)}$$

Donde:

ni = número de individuos por especie
 N = número total de individuos de todas las especies.

Margalef (1951), índice de riqueza específica es menos útil que los dos índices anteriores ya que no incorpora la equitatividad (Hurlbert 1971).

$$D = \frac{(S-1)}{\ln N}$$

Donde:

S = número de especies
 N = número total de individuos
 \ln = logaritmo natural.

Enfoque saprobio

Este se incorporó desde 1908 por Kolkwitz y Marsson, en Alemania. El término saprobio se refiere a la capacidad que tienen ciertos organismos de vivir en determinados niveles de contaminación, se distinguieron tres

zonas: Polisapróbica, Mesosapróbica y la Oligosapróbica. Se considera desde los hongos-algas hasta vertebrados, también aspectos físicos y químicos tales como DBO₅, amonio y oxígeno disuelto. Puede ser aplicado a todo tipo de ríos, pero se requiere nivel de especie lo que no siempre es disponible en el neotrópico, por el escaso conocimiento taxonómico disponible.

Este método ha sido perfeccionado por varios investigadores, incorporando una mayor cantidad de biota y criterios químicos lo que significó una mayor precisión. Actualmente se usa en Alemania donde cada cinco años se actualizan los mapas de calidad de agua y está a la IAWA (Asociación de los Estados para el trabajo sobre el Agua).

Fórmula:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n Si \times Ai \times Gi}{\sum_{i=1}^n Ai \times Gi}$$

Donde:

S = índice saprobico
i = número de orden de los taxones
Si = valor de saprobiedad de los taxones
A = abundancia de los taxones
G = peso indicativo de los taxones
n = número de taxones

Este índice va desde valores 1 a 4.

Enfoque biótico

Abarca los aspectos de saprobiedad, combinando diversidad de especies con información cualitativa sobre la sensibilidad ecológica de taxones de individuos, en una expresión numérica. En la mayoría de los índices se calcula un puntaje basado en la tolerancia de cada taxón de una comunidad de macroinvertebrados y en una medida de su abundancia.

Se han usado distintos niveles de categoría taxonómica para asignar los puntajes de tolerancia. Sin embargo, se sabe que el grado de tolerancia de muchos macroinvertebrados bentónicos difiere dentro de la familia y más aún entre géneros. Los índices bióticos ya se han incorporado en varios países en los monitoreos biológicos, algunos de ellos son: Índice bióticos de Beck (1955); Índice de déficit de especies (Kothé, 1962); Índice de Chutter (1972); Índice de Hilsenhoff (1988); Biological Monitoring Working Party (BMWP).

Índice bióticos de Beck (1955), fue propuesto en Estados Unidos. Consiste en la relación entre grupo de especies, Intolerante y Tolerante a la contaminación. Los valores van de 0 (menos contaminante) a 10 (más contaminante). Se originó en el Trent Biotic Index (TBI) y fue usado por primera vez en los años cincuenta. Una de las desventajas de éste índice, es que la tolerancia varía entre especies, entre familias y entre órdenes y es de tipo cualitativo. Es usado por Organizaciones Monitoreadoras de Ciudadanos en los Estados Unidos, está oficializado por la EPA desde 1990 y se propone extender el uso de este índice a México porque es sencillo de aplicar y de bajo costo (de La Lanza, 2000), a pesar del sesgo que tiene al no considerar la abundancia.

Fórmula:

$$I = 2Si - 2S1$$

Donde:

Si = número de especies intolerantes
S1 = número de especies tolerantes a la contaminación

Índice de déficit de especies (Kothé, 1962). Mide la diferencia porcentual entre el número de especies presentes aguas arriba y aguas abajo del punto de descarga de los contaminantes. Se conoce como "déficit o pérdida de especies", el índice no considera los cambios en las abundancias relativas de especies individuales (Hellawell, 1986).

Fórmula:

$$I = \frac{Su - Sd}{Su} \times 100$$

Donde:

Su = número de especies aguas arriba.

Sd = número de especies después de la descarga.

Índice de Chutter (1972). Se basa en la contaminación orgánica y sus productos de descomposición. Fue desarrollado para ríos de Sudáfrica. El puntaje va del intervalo 0 -1 (limpio) a 10 (contaminado). Excluye a los copépodos y cladóceros porque no se consideran buenos indicadores. Este índice ha sido criticado porque diferentes comunidades pueden dar idénticos resultados.

Índice de Hilsenhoff (1988). Se origina del índice de Chutter (1972) fue modificado por Hilsenhoff 1988, para ser aplicado en ríos de Norteamérica. Requiere de bajo nivel taxonómico (Familia), por lo que se conoce como *Índice biótico de familia*. Es recomendable porque es de bajo costo en términos de tiempo (identificación de insectos) y dinero. Se ha correlacionado con alteraciones antropogénicas (Eaton, 2001), en Chile se ha aplicado en la cuenca del río Damas, X Región (Figuroa, 2003). Sin embargo para la fortaleza de su resultado es necesario una buena información acerca de los macroinvertebrados del lugar, lo que aún en Chile es deficiente ya que falta conocimiento taxonómico de los organismos y estos presentan un marcado endemismo, la mayor información se concentra en la zona Sur de Chile (Arenas, 1995; Valdovinos C., 2001; Valdovinos *et al*, 1993).

Fórmula:

$$IBH = \frac{\sum n_i \cdot a_i}{N}$$

Donde:

n_i = número de individuos del taxón "i".a_i = Valor de tolerancia del taxón "i".

N = número total de individuos de la muestra

Valores de calidad de agua según el grado de sensibilidad basado en la categoría de Familia de acuerdo al grado de contaminación orgánica. Los valores van de 0 a 10 (Hauer & Lamberte, 1996).

| Rango del Índice Biótico de Familia (IBF) | Calidad de agua |
|---|-------------------|
| 0 - 3,75 | Excelente |
| 3,76 - 4,25 | Muy buena |
| 4,26 - 5,0 | Buena |
| 5,01 - 5,75 | Aceptable |
| 5,76 - 6,5 | Regularmente mala |
| 6,51 - 7,25 | Mala |
| 7,26 - 10 | Muy mala |

Con el dato del IBF y el mapa de la cuenca se pueden construir mapas de calidad de agua, donde cada color corresponde a un rango del IBF, en el mapa corresponde al segmento inmediatamente superior al punto donde se determinó el índice (Anexo, 2).

Biological Monitoring Working Party (BMWP). Se estableció en Inglaterra en 1970, es un método cualitativo (presencia/ausencia), simple, rápido y requiere nivel de familia. El puntaje va de 1 a 10 basado en la tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación orgánica. La suma de los puntajes de todas las familias da el puntaje total BMWP. Cuanto mayor es la puntuación final, menor es el grado de contaminación ambiental. Este método ha sido adaptado para la península ibérica denominándose BMWP' y para Colombia el BMWP/Col (Domínguez y Fernández 1998). Basado en este índice se publicó una primera guía la cual fue aplicada en la mayoría de los países neotropicales (Panamá, Venezuela, Norte de Brasil), (Roldán, 1988). También hay uno adaptado a ríos mediterráneos de Chile modificado de Alba-Tercedor, 1996. Se construyen mapas de calidad de aguas, con la necesidad de ajustar estos mapas a las condiciones geológicas, de pendiente, de altura y de sustrato de las

corrientes de cada región (Pratt y Munné, 1999).

Experiencias en la Unión Europea

Se desarrolló la bioindicación en la Unión Europea a partir de la década de los setenta y en especial de los noventa. (Tabla 2).

En Latinoamérica los índices más ampliamente aplicados son los siguientes: BMWP' (Biological Monitoring Working Party) adaptado y modificado a la fauna del sur occidente de Colombia por la Universidad del Valle (Zúñiga de Cardoso, 1997 en Domínguez y Fernández 1998), BMWP (Biological Monitoring Working Party) de Armitage *et al.*, (1983) utilizado en el río de Tucumán Argentina, el índice EPT (Ephemeroptera, Plecóptera y Trichoptera) de Carrera & Fierro (2001) aplicado en el río Angosturita en Argentina. Específicamente en Chile se ha usado el Índice Biótico de Familia en la Cuenca del estero Peu Peu, Sur de Chile (Figueroa, 2003), es necesario robustecer este tipo de metodología realizando más estudios cuantitativos y bajar los niveles de resolución taxonómica por ejemplo a nivel de género.

Para poder recomendar el uso de macroinvertebrados para biomonitoreo se han tomado en cuenta doce criterios considerando fundamentos teóricos, su operatividad y su funcionamiento. Es importante que posea una capacidad predictiva que tenga potencialidad para evaluar funciones ecológicas, el poder discriminar impactos por actividades antropogénicas, evaluar el costo en el muestreo e identificación de los organismos, la posibilidad de poder implementarlos en experimentos estandarizados, la escala a la cual pueden ser aplicables y su confiabilidad (Bonada, *et al.*, 2006). Un único índice no cumple todos estos criterios, por lo que se tienen que establecer las prioridades para poder desarrollar lo que más conviene en un programa de biomonitoreo adecuado a la realidad de cada país.

Referencias

Alba-Tercedor, J. 1996. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA). Almería 2:203-213.

Arenas, J.N. 1995. Composición y distribución del macrozoobentos del curso principal del río Bio-Bío, Chile. Medio Ambiente 12 (2): 39-50.

Armitage P. D., Noss D., Wright J.F. & Furse M.T. 1983. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running water sites. Water Research 17: 333 – 347.

Barbour, M.T., J. Gerritsen., B. D. Snyder & J.B. Stribling. 1995. Revision to rapid bioassessment protocols for use in stream and rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish. EPA 841-D97-002.

Beck, W.M. 1955. Suggested method for reporting biota data. Sewagw Ind. Wastes, 27:1193-1197.

Bonada Núria, Narcís Prat, Vincent H. Resh, & Bernhard Statzner, 2006. Developments in Aquatic Insect Biomonitoring: A Comparative Analysis of Recent Approaches. Annu. Rev. Entomol. 2006. 51:495–523.

Carrera C. & Fierro K. 2001. Manual de monitoreo: Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. Editorial Eco Ciencia. Quito, Ecuador. 67 pp.

Chutter, F. M. 1972. An empirical biotic index of the quality of water in South African streams and rivers. Water Research. 6: 19- 30.

De la Lanza E. G., Hernández S. & Carvajal J. L. 2000. Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores). Plaza y Valdés Editores. Primera edición. Instituto de Biología, UNAM. SEMARNAP. México.

De Zwart, D. 1995. Monitoring water quality in the Future, Vol. 3: Biomonitoring. The Netherlands, Bilthoven. 83 pp.

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de las aguas.

Domínguez E. & Fernández H. 1998. Calidad de los ríos de la Cuenca del Salí (Tucumán Argentina) medida por un índice biótico. 38 pp.

Eaton, L. 2001. Development and validation of biocriteria using benthic macroinvertebrates for North Carolina estuarine waters. Marine Pollution Bulletin 42: 23-30.

Figueroa R., Valdovinos C., Araya E. & Parra O. 2003. Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad del agua de ríos del sur de Chile. Rev. Chil. Hist. Nat. 76 (2): 275-285.

Hauer F. R. & Lamberti, G. A. 1996. Methods in Stream Ecology. Academic Press. United States of America. 674 pp.

Hellawell, J., 1989. Biological indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier Applied Science. New York, 546 pp.

Hellawell, J. M. 1986. Biological indicators of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier Applied Science. New York. 546 pp.

Hilsenhoff, W. 1988. Rapid field assessment of organic pollution with a family level biotic index. Journal of the North American Benthological Society 7: 65-68.

Hynes, H. B.N. 1970. The Ecology of running Waters. Toronto, University of Toronto Press. 555 pp.

Karr, J. R. 1991. Biological integrity: a long neglected aspect of water resource management. Ecol. Appl. 1 (1): 66-84.

Kothé, P. 1962. Der Artenfehlbetrag, ein einfaches Güterkriterium und seine Anwendung bei biologischen Vorfluteruntersuchungen. Dt. Gewässerkundl. 6: 60-65.

Kolkwitz R. & Marsson W.A. 1909. Okologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologische Gewässerbeuteulung. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie 2: 126-152.

Lorenz, C. M., G.M. van Dijk., A.G.M. van Hattum & W.P. Cofino. 1997. Concepts in river ecology: implications for indicator development. Regul. Rivers. Res. Manage. 13: 501-516.

Margalef, R. 1951. Diversidad de especies en las comunidades naturales. P. Inst. Biol. Appl. 9: 15-27.

Metcalf, J. L. 1989. Biological water quality assessment of running waters based on macroinvertebrate communities: history and present status I. Europe. Environ. Pollut. 60:101-139.

Norris R. H. & C. P. Hawkins. 2000. Monitoring river health. Hidrobiología 435: 5-17.

Pratt, N., I. Muñoz, G. González & X. Mollet. 1986. Comparación crítica de dos índices de calidad de aguas: ISQA y Bil. Tecnología del Agua. 31: 33-49.

Pratt, N., & A. Muné. 1999. Delimitación de regiones ecológicas de la cuenca del Ebro. Barcelona. Universidad de Barcelona, Depto. Ecología.

Roldán, G. 2003. Bioindicación de la Calidad del agua en Colombia: Una propuesta para el uso del método BMWP/col. Editorial Universidad de Antioquia. 170 pp.

Roldán, G. 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Centro de Investigaciones, CIEN.

Resh, V.H., H. N. Richard & M.T. Barbour. 1995. Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using macroinvertebrates. *Aust. J. Ecol.* 20:108-121.

Resh V.H., Myers M. M. & Hannaford M. J. 1996. Macroinvertebrates as Biotic Indicators of Environmental Quality. In: Hauer, F.R. & G.A. Lamberti. Eds. *Methods in stream ecology.* Academic Press. San Diego. 674 pp.

Rosemberg D. M. & Resh V. H. 1993. *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates.* Chapman & Hall, New York. 488 pp.

Rosemberg D.M. & Resh V.H. 1996. Use of aquatic insects in biomonitoring. In: *Aquatic Insects of North American,* Ed. By R. W. Merritt & K. W. Cummins. Third Ed. Dubuque, Iowa, Kendal/Hunt Publishing. Company.

Shannon C. E. & W. Weaver. 1963. *The mathematical theory of communication.* The University of Illinois Press, Urbana.

Segnini S. 1981. Medición de la diversidad en una comunidad de insectos. *Biol Entomol. Venez. N.S.* 10 (1): 105:113.

Simpson, E. N. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163: 688.

Valdovinos C. & Figueroa R 2000. Benthic community metabolism and trophic conditions of four South American lakes. *Hydrobiología* 429:151-156.

Valdovinos, C. 2001. Riparian leaf litter processing by benthic macroinvertebrates in a woodland stream of central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 74: 445- 453.

Valdovinos C., Stuardo J. & Arenas J. 1993. Estructura comunitaria del Macrozoobentos de la zona de transición Epiritrón – Hipo Epiritrón del río Bío Bío. *Monografías científicas. EULA* 12: 217- 247.

Welch E.B., 1992. Ecological effects of wastewater. *Applied limnology and pollutant effects.* 2^a ed. Chapman & Hall. 425 pp.

Páginas web

USEPA_(a)(2003): Bioassessment and Biocriterio.

www.epa.gov/waterscience/biocriteria/glossary.html.

TABLA 1:

Grupo de organismos que pueden ser empleados como indicadores para la calidad del agua: ventajas y desventajas (tomado de Chapman, 1994 en De la Lanza *et al.*, 2000).

| Organismo | Ventaja | Desventaja |
|--|---|--|
| Bacterias | Metodología bien desarrollada; respuesta rápida a cambios incluyendo contaminación; Indicadores de contaminación fecal. Muestreo fácil. | Células no originadas en el punto de muestreo. Poblaciones de rápida recuperación por contaminación intermitente. Se requiere de equipo especial |
| Protozoarios | Valores sapróbicos conocidos. Respuesta rápida a cambios. Muestreo fácil. | Buen conocimiento de taxones. Células no originadas en el punto de muestreo. Las especies también tienden a presentarse en medios naturales. |
| Algas (fitoplancton) | Tolerantes a contaminación. Indicadores usados para eutrofización e incremento de turbiedad. | Experiencia en taxonomía. No muy usado para contaminación severa orgánica o fecal. Algunos grupos presentan problemas de muestreo. |
| Macroinvertebrados (anélidos, crustáceos, insectos, moluscos, nemátodos, poliquetos) | Diversidad de formas y hábitats. Especies sedentarias que indican contaminación en el punto de muestreo. Todas las comunidades responden al cambio. Especies de larga vida, pueden indicar efectos de contaminación en el tiempo. | Dificultades cuantitativas del muestreo. Algunas permanecen sobre el sustrato y otras son transportadas por el movimiento del agua. Es útil conocer de su ciclo de vida. Hay dificultad de identificar algunos grupos. |
| Macrófitas | Especies bentónicas observables e identificables. Buenos indicadores de material suspendido y enriquecimiento de nutrientes. | Falta documentación de la respuesta a la contaminación. Frecuente en contaminación intermitente. Presencia estacional. |
| Peces | Métodos desarrollados. Efecto fisiológico inmediato. Pueden indicar efecto en la cadena alimentaria. Fácil identificación. | Las especies pueden migrar para evitar la contaminación. |

TABLA 2:

Aplicación de los principales métodos de bioindicación para la evaluación de las aguas fluviales en los países de la Unión Europea en base a los macroinvertebrados (Pauw y Hawkes, 1993 en Roldán, 2003).

| País | Método de indicación | Muestreo | Análisis | * Identif | ** Estándar | Rango |
|-------------|---|-----------------------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------|
| Bélgica | Belgian Biotic Index (BBI) | Cualitativo | Cualitativo | O F G | N | 0-10 |
| Dinamarca | Dansk Fauna Index (DFI) | Cualitativo | Cualitativo | F G S | N | 1-4 |
| Francia | Índice Biológico Global (IBG) | Cuantitativo Cualitativo | Cualitativo | F | N | 0-20 |
| Alemania | Biological Effective Organic Load/Saprobic (BEOL/S) | Cualitativo | Cuantitativo | S | N | 0-100/1-4 |
| Grecia | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Irlanda | Quality Value (Q-rating) | Cualitativo | Cualitativo | F G S | N | 0-5 |
| Italia | Extended Biotic Index (EBI) | Cualitativo | Cualitativo | O F G | R | 0-14 |
| Luxemburgo | Índice Biótico (IB) | Cualitativo | Cualitativo | O F | N | 0-10 |
| Holanda | Quality Index (K 135) | Cualitativo | Cualitativo | F G S | R | 100-500 |
| Portugal | Belgian Biotic Index (BBI) | Cualitativo | Cualitativo | O F G | - | 0-10 |
| España | Biological Monitoring Working Party (BMWP') | Cualitativo | Cualitativo | F | - | 0 ->150 |
| Reino Unido | Biological Monitoring Working Party/Average Score per Taxon (BMWP/ASPT) | Cualitativo | Cualitativo | F | N | 0->150/0-10 |

* O: orden; F: familia; G: género; S: especie.

** N: nacional ; R: regional

ND: no hay datos

4. MUESTREO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO^(*)

Introducción

La naturaleza es por definición compleja. La mayor parte de los patrones biológicos que observamos en cualquier sistema ecológico del mundo son determinados por un gran número de procesos físicos, químicos y ecológicos, estos procesos además de actuar de forma independiente, interactúan y varían tanto en escala espacial como temporal. Por ejemplo, la distribución y abundancia de una especie esta afectada simultáneamente por muchos factores bióticos y abióticos, los que determinan si la especie estará presente o no en un lugar determinado.

El objetivo primario de este capítulo es entregar una estrategia general para la detección y desarrollo de bioindicadores apropiados para un sistema de aguas continentales determinado, basados en la abundancia y distribución de organismos acuáticos, utilizando herramientas de estadística básica.

La búsqueda de un indicador biológico podría resumirse en la estructura siguiente:

- Se selecciona una población o comunidad para realizar el estudio.
- Se describe el comportamiento o la variación de una variable biológica que constituye elementos de la población o comunidad seleccionada. Esta variable respuesta puede ser la incidencia de individuos enfermos, la abundancia de una especie, la riqueza de una comunidad, la diversidad o cualquier otro atributo cuantificable de la población o comunidad en estudio.
- Se relacionan las variables biológicas con las ambientales, poniendo a prueba si ciertos factores ambientales tienen efecto

^(*)RODRIGO PARDO LUKSIC.

Lab. Limnología, Fac. Ciencias, Universidad de Chile.

en la variable biológica. Las variables ambientales son consideradas fuentes de variación conocidas y en el caso de los sistemas acuáticos están relacionadas principalmente a la calidad del agua, en términos de las características físicas y químicas del agua. Además de las condiciones hidrológicas y de sustrato.

Estimación de la abundancia

Evidentemente, el método más directo para determinar el tamaño de una población es enumerar todos los individuos pertenecientes a la población (censo total). Este método es irrealizable, en la mayoría de los casos por interferencia, destrucción del hábitat ó costo, medido en tiempo, personal requerido ó dinero. En consecuencia se recurre a técnicas de muestreo que permiten estimar el tamaño de la población a partir del recuento de los individuos o sus productos en una serie de unidades de muestra.

El objetivo de un programa de muestreo es proveer una estimación poblacional con la mayor exactitud posible, optimizando la cantidad de esfuerzo invertido, en trabajo ó costo. No existe un diseño de muestreo perfecto, sino que cada problema requerirá de su propio diseño adaptado a la distribución y ciclo de vida del organismo en estudio. Por lo tanto, es condición indispensable estar profundamente familiarizado con los organismos a estudiar.

Además, en el caso que no existan datos previos pertinentes que puedan ser usados para determinar la metodología y el número mínimo de muestras, debe realizarse un muestreo piloto para probar la metodología de campo y recabar estimaciones preliminares de la media, la varianza y otros parámetros estadísticos de la población.

Un tema importante y a veces olvidado es el tiempo que debe emplearse en la organización del trabajo de campo, que debe incluir, al menos, el entrenamiento y supervisión del personal que intervendrá en el muestreo.

En todos los muestreos existe una serie de pasos necesarios a seguir:

1. Determinar los objetivos de la investigación. El objetivo establecerá cuales son las variables y a que escala se estudiaran.
2. Definir la población objetivo.
3. Especificar los datos necesarios, para evitar el exceso de información.
4. Especificar el nivel de precisión deseado. El cual se halla afectado por la variabilidad natural de lo que deseamos medir y los errores de medición del método, entre otros factores.
5. Definir los métodos de medición: se halla relacionado con la validez, el costo y la precisión.
6. Definir la unidad de muestreo; por ejemplo un cuadrado de dimensiones conocidas, como el utilizado con la red Surber o un segmento del río, como el que se podría abarcar con una red D. en el primer caso nuestro foco esta en la abundancia de organismos y en el segundo en la Riqueza y abundancia relativa de organismos del bentos.
7. Definir el programa (o diseño) de muestreo: determinado por las características biológicas y ecológicas de la población en estudio.
8. Realizar un muestreo piloto para probar la metodología y recabar información de la población.
9. Organizar el trabajo de campo.
10. Resumen y análisis de datos: incluye la edición, corrección y eliminación de observaciones anómalas.
11. Como regla general, toda muestra obtenida es una guía potencial para muestreos futuros.

Número mínimo de muestras

Para determinar el tamaño de la muestra es necesario recordar que esperamos obtener de esas muestras en términos de precisión ó limite de error tolerable.

Para establecer el número de muestras n se necesita una ecuación que relacione el tamaño muestral con la precisión deseada para la media (Bicudo y Bicudo 2004). La magnitud del error tolerable depende de la magnitud del cambio poblacional que se desea poder registrar. Por ejemplo, para insectos plaga que típicamente exhiben cambios poblacionales de 10 a 100 veces sus números dentro de una misma estación, una estimación poblacional con un error estándar del 25% de la media permitiría detectar cambios estadísticamente significativos si la población se duplica o se reduce a la mitad de su tamaño. En contraste, si se trata de estudios sobre tabla de vida que requieren mayor exactitud, el error estándar aceptable es del 10% alrededor de la media (Southwood 1978). Elliott (1977), considera aceptable un error de 20% para la mayoría de las muestras de material bentónico, basado en esto propuso la siguiente formula:

$$n = \frac{S^2}{D^2 \bar{x}^2}$$

Donde:

n = número de muestras

S^2 = Varianza

D = Índice de precisión deseado (en este caso 20%).

\bar{x} = Media

Downing (1984) desarrollo una ecuación empírica para calcular el número mínimo de muestras necesario:

$$n = \left[\left(\log^{-1} \left(0,581 + 0,691 \times \log M - 2,82 \times 10^{-4} A \right) \right) / P \times M^2 \right]$$

Donde:

n = número de muestras

M= Densidad poblacional media
 A= Área de muestreo
 P= Error absoluto/densidad media

Análisis

Correlación-Regresión

Muy a menudo se encuentra en la práctica que existe una relación entre dos ó más variables. Por ejemplo: la concentración de oxígeno en el agua depende de la temperatura y la altura; la velocidad se asocia con el tipo de fondo del lecho y de la pendiente, y la abundancia de organismos dependerá en cierto modo de las variables físicas y químicas del ambiente.

Cuando se busca una medida para medir estas relaciones se dice que se está buscando medir la correlación entre esas dos variables.

Por tanto, averiguar la correlación entre dos variables se refiere siempre a hallar una medida de la relación entre esas dos variables.

Una forma de medir el grado de intensidad de esta posible correlación entre variables es mediante el *coeficiente de correlación lineal* (Zar 1999) Este coeficiente se aplica cuando la relación que puede existir entre las variables es lineal (es decir, si se representara en un gráfico los pares de valores de las dos variables la nube de puntos se aproximaría a una recta).

No obstante, puede que exista una relación que no sea lineal, sino exponencial, parabólica, u otro tipo de función. En estos casos, el coeficiente de correlación lineal mediría mal la intensidad de la relación de las variables, por lo que convendría utilizar otro tipo de coeficiente más apropiado o transformar los datos para linealizarlos.

Para ver, si se puede utilizar el coeficiente de correlación lineal, lo mejor es representar los pares de valores en un gráfico y ver que forma describen.

El coeficiente de correlación lineal se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\sum ((xi - \bar{x}) * (yi - \bar{y}))}{\sqrt{\frac{\sum ((xi - \bar{x})^2)}{n} * \frac{\sum ((yi - \bar{y})^2)}{n}}}$$

Numerador: se denomina covarianza y se calcula de la siguiente manera: en cada par de valores (x,y) se multiplica x menos su media, por y menos su media. Se suma el resultado obtenido de todos los pares de valores y este resultado se divide por el tamaño de la muestra.

Denominador: se calcula el producto de las varianzas de x y de y, y a este producto se le calcula la raíz cuadrada.

Los valores que puede tomar el coeficiente de correlación *r* son: $-1 < r < 1$. Si $r > 0$, la correlación lineal es positiva (el cambio de una variable es directamente proporcional al cambio de la otra). La correlación es tanto más fuerte cuanto más se aproxime a 1.

Si $r < 0$, la correlación lineal es negativa (el cambio de una variable es inversamente proporcional al cambio de la otra). La correlación negativa es tanto más fuerte cuanto más se aproxime a -1.

Si $r = 0$, no existe correlación lineal entre las variables. Aunque podría existir otro tipo de correlación (parabólica, exponencial, etc.).

Aunque el valor de r fuera próximo a 1 ó -1, no quiere decir obligatoriamente que existe una relación de causa-efecto entre las dos variables, ya que este resultado podría deberse al puro azar.

El coeficiente de correlación es útil en indicarnos el grado de asociación entre dos variables, pero es inútil si lo que deseamos es predecir, para lo cual es necesario ajustar los datos a función que determine la relación

causa-efecto entre las variables. Cuando se busca una fórmula de ese tipo se dice que se está buscando una regresión entre esas dos variables.

Por tanto, hallar una regresión entre dos variables se refiere siempre a hallar una fórmula o ecuación que represente la relación aproximada entre esas dos variables. El coeficiente de correlación lineal nos permite determinar si, efectivamente, existe relación entre las dos variables. Una vez que se concluye que sí existe relación, la regresión nos permite definir la recta que mejor se ajusta a esta nube de puntos.

Una recta viene definida por la siguiente fórmula:

$$y = a + bx$$

Donde y es la variable dependiente, es decir, aquella que viene definida a partir de la variable independiente (x). Para definir la recta hay que determinar los valores de los parámetros a (intercepto) y b (pendiente). La regresión lineal nos permite calcular el valor de estos dos parámetros, definiendo la recta que mejor se ajusta a esta nube de puntos.

El parámetro b viene determinado por la siguiente fórmula:

$$b = \frac{\sum((x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}))}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

Que es la covarianza de las dos variables, dividida por la varianza de la variable "x".

El parámetro a viene determinado por:

$$a = \bar{y} - (b * \bar{x})$$

Es la media de la variable y , menos la media de la variable x multiplicada por el parámetro b que hemos calculado (ver ejemplo).

Entonces, podemos calcular el coeficiente de correlación, de la siguiente forma:

$$r = \frac{-10742/36}{\sqrt{1010324/36 * 201/36}}$$

Luego,

$$r = -0,754$$

Por lo tanto, la correlación existente entre estas dos variables es elevada ($>0,7$) y de signo negativo, por lo tanto la riqueza de macroinvertebrados bentónicos se asociaría negativamente con la conductividad eléctrica.

Para predecir la abundancia de macroinvertebrados bentónicos a otras conductividades eléctricas es necesario estimar la recta de regresión. Calcularemos la recta de regresión de la serie de datos Riqueza y Conductividad eléctrica. Vamos a considerar que la Conductividad eléctrica es la variable independiente (x) y que la Riqueza es la variable dependiente (y).

El parámetro b viene determinado por:

$$b = \frac{-10742/36}{1010324/36} = -0,0106$$

Y el parámetro a por:

$$a = 3 - (-0,0106 * 497,33) = 8,121$$

Por lo tanto, la recta que mejor se ajusta a esta serie de datos es:

$$Riqueza = 8,121 - 0,0106 * CE$$

Esta recta define un valor de la variable dependiente (Riqueza), para cada valor de la variable independiente (Conductividad eléctrica).

Regresión Logística

La correlación y la regresión lineal son herramientas útiles para encontrar la asociación entre variables continuas. Pero muchas veces la variable respuesta esta en categorías, como las categorías de calidad de agua señaladas en la norma secundaria (0=Excepción; 1=Muy Buena; 2=Buena; 3=Regular y 4=Muy Mala), cada una definida por una serie de variables físicas, químicas y biológicas. Para estos casos la herramienta a utilizar es la Regresión Logística. No cabe ninguna duda que la regresión logística es una de las herramientas estadísticas con mejor capacidad para el análisis de datos en investigación clínica y epidemiología, de ahí su amplia utilización (Pampel 2000).

El objetivo primordial que resuelve esta técnica es el de modelar cómo influye en la probabilidad de aparición de un suceso, habitualmente dicotómico, la presencia o no de diversos factores y el valor o nivel de los mismos. También puede ser usada para estimar la probabilidad de aparición de cada una de las posibilidades de un suceso con más de dos categorías (politómico). Ahora nos centraremos en el caso dicotómico, como puede ser la relación entre la calidad de agua (variable dependiente) y las comunidades bentónicas (variable independiente).

Si clasificamos el valor de la variable respuesta como 0 cuando no se presenta el suceso (Calidad de Agua=2) y con el valor 1 cuando sí está presente (Calidad de Agua=3), y buscamos cuantificar la posible relación entre la calidad de agua y, por ejemplo, la Riqueza de la comunidad bentónica, como posible factor predictor, podríamos caer en la tentación de utilizar una regresión lineal:

$$\text{Calidad} = a + b * (\text{Riqueza})$$

y estimar, a partir de nuestros datos, por el procedimiento habitual de mínimos cuadrados, los coeficientes a y b de la ecuación. Sin embargo, y aunque esto es posible matemáticamente, nos conduce a la obtención de resultados absurdos, ya que

cuando se calcule la función obtenida para diferentes valores de Riqueza se obtendrán resultados que, en general, serán diferentes de 0 y 1, los únicos realmente posibles en este caso, ya que esa restricción no se impone en la regresión lineal, en la que la respuesta puede en principio tomar cualquier valor.

Por lo tanto, no puede usarse el modelo lineal para averiguar la relación entre variables, cuando la variable dependiente es categórica.

Si utilizamos como variable dependiente la probabilidad p de que la calidad del Agua sea Buena (Categoría 2) y construimos la siguiente función:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

Tendríamos, una variable que puede tomar cualquier valor, por lo que podemos plantearnos el buscar para ella una ecuación de regresión tradicional:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = a + b * (\text{Riqueza})$$

que se puede convertir con una pequeña manipulación algebraica en una ecuación donde la variable dependiente sea la probabilidad que ocurra un suceso:

$$P(\text{Calidad}) = \frac{1}{1 + e^{(-a - b * (\text{Riqueza}))}}$$

Este es el tipo de ecuación que se conoce como modelo logístico, donde el número de factores puede ser más de uno, así en el exponente que figura en el denominador de la ecuación podríamos tener:

$$b_1 * (\text{Riqueza}) + b_2 * (\text{Diversidad}) + b_3 * (\text{Equitatividad}) \dots b_n * (X)$$

Referencias

Bicudo, C. y D de Bicudo., 2004. Amostragem em Limnologia. RiMa Editora. São Carlos.

Downing, J.A. 1984. Sampling the benthos of standing waters, p. 87-130. In: J.A. Downing and F.H. Rigler (eds.) A manual on methods for the assessment of secondary productivity in fresh waters. 2nd ed. IBP Handbook 17. Blackwell Scientific Publications, Oxford, England.

Elliott, J. M., 1977. Some methods for the statistical analysis of samples of benthic invertebrates. Freshwater Biol. Assoc. Sci. Publ. No. 25. 159pp.

Pampel, F.C., 2000. Logistic Regression. University Papers Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, series no. 07-132). Thousand Oaks, CA: Sage.

Southwood, T. R., 1978. Ecological methods with particular reference to the study of insect populations, 2nd ed. Chapman and Hall, London. 524 pp.

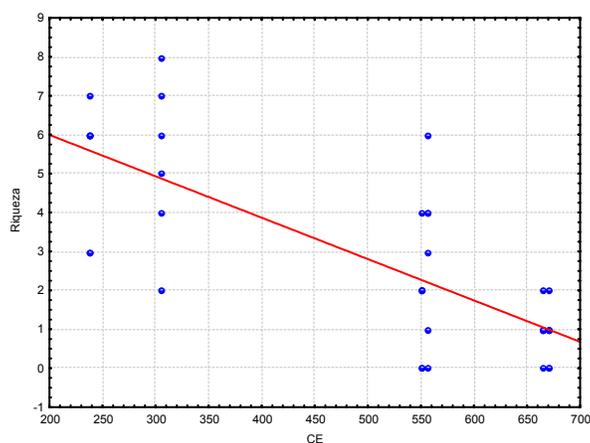
Zar, J., 1999. Biostatistical Analysis. Cuarta Edición. Prentice Hall. New Jersey. 663 pp.

EJEMPLO

En la primera campaña de muestreo en el río Elqui, entre otras variables, se cuantificó la riqueza de macroinvertebrados bentónicos (Riqueza), con seis replicas de red Surber y la conductividad eléctrica:

| Riqueza | CE |
|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| 7 | 305 | 2 | 305 | 1 | 670 | 6 | 556 | 2 | 550 | 1 | 665 |
| 6 | 305 | 7 | 238 | 1 | 670 | 3 | 556 | 4 | 550 | 2 | 665 |
| 8 | 305 | 3 | 238 | 1 | 670 | 1 | 556 | 2 | 550 | 1 | 665 |
| 5 | 305 | 3 | 238 | 2 | 670 | 4 | 556 | 2 | 550 | 0 | 665 |
| 4 | 305 | 6 | 238 | 0 | 670 | 4 | 556 | 0 | 550 | 1 | 665 |
| 2 | 305 | 6 | 238 | 0 | 670 | 0 | 556 | 0 | 550 | 1 | 665 |

Para ver, si se puede utilizar la aproximación lineal representamos en un gráfico los pares de valores de una distribución bidimensional: la Conductividad eléctrica (x) en el eje horizontal o eje de abcisa, y la Riqueza (y) en el eje vertical, o eje de ordenada. Vemos que la nube de puntos sigue una tendencia lineal:



5.-TECNOLOGÍAS COMPUTACIONALES INTELIGENTES. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS AMBIENTALES^(*)

Un número diverso de organizaciones e individuos necesitan analizar datos del ambiente y tomar decisiones acerca del manejo o aspectos relativos al monitoreo del mismo. Existen numerosas tecnologías para asistir este proceso. Sin embargo por diferentes razones, seleccionar la mejor tecnología puede no ser fácil. Existen dos niveles del problema: la tecnología en sí misma (generalmente el aspecto matemático o de ingeniería de un tópico como las redes neuronales por ejemplo) y de los productos que hacen accesible la tecnología.

El primer problema es que existen muchos tópicos tecnológicos novedosos, y la mayoría de ellos evoluciona rápidamente, lo cual dificulta sobremanera para los no especialistas computacionales el mantenerse actualizado. Entonces, habiendo identificado la tecnología que no parece útil a nuestros propósitos, el siguiente problema a resolver entre la amplia variedad y oferta de productos que proclaman que soportan la diferentes y nuevas tecnologías - ¿Cuál de ellos es el mejor para un trabajo o tarea en particular?

Finalmente es importante destacar que existe un costo y un riesgo de aplicar las nuevas tecnologías – usarlas correctamente toma tiempo y dinero, y por otra parte ¿cómo podemos estar seguros que la inversión entregará los resultados deseados?

En este contexto el propósito de este documento es ayudar y facilitar el problema, al proporcionar una guía para resolver y seleccionar aplicaciones de las Tecnologías Inteligentes de Procesamiento Computacional, en los siguientes tópicos

^(*) LUCIANO RODRÍGUEZ ORTEGA, Universidad del Mar, Valparaíso.

- Data Mining
- Redes Neuronales Polinomiales

Por supuesto que pueden existir otras tecnologías computacionales útiles en un dominio particular; no pretendemos ni reclamamos cubrir con este documento todo el espectro de posibilidades. Los tópicos seleccionados sin embargo representan los más apropiados en lo que es análisis, interpretación y aplicaciones a problemas y datos ambientales. En este contexto los límites de este documento, son: i) no se tratan los Sistemas de Información Geográficos (SIG); ii) se enfatiza los usos de datos medidos o adquiridos antes que simulados. En la siguiente sección se describirán cada una de ellas en una forma detallada.

Aplicaciones en el área medio ambiental

La siguiente es una breve reseña de aplicaciones de las tecnologías computacionales inteligentes a problemas medioambientales:

Lek, et al (1996). Correlacionaron variables ambientales en ríos de Francia con la abundancia de las poblaciones de trucha, utilizando redes neuronales.

Schleiter, et al (1999). Utilizaron redes neuronales artificiales para modelar la calidad del agua, bioindicadores y dinámica poblacional en sistemas lóticos.

Van der Werf y Zimmer (1998) Utilizaron sistemas expertos basados en lógica difusa para construir un indicador de impacto ambiental por pesticidas.

Conrads et al (2002). Analizaron los impactos de contaminación en el río Beaufort, usando redes neuronales artificiales.

Gevrey et al (2004) Evaluaron la calidad de aguas utilizando características de las diatomeas presentes en los ríos y técnicas avanzadas de modelación entre la que se incluían entre otras las redes neuronales

Müller (1996) Destacan el análisis y predicción en sistemas ecológicos, mediante el algoritmo GMDH

La técnica **PNN-GMDH** se utilizó en forma pionera en la estimación de poblaciones de peces en los ríos de Rusia (Ivakhnenko com. pers.).

La aplicación más reciente de esta técnica de modelamiento inductivo a la resolución de problemas ambientales, es su utilización para modelar el impacto béntico producido por el cultivo de salmones en balsas jaulas (Rodríguez y Martínez, no publicado). Se desconocen si a la fecha existen otras aplicaciones de este método en el área medio ambiental.

Minería de datos (Data Mining)

La metodología básica utilizada en el trabajo de análisis de datos para la cuenca del Río Cachapoal, corresponde a un proceso conocido como Data Mining o Minería de Datos, que no es otra cosa que la **“extracción de información y conocimiento oculto en bases de datos”** (Fayyad *et al* 1996)

La minería de datos o *Data Mining*, es una nueva tecnología con gran potencial para ayudar a las instituciones a concentrarse en la información más importante de sus bases o bodegas de Datos. Las herramientas de minería de datos predicen futuras tendencias y comportamientos, permitiendo tomar decisiones proactivas, conducidas por un conocimiento acabado de la información disponible.

Las herramientas de minería de datos pueden responder a preguntas de negocios que tradicionalmente consumen demasiado tiempo para poder ser resueltas y a los cuales los usuarios de esta información casi no están dispuestos a aceptar. Estas herramientas permiten explorar las bases de datos en busca de patrones ocultos, encontrando información predecible que un experto no puede llegar a encontrar porque se encuentra fuera de sus expectativas.

La extracción de conocimiento se realiza en forma inductiva. La secuencia de análisis y procesamiento (Figura 1) es la siguiente (Fayyad *et al* 1996):

- **Limpieza de datos:** la cual permite manejar datos irrelevantes, ruidosos, perdidos o erróneos
- **Integración de datos:** mediante la cual se pueden integrar en una sola fuente, bases de datos múltiples y heterogéneos.
- **Selección de datos:** la cual permite incorporar al análisis los datos relevantes desde la base de datos
- **Transformación de datos:** en la cual los datos son transformados o consolidados en formas apropiadas para la minería mediante la realización de resúmenes y/u operaciones de agregación.
- **Minería de datos:** es un proceso esencial donde métodos inteligentes como las PNN o ANN son aplicados para extraer patrones y tendencias en los datos
- **Evaluación de los patrones:** el cual es identificar los patrones verdaderamente interesantes que representan conocimiento los que se seleccionan en base de alguna **medida de importancia o interés.**
- **Presentación del conocimiento:** en la cual se presenta al usuario el conocimiento extraído, mediante técnicas de visualización y representación del conocimiento. (Figura 1)

Redes neuronales polinomiales PNN-GMDH

Las redes neuronales polinomiales que son desarrolladas estructuralmente y entrenadas usando el aprendizaje estadístico, se denominan **redes de aprendizaje estadístico** (Madala e Ivakhnenko, 1994). La herramienta específica utilizada en este estudio fue el algoritmo PNN-GMDH, este algoritmo fue

desarrollado alrededor de 1968 por el ingeniero y cibernético ucraniano **Alexey Grigoryevich Ivakhnenko** para la resolución de problemas complejos.

Esta técnica de análisis es sumamente útil en aplicaciones y modelaje de sistemas complejos en las cuales la forma funcional exacta del modelo no es conocida o varía de caso a caso. En una forma simple el algoritmo PNN-GMDH (Group Method Data Handling) puede ser descrito adecuadamente como un algoritmo de aprendizaje no-parámtrico, capaz de resolver el problema de optimización de modelos multidimensionales:

$$\tilde{g} = \arg \min_{g \in G} CR(g)$$

$$CR(g) = f(P, S, z^2, T, V)$$

Donde G -es el conjunto de modelos considerados; CR es un criterio externo de calidad del modelo g a partir de este conjunto; P es el número de variables; S es la complejidad del modelo; z^2 es la dispersión del ruido; T es el número de transformaciones en la muestra de datos; V es el tipo de función de referencia. Para una función de referencia característica definida, cada conjunto de variables corresponde a una estructura de modelo definida $P = S$. Cuando $z^2 = \text{constante}$, $T = \text{constante}$, y cuando $V = \text{constante}$, el problema se transforma a una forma unidimensional más simple representada por:

$$CR(g) = f(S)$$

El óptimo del modelo puede ser encontrado mediante la combinación y ordenación de todas las variantes posibles. La conexión general entre las variables de entrada y las variables de salida del modelo se pueden expresar por las series funcionales de Volterra, cuya analogía discreta es el

polinomio completo de **Kolmogorov- Gabor**, que se puede representar como sigue:

$$y = a + \sum_{i=1}^M b_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M d_{ijk} x_i x_j x_k + \dots$$

Donde $X(x_1, x_2, \dots, x_M)$ es el vector de variables de entrada; $A(a_1, a_2, \dots, a_M)$ es el vector de coeficientes o ponderadores. Los componentes del vector de entrada X pueden ser variables independientes, formas funcionales o términos de diferencias finitas.

En general no es posible expandir un modelo en la forma de un polinomio **Kolmogorov - Gabor** en su forma completa, ya que esto requeriría cientos de términos y combinaciones entre las variables de entrada y de salida, a menos que el problema contenga pocas variables de entrada y salida. Es demostrable que esta expresión puede ser reemplazada o sustituida por una serie de polinomios cuadráticos parciales de orden inferior de la forma:

$$y = A + Bx_i + Cx_j + Dx_i^2 + Ex_j^2 + Fx_i x_j$$

Para encontrar los coeficientes de este polinomio es suficiente contar únicamente con seis puntos a nuestra disposición. La repetición de distintas soluciones para el polinomio cuadrático parcial, antes descrito, permite la construcción del polinomio completo, de cualquier grado de complejidad usando únicamente los seis datos antes mencionados y esta aproximación a la solución del polinomio complejo es lo que se conoce como algoritmo PNN-GMDH por capas múltiples (Figura 2).

La metodología anteriormente descrita corresponde a un modelo PNN-GMDH de carácter genérico. El algoritmo PNN-GMDH utilizado en este estudio corresponde a la

variante de Yurachkovsky (1981), la que se describe en la siguiente sección.

Algoritmo PNN-GMDH (Yurachkovsky 1981)

Esta variante se puede utilizar para analizar conjuntos de datos complejos con la finalidad de determinar relaciones internas ocultas de los datos y presentar el conocimiento actual de estas relaciones en una forma descriptiva del tipo matemática (regresión polinómica).

Para trabajar con este algoritmo, debemos formalizar en primera instancia el dominio de los datos para tener el número de parámetros cuantitativos observados $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ (el conjunto de variables de entrada). Una vez hecho esto se debe fijar las observaciones con resultado "ya conocidos", esto es las n observaciones de los valores del vector de salidas Y , y del vector de variables de entrada, X .

El propósito de este tipo de algoritmos es encontrar un subconjunto de variables $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}\}$ y un modelo $y = f_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ en el conjunto de polinomios de la s -ésima potencia que reduce al mínimo el valor del criterio de regularidad (CR). Una vez construido o determinado el modelo este puede ser utilizado para calcular o predecir resultados "desconocidos" y en nuevos vectores observados X (Figura 3).

Este algoritmo se puede implementar como una red neuronal polinomial del tipo GMDH. La primera capa genera el modelo $y = g(x_i, x_j, x_k)$, donde x_i, x_j, x_k son las variables de entrada. Las próximas capas generan modelos como $y = g(w_i, w_j, w_k)$, donde w_i, w_j, w_k son los modelos generados en las capas previas.

El objetivo principal es crear un algoritmo estable para la construcción de un modelo no lineal, de forma tal que sus resultados sean interpretados fácilmente por los usuarios. Las características principales del algoritmo

PNN-GMDH variante de Yurachkovsky (1981) pueden ser resumidas como sigue:

- **Aprendizaje rápido.** Solamente se utilizan transformaciones con dos coeficientes, por ejemplo $g(w_i, w_j) = a \cdot w_i + b \cdot w_j$ en el caso lineal. Independiente de la potencia del modelo resultante y del número de términos de las matrices de segundo orden que son las únicas que se invierten. Esto proporciona un rápido aprendizaje del algoritmo.

- **Resultados en forma paramétrica:** Las estructuras polinómicas son codificadas usando el vector de números simples los que proporcionan la presentación de los resultados en la forma paramétrica de una ecuación no lineal.

- **Control de la complejidad:** Denotemos el vector (**potencia, c**)^T como complejidad, la potencia es la *potencia* del polinomio y c es el número de términos. La potencia de un nuevo modelo es controlada por la condición que si, por ejemplo, $g(w_i, w_j, w_l) = a \cdot w_i + b \cdot w_j + w_l$, entonces **potencia($g(w_i, w_j, w_l)$) = max(potencia(w_i), potencia(w_j) + potencia(w_l))**, donde la potencia() señala la potencia del polinomio. Esto nos da la posibilidad para restringir la clase de los modelos bajo consideración por la **potencia(w_i) < p** y buscar los modelos entre los polinomios con potencia menores que p . La complejidad máxima esta definida entonces por el usuario o se puede seleccionar automáticamente usando para ello el método de la validación cruzada.

- **Estructura de red neuronal doblemente jerarquizada:** Una estructura de red neuronal doblemente jerarquizada es una característica importante de PNN. Uno de los problemas es que la potencia de los polinomios aumenta demasiado rápido en el algoritmo GMDH tradicional. En el paso r del procedimiento de la iteración uno puede tener modelos de potencia $r+1$, $W_r \in P_{r+1}$. El control de la complejidad nos da una oportunidad de implementar el procedimiento de la iteración en ejecución sin un incremento de la potencia de polinomios y/o

del número de términos. El procedimiento iterativo externo controla la complejidad, es decir el número de los términos y de la potencia de los polinomios en los modelos intermedios. Los mejores modelos forman el conjunto inicial para la próxima iteración. Este procedimiento realiza una búsqueda amplia sin el aumento de la complejidad. Además que se posea una estructura doblemente jerarquizada proporciona una mejor convergencia de los coeficientes. Los modelos que se calculan como resultado de varias transformaciones tienen los coeficientes que están mas cerca de los coeficientes apropiados de la regresión.

- **Estimación robusta:** Para utilizar el algoritmo en la presencia de errores grandes (datos atípicos) el algoritmo que se ha desarrollado para identificación y estimación robusta del modelo no lineal (regresión del tipo M). Esta mejora hace posible que se mejore la estabilidad del algoritmo de PNN.

El algoritmo PNN-GMDH es capaz de resolver problemas de:

- **Pronóstico de largo plazo**
- **Pronóstico de corto plazo de proceso y eventos**
- **Identificación de regularidades físicas**
- **Aproximación de procesos multivariados**
- **Agrupación de muestras de datos**
- **Reconocimiento de patrones para variables continuas y discretas**
- **Diagnóstico y reconocimiento por algoritmos probabilísticas de ordenamiento**
- **Soporte de decisiones escenarios “qué – si” y pronóstico normativo de vectores de proceso**
- **Pronóstico de procesos sin modelos usando los análogos complejos**
- **Auto-organización de redes de neuronas activas en multicapas dobles**

Análisis comparativo de PNN-GMDH versus Redes Neuronales

En la tabla 1 se ilustra las principales ventajas y desventajas en un cuadro comparativo entre ambas tecnologías.

Referencias

Cardoso Silva, M. & A. C. Rodrigues, 2002. Environmental Indicators as Management Tools of Estuaries Methodology and the Case Study of the Tejo Estuary. Littoral 2002, The Changing Coast. EUROCOAST / EUCC, Porto – Portugal Ed. EUROCOAST – Portugal, ISBN 972-8558-09-0199.

Conrads, P.A., E. A. Roehl Jr. and W. P. Martello, 2002. Estimating point-source impacts on the Beaufort River using artificial Neural networks models. Proceeding Paper from 2002 AWRA Spring Specialty Conference on Coast Water Resources

Fayyad, U., G. Piatetsky-Shapiro & P. Smyth, 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. American Association for Artificial Intelligence .Fall 1996: 37-54 pp

Gevrey, M, F. Rimet, Y. S. Park, J.L. Giraudel, L. Ector & S. Lek, 2004. Water quality assessment using diatom assemblages and advanced modeling techniques Freshwater Biology (2004) 49, 208–220.

Goethals, P. and N. De Pauw, 2001. Development of a concept for integrated ecological river assessment in Flanders, Belgium. In: *O. Ravera (Ed.) Scientific and legal aspects of biological monitoring in freshwater J. Limnol., 60 (Suppl. 1): 7-16, 2001*

Joy, M. K., and R. G. Death. (Submitted). Predictive modeling and spatial mapping of freshwater fish and decapod assemblages integrating GIS and neural networks. Journal of Applied Ecology

Lek, S., A. Belaud, P. Baran, I. Dimipoulos and M. Delacoste, 1996. Role of some environmental variables in trout abundance models using neural networks. *Aquat. Living Resour.*, 9, 23-29 pp.

Madala, H.R. and A.G. Ivakhnenko, (1994). *Inductive Learning Algorithms for Complex System Modeling.* CRC Press Inc. 384 pp

Müller, J.A.,1996. Analysis and prediction of ecological systems. *SAMS Vol 25:* 209-243 pp

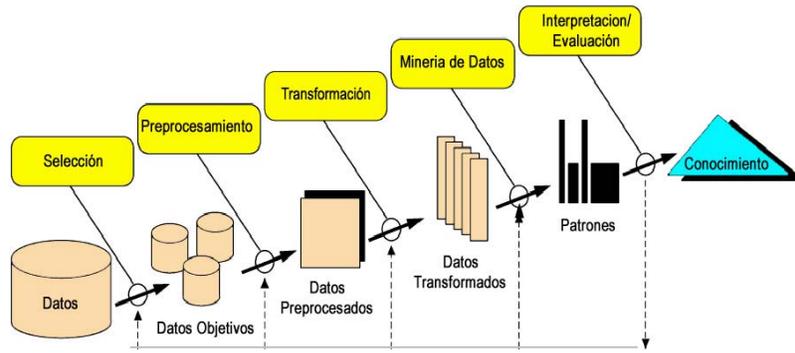
Schleiter, I.M., D. Borchardt, R. Wagner. T. Dapper, K.D. Schmidt, H.H. Schmidt an H. Werner, 1999. Modelling water quality, bioindication and population dynamics in lotic ecosystems using neural networks. *Ecological Modelling* 120: 271.286 pp.

Yurachkovsky, Y.P. 1981. Restoration of Polynomial Dependencies Using Self-Organization. *Soviet Automatic Control*, 14, 17-22.

Páginas web

Van der Werf, H.M.G. and C. Zimmer, 1998. *An indicator of pesticide environmental impact based on fuzzy expert system.* <http://www.pmac.net/nenbfuz1/htm>

FIGURAS



Generación de conocimiento desde los datos (Fayyad, 1996)

Figura 1: Generación del conocimiento desde los datos (Fayyad, 1996)

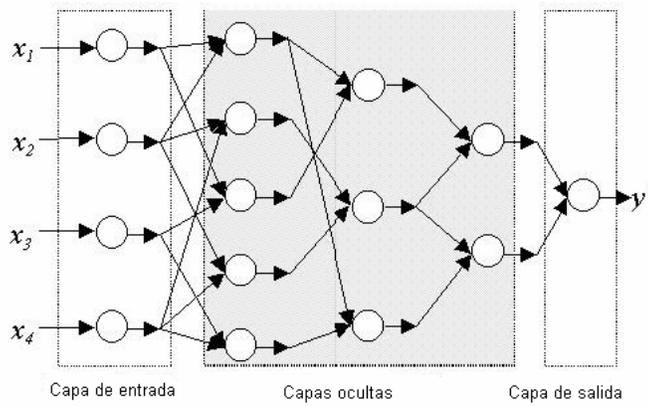


Figura 2. Estructura de un modelo PNN-GMDH

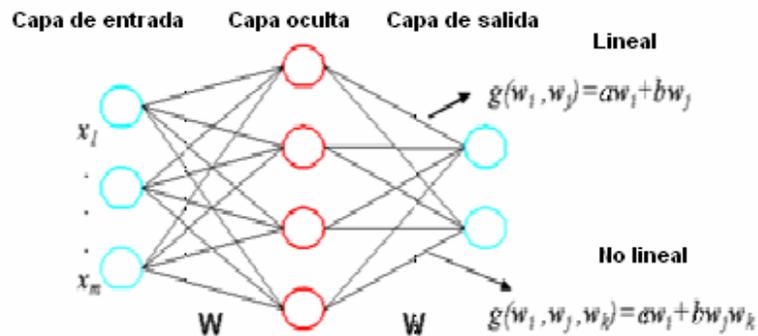


Figura 3. Estructura de una red polinomial variante de Yurachkovsky (1981),

TABLA 1

Análisis comparativo de PNN-GMDH versus Redes Neuronales

El siguiente cuadro ilustra las principales ventajas y desventajas en un cuadro comparativo entre ambas tecnologías.

| ITEM DE COMPARACION | Redes Neuronales (ANN) | Redes Polinomiales (PNN) |
|---------------------------------|---|--|
| Análisis de datos | Aproximador universal | identificador de estructuras universal |
| Modelo analítico | Aproximación analítica indirecta | Aproximación analítica directa |
| Arquitectura | Estructura de redes preseleccionadas no acotada; la selección experimental de la arquitectura adecuada demanda tiempo y experiencia | Estructura de la red acotada y que evoluciona durante el proceso de estimación |
| Síntesis de redes | Estructura de red fija optimizada globalmente | Estructura de la red sintetizada adaptativamente |
| Umbral | Funciones de transferencia umbral | Funciones objetivas umbral |
| Información a priori | Sin transformación no se puede usar en el mundo de las redes neuronales | Puede ser usada directamente para seleccionar los criterios y funciones de referencia. |
| Auto-organización | Deductiva: se deben fijar en forma subjetiva el número de layers y el de los nodos; es comparable a la estimación de parámetros en la regresión | Inductiva: el número de layers y de nodos es estimado mediante el mínimo del criterio externo (selección objetiva) |
| Estimación de parámetros | En una forma recursiva, requiere gran cantidad de datos muestrales | Estimación por lotes mediante técnicas de máxima verosimilitud; se requieren muestras pequeñas |
| Regularización | Ninguna, únicamente información interna | Estimación en un conjunto de entrenamiento, selección con un conjunto de prueba (información externa) |
| Optimización | Búsqueda global en una superficie altamente multimodal; lento y tedioso, requiere que el usuario fija varios parámetros del algoritmo por ensayo y error: técnica que consume mucho tiempo. | GMDH; no consume tiempo; las redes sintetizadas en forma adaptativa son mas parsimoniosas; las partes de la red que no son apropiadas son descartadas en forma automática (supervivencia de los mejores ajustes). |
| Acceso a resultados | Observación esta disponible en forma transiente, en un ambiente de tiempo real | Los datos por lo general están almacenados y accesibles en forma reiterada. |
| Conocimiento necesario | Acerca de la teoría de las redes neuronales | Acerca de la tarea (criterio) y clase de sistema (lineal, no-lineal) |
| Convergencia | La convergencia global es difícil de garantizar | Existencia de un modelo de complejidad optima |
| Computación y cálculos | Disponible para implementación usando hardware con computación en paralelo | Eficiente con computadores ordinarios y también para computación masiva en paralelo |
| Atributos | Propósitos generales, modelos no paramétricos estáticos o dinámicos lineales y no- lineales; No hay salida del modelo; no hay explicación de los componentes; apropiado para predicción | Propósitos generales, modelos paramétricos dinámicos o estáticos, lineales flexibles o no-lineales; salida del modelo analítico directa; apropiado para análisis, predicción e interpretación; puede ser incorporado en otros métodos para mejorar su poder. |

6.- BIOENSAYOS (*)

Descripción general

Los bioensayos de toxicidad, son pruebas de laboratorio destinados a caracterizar el efecto tóxico, de un compuesto químico o una matriz compleja, sobre un grupo de individuos de una o varias especies. Estos son expuestos a condiciones controladas de laboratorio en diferentes concentraciones de la solución o matriz en estudio.

En líneas generales, los compuestos químicos provocan efectos adversos en los organismos dependiendo fundamentalmente de:

- La concentración de él o de los compuestos tóxicos que se encuentran en el medio.
- El grado de exposición de los individuos a los compuestos tóxicos.
- El tiempo de exposición de los individuos a los compuestos tóxicos
- Sensibilidad de cada organismo a los distintos compuestos tóxicos.
- La biodisponibilidad de estos compuestos en la solución o matriz

Debido a la alta variabilidad de factores que determinan la toxicidad, ha sido necesario desarrollar bioensayos con especies representativas de los distintos niveles de la cadena trófica. Este tipo de bioensayos, que reúnen diferentes organismos, permiten detectar efectos de toxicidad combinada sobre organismos de diferentes sensibilidad (Castillo *et al*, 2000). Desde este punto de vista constituye una herramienta eficaz para estudios ecotoxicológicos, es decir aquellos focalizados en el efecto de los contaminantes sobre determinadas poblaciones y comunidades (Newman, 1995).

Los bioensayos se clasifican principalmente en Bioensayos de Toxicidad Aguda y

(*)MARIBEL LÓPEZ, ANA M^a MORA, M^a ISABEL OLMEDO, Lab. Bioensayos y Microbiología, CENMA. PEDRO ENRÍQUEZ Subdepartamento Química Ambiental y Alimentaria , SAG.

Bioensayos de Toxicidad Crónica. Los Bioensayos de Toxicidad Aguda son aquellos que cuantifican la alteración causada por alguna sustancia tóxica o una matriz compleja como agua dulce o de mar, sobre los organismos de una especie, en un tiempo breve de exposición (24 – 72 Hr); esta alteración es observada sobre un parámetro que de cuenta de compromiso vital del organismo, ya sea mortalidad, inmovilidad o alteración en la tasa de crecimiento. Los Bioensayos de Toxicidad Crónica cuantifican los efectos en el desarrollo, reproducción o viabilidad poblacional, de una especie determinada expuesta a un tóxico, por un tiempo no inferior al 20 % de su ciclo de vida. En el microcrustáceo del género *Daphnia* este periodo es de aproximadamente 14 días (OECD, 1993) y en ratones puede ser hasta de 6 meses (M. J. Derelanko y M.A. Holinger eds, 2001)

Los principales parámetros de medición de la respuesta de toxicidad de los organismos a las sustancias o matrices a los que están siendo expuestos, corresponden genéricamente a la determinación del CEn (concentración efectiva en el medio a la cual se reduce un parámetro fisiológico vital en un porcentaje n comparado con el de su valor control, ya sea tasas de crecimiento, movilidad etc), el más frecuentemente utilizado es CE₅₀. Para ensayos agudos se puede estimar por ejemplo, CL₅₀ (concentración a la cual se produce un 50% de mortalidad para un ensayo determinado, DL50 (dosis que produce un 50% de mortalidad). Tanto para ensayos agudos y crónicos suele estimarse el LOEC (concentración más baja que genera algún efecto) y el NOEC (concentración más alta que no origina efectos sobre la especie estudiada) (Castillo ed., 2005).

Las técnicas y las condiciones en que se realizan los bioensayos pueden variar de un laboratorio a otro, sin embargo, con algunas especies se ha logrado llegar a una estandarización internacional de protocolos y técnicas para llevarlos a cabo. Mundialmente, se encuentran reconocidas varias organizaciones que han desarrollado guías de aplicación de bioensayos; como, por ejemplo, la OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) en Europa y la EPA

(Environmental Protection Agency) en Estados Unidos. Entre los bioensayos estandarizados asociados al medio dulceacuícola encontramos entre otros: Bioensayos de Toxicidad aguda con ejemplares del género *Daphnia* a 48 hrs., Bioensayos de toxicidad aguda con alevines de trucha y pez cebrá a 96 hrs. de exposición, bioensayos inhibición de crecimiento de la microalga *Selenastrum capricornutum*, a 72 – 96 Hrs, crecimiento y desarrollo de alevines de trucha y reproducción de *Daphnia*.

El uso de Bioensayos para evaluar la toxicidad sobre especies del medio acuático, permite la caracterización y el biomonitoreo de efectos tóxicos agudos y crónicos de los contaminantes sobre los organismos vivos de las aguas receptoras, ya sean éstas de Residuos Industriales Líquidos (RILEs), residuos domiciliarios, mineros u otros. Además, su evaluación permite fijar criterios y normas estándares de calidad y también establecer programas de vigilancia que permitan obtener información continua acerca de la calidad de los efluentes y cursos de aguas y cuerpos de agua en general (Castillo ed., 2005).

Actualmente se han publicado en Chile dos normas relacionadas con bioensayos en medio acuático: el Bioensayo de toxicidad aguda con *Daphnia pulex* o *Daphnia magna* (microcrustáceo) y el Bioensayo de inhibición de crecimiento con *Selenastrum capricornutum* (microalga clorófito unicelular).

Requerimientos de Laboratorio

Para realizar una batería de bioensayos básicos tales como microalgas, microcrustáceos, plantas y peces, es necesario un laboratorio con una infraestructura que implique:

- Temperatura controlada de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Control de luz, intensidad y fotoperíodo en función de los requerimientos de cada bioensayo.
- Zona para la mantención de las especies a usar en bioensayos
- Agua de buena calidad (en el caso de *Daphnia* se utiliza agua para análisis clase 4 según NCh426/2), destilada y desionizada,

para los medios de mantención de las especies y la realización de los bioensayos

Dentro de los materiales con que debe contar el laboratorio se incluye (Figura 1):

- Microscopio óptico
- Lupa estereoscópica
- Autoclave
- Estufa de secado
- Estufa de esterilización
- Bombas de aire
- Equipo medidor de pH
- Conductivímetro
- Balanza (resolución, 0,001 g)
- Centrífuga
- Cámara de Flujo laminar o mechero
- Termómetros de sala y de inmersión
- Calefactores
- Agitadores orbitales
- Material de vidrio: vasos de precipitado, matraces, probetas, acuarios, contenedores, etc.
- Cámara de Neubauer
- Sistema de control de fotoperíodo (por ejemplo, temporizador)
- Sistema de filtración de agua

Criterios de selección de especies para realización de bioensayos

Además de la batería de bioensayos estandarizados y dependiendo de las condiciones locales, es importante desarrollar bioensayos con especies locales, los cuales deben ser representativas del ecosistema en estudio. Lo anterior permite fijar criterios más acuciosos de calidad en un área determinada; para esto, se debe aislar y cultivar en el laboratorio las especies definidas, las cuales se deben seleccionar de acuerdo a ciertos criterios:

- Distribución geográfica
- Abundancia
- Relevancia de la especie en el estudio
- Conocimiento de su fisiología, nutrición y reproducción
- Presentar ciclos de vida cortos
- Facilidad de cultivo en laboratorio

El comportamiento de las especies tanto estandarizadas como las nuevas seleccionadas del área de estudios, se deben caracterizar mediante el uso de tóxicos de referencia, con ensayos mensuales evaluados de acuerdo a una tabla control de respuesta, generada en cada laboratorio. Los más usados corresponden a: dicromato de potasio, sulfato de cobre y cloruro de cadmio.

Controles

Los organismos de una misma especie o incluso de una misma cepa, pueden variar en sus respuestas fisiológicas de acuerdo a las condiciones fisicoquímicas y nutricionales en las cuales están expuestos; es por esto que deben contar con experimentos controles: negativos y positivos. Los controles negativos consisten en la elaboración de una batería adicional realizada al mismo tiempo que los bioensayos, bajo las mismas condiciones, pero sin la adición del agua de prueba, muestra o tóxico de referencia. El objetivo es observar que no existe alguna condición extra ensayo, ya sea en los organismos o en las condiciones de laboratorio, que afecte la viabilidad de los organismos.

Los controles positivos consisten en una batería adicional, realizada bajo las mismas condiciones del bioensayo, pero utilizando diferentes concentraciones de la sustancia de referencia usada en la carta control; por ejemplo, dicromato de potasio o sulfato de cobre (pero sin la muestra de prueba). Con estos datos se obtiene el CE_{50} , el que es cotejado con los valores de la carta control. El objetivo de este control es mantener un control histórico para corroborar si la sensibilidad de la especie se mantiene estable en el tiempo.

Con los datos de estos controles positivos llevados a cabo durante los bioensayos, o en su defecto con una prueba similar una vez al mes; se construyen las cartas control del laboratorio. Estas, entregan un parámetro de variación en los resultados de los controles positivos permitidos a cada laboratorio, lo que valida la realización de los bioensayos.

Para su construcción, se calcula el promedio de los 10 últimos CE_{50} obtenidos y su desviación estándar (σ), y se grafican. Los límites superior (promedio + 2σ) e inferior (promedio - 2σ), corresponderán al intervalo de concentración en el cual varía en forma aceptable (confianza del 95.45%) la respuesta de los organismos al tóxico seleccionado (ver Gráfico 1).

Referencias

APHA, 1998, Standard Methods for the examination of water and wastewaters, 20th edition, American Public Health Association, Washigton D.C.

Castillo, G., I. Vila, E. Neild, 2000. Ecotoxicity assessment of metals and wastewater usind multitrophic assays. Environ. Toxicol, 15(5): 370-75.

Handbook of Toxicology, 2001. 2nd edition, Edit M. J. Derelanko and M.A. Holinger, CRC Press.

IDRC-IMTA, 2005. Ensayos Toxicológicos y Métodos de Evaluación de Calidad de Aguas; Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. Ed. Gabriela Castillo. México.

NCh 2083 Of. 1999. Aguas – Bioensayo de toxicidad aguda mediante la determinación de la inhibición de la movilidad de *Daphnia magna* o *Daphnia pulex* (Crustacea, Cladocera).

NCh 2706 Of. 2002. Calidad de agua - Bioensayo de inhibición de crecimiento de algas de agua dulce con *Selenastrum capricornutum* (Raphidocelis subcapitata)

NCh 426/2 Of. 97. Agua grado reactivo para análisis – Especificaciones – Parte 2: Análisis físico, químico y microbiológico de agua potable, aguas crudas y aguas residuales.

Newman M. C., 1995. Advances in Trace Substances Research. Quantitative Methods in Aquatic Ecotoxicology. Edit Board, University of Georgia, USA.

OECD, 1993. Guidelines for the testing of chemicals organization for economic cooperation and developments.

TIPOS DE BIOENSAYOS**- BIOENSAYOS CON DAPHNIA:** *Daphnia magna* (Figura 2a)**Condiciones de Bioensayo Agudo**

| Parámetros fisicoquímicos | |
|--|--|
| pH | rango: 7,6- 8,0 |
| Temperatura | 20± 2° C |
| Oxígeno | saturado |
| Intensidad lumínica | oscuridad |
| Características del bioensayo | |
| Número de individuos por continente | 5 (4 réplicas) |
| Régimen de alimentación | sin alimentación |
| Edad de neonatos | < 24 h |
| Carga de solución por continente | 10 mL |
| Serie de concentraciones | Serie geométrica entre 6.25% a 100% de la muestra de agua |
| Medio | Agua reconstituida, de acuerdo a la APHA, con la muestra a las diferentes concentraciones. |
| Tiempo de duración del ensayo | 48 Hr. |
| Controles | Negativo: agua reconstituida Positivo: Dicromato de Potasio entre 0,15 mg/L y 2.4 mg/L |
| Determinación de contracción efectiva CE50 | CI50: concentración de inmovilización |

Condiciones de Bioensayo Crónico (Figura 2b)

| Parámetros fisicoquímicos | |
|--------------------------------------|--|
| pH | rango: 7,6- 8,0 |
| Temperatura | 20± 2° C |
| Oxígeno | saturado |
| Intensidad lumínica | 800 lux |
| Fotoperíodo | 16:8 |
| Características del bioensayo | |
| Número de individuos por continente | 1 (10 réplicas) |
| Régimen de alimentación | diaria |
| Tipo de Alimentación | Microalgas |
| Edad de neonatos | < 24 h |
| Carga de solución por continente | 100 mL |
| Serie de concentraciones | Serie geométrica entre 6.25% a 100% de la muestra de agua |
| Medio | Agua reconstituida, de acuerdo a la APHA, con la muestra a las diferentes concentraciones. |
| Tiempo de duración del ensayo | 14 días |
| Controles | Negativo: agua reconstituida Positivo: no |

- BIOENSAYO DE INHIBICIÓN DE CRECIMIENTO EN MICROALGAS:***Selenastrum capricornutum* Printz** (Figura 3)**Condiciones de mantenimiento y ejecución de bioensayos**

| | |
|---|---|
| Temperatura | 20 °C ± 2 °C |
| Intensidad lumínica | 6000-7000 lux |
| Fotoperíodo | Continuo |
| Calidad de luz | Luz blanca |
| Cambio de medio | 2 veces por semana |
| Tipo de medio de cultivo | OECD para microalgas |
| Agitación | Sin aireación. Manual dos veces al día/ agitador magnético. |
| Tasa de crecimiento de cultivo | 1,7 a 1,9 d ⁻¹ |
| Concentración de reinóculos | 10 % |
| Tipo de Bioensayo | Estático |
| Tiempo de ejecución de bioensayo | 96h |
| Carga de solución por continente | 50 mL |
| Continentes | Matraz Erlenmeyer 100 mL |
| Densidad de Cultivo inicial | 10 ⁴ cel/mL |
| Tasa de crecimiento del control | 0,9 d ⁻¹ (ó entre 1,7 a 1,9 d ⁻¹) |
| Concentraciones de sustancia de referencia (K ₂ Cr ₂ O ₇) | Control , 0,1;0,2;0,4; 0,8 y 1,6 mg/L K ₂ Cr ₂ O ₇ |
| Lecturas | a 72 o 96 Hrs |
| cuantificación de células (medición) | microscopia óptica (en cámara Neubauer). turbidez , o absorbancia a 750 nm |
| Determinación de contracción efectiva CE50 | sobre inhibición de la tasa de crecimiento |

- BIOENSAYOS DE INHIBICIÓN DE LA ELONGACIÓN DE RAÍZ DE LECHUGA:***Lactuca sativa* variedad conconina** (Figura 4)**Condiciones de mantenimiento de las semillas**

| | |
|-------------|--------------|
| Fotoperíodo | oscuridad |
| Temperatura | 20 °C ± 2 °C |

Condiciones de Bioensayo

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Parámetros fisicoquímicos | |
| Temperatura | 20± 2° C |
| Intensidad lumínica | oscuridad |
| Características del bioensayo | |
| Número de semillas por placa petri | 20 (3 réplicas) |

| | |
|--|---|
| Carga de solución por placa petri | 1-3 mL |
| Serie de concentraciones | Serie geométrica entre 6.25% a 100% de la muestra de agua |
| Medio | Agua destilada con la muestra a las diferentes concentraciones. |
| Tiempo de duración del ensayo | 120 Hr. |
| Controles | Negativo: Agua destilada Positivo: Dicromato de Potasio entre 12.5 mg/L y 200 mg/L |
| Determinación de contracción efectiva CE50 | sobre inhibición de la elongación de la raíz |

- BIOENSAYOS DE INHIBICIÓN DE CRECIMIENTO DE *LEMNA*

Lemna minor (Figura 5)

Condiciones de mantenimiento

| | |
|---------------------|------------------------------------|
| Temperatura | 20 °C ± 2 °C |
| Fotoperíodo | Luz continua |
| Intensidad lumínica | 6000 lux |
| Medio de cultivo | Swedish Standard medium (SIS) OECD |
| Cambio de medio | 2 veces por semana |

Condiciones de Bioensayo

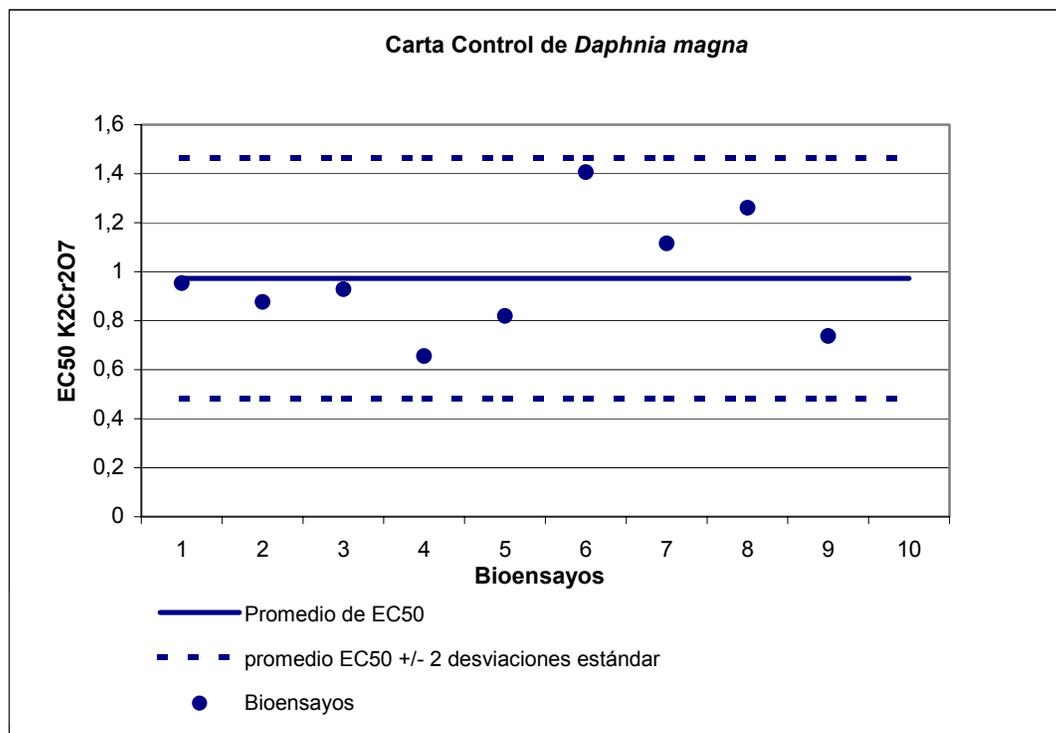
| | |
|--|---|
| Parámetros fisicoquímicos | |
| PH | 6.5 |
| Temperatura | 20± 2° C |
| Oxígeno | saturado |
| Intensidad lumínica | 6000 lux |
| Características del bioensayo | |
| Número de hojas por continente | 9-10 (3 réplicas) |
| Carga de solución por continente | 100 mL |
| Serie de concentraciones | Serie geométrica entre 6.25% a 100% de la muestra de agua |
| Medio | SIS con la muestra a las diferentes concentraciones. |
| Tiempo de duración del ensayo | 168 Hr. |
| Controles | Negativo: SIS Positivo: Dicromato de Potasio entre 1.25 mg/L y 20 mg/L |
| Determinación de contracción efectiva CE50 | sobre inhibición de la tasa de crecimiento |

- BIOENSAYO AGUDO EN PEZ CEBRA

Danio rerio (Figura 6)

| | |
|--|--|
| Parámetros fisicoquímicos | |
| PH | rango: 7,6- 8,0 |
| Temperatura | 25± 2° C |
| Oxígeno | saturado |
| Fotoperíodo | 16:8 |
| Intensidad lumínica | 800 lux |
| Características del bioensayo | |
| Número de individuos por continente | 10 réplicas |
| Régimen de alimentación | durante el bioensayo, los peces no reciben ningún tipo de alimentación |
| Tamaño de los individuos utilizados | 2-3 cm |
| Carga de solución por continente | 5 L |
| Serie de concentraciones | Serie geométrica entre 6.25% a 100% |
| Medio | agua potable declorada |
| Tiempo de duración del ensayo | 96 horas |
| Determinación de concentración efectiva CE50 | CL ₅₀ determinación de concentración letal |

GRÁFICO 1: Ejemplo de carta control



FOTOGRAFÍAS



Figura 1: Laboratorio de Bioensayos y Microbiología, de CENMA

Fotografías de:

- a, Acuarios para pez cebra
- b, Acuarios con *Daphnia*, en condiciones de aclimatación
- c, Acuarios con *Daphnia* en condiciones de mantenimiento.
- d, Microscopio óptico
- e, Refrigeradores
- f, Estufa de esterilización y autoclave
- g, h e i: Distintas vistas del laboratorio, donde se observan estantes con material de vidrio, estantes con acuarios para pez cebra y sala con campana de flujo laminar.



Figura 2 a : Fotografía de *Daphnia magna* tomada en lupa esteoscópica



Figura 2 b : Fotografía del montaje de un bioensayo crónico con *Daphnia magna*

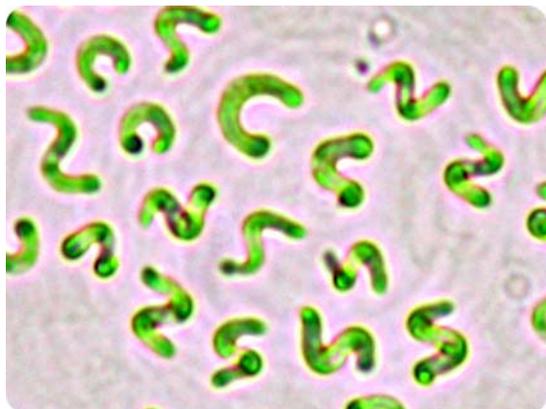


Figura 3 a : Fotografía de *Selenastrum capricornutum* tomada en microscopio óptico (400X)

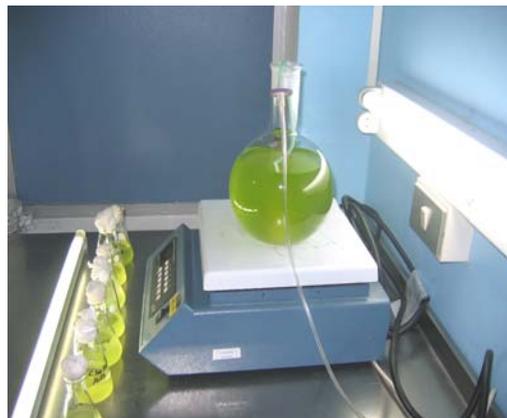


Figura 3 b : Fotografía de un cultivo de *Selenastrum capricornutum*

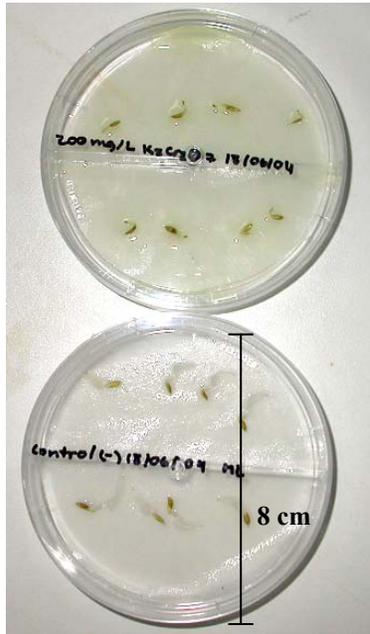


Figura 4: Fotografía de semillas de *Lactuca sativa*

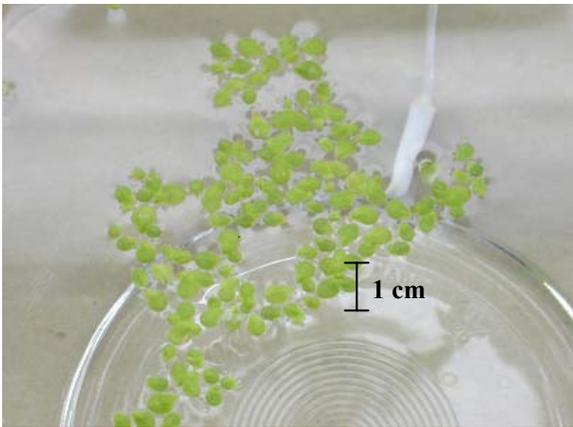


Figura 5: Fotografía de *Lemna minor*

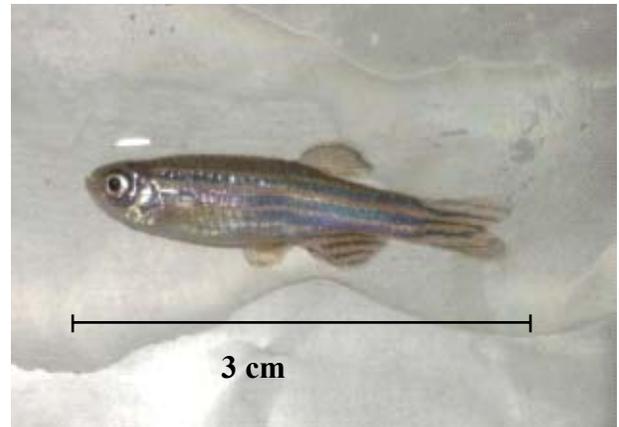


Figura 5: Fotografía *Danio rerio*

ANEXO I

Guía de Identificación de Macroinvertebrados Bentónicos de la Zona Central de Chile

María Catalina Sabando G.

Depto. Biología, U. Metropolitana de Ciencias de la Educación
Facultad de Ciencias, U. de Chile.

Raquel M. Peñaloza C.

Depto. Biología, U. Metropolitana de Ciencias de la Educación

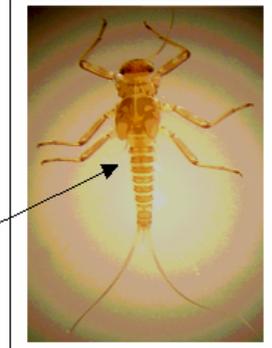
ORDEN EPHEMEROPTERA

FAMILIA BAETIDAE:

Branquias simples, usualmente ovales y compuestas de una lámina. Filamento terminal generalmente reducido, antenas largas, más de dos veces el ancho de la cabeza.



Branquia Simple

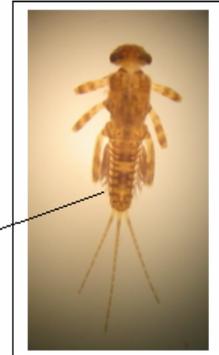


FAMILIA LEPTOPHLEBIDAE

Ninfas con clipeo fusionado a la frente, branquias abdominales variables, pero compuestas de una lámina ventral y dorsal.

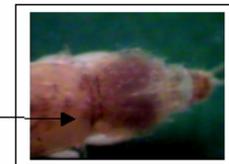


Branquia doble



FAMILIA CAENIDAE:

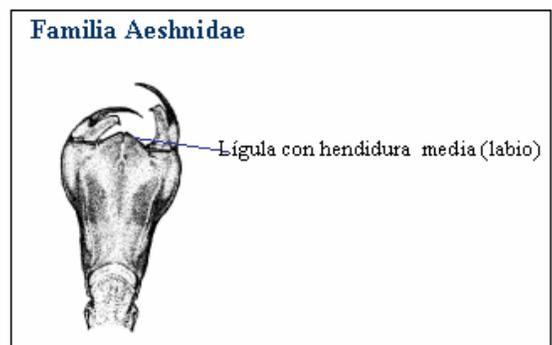
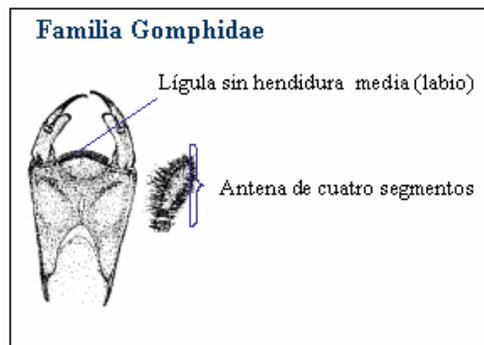
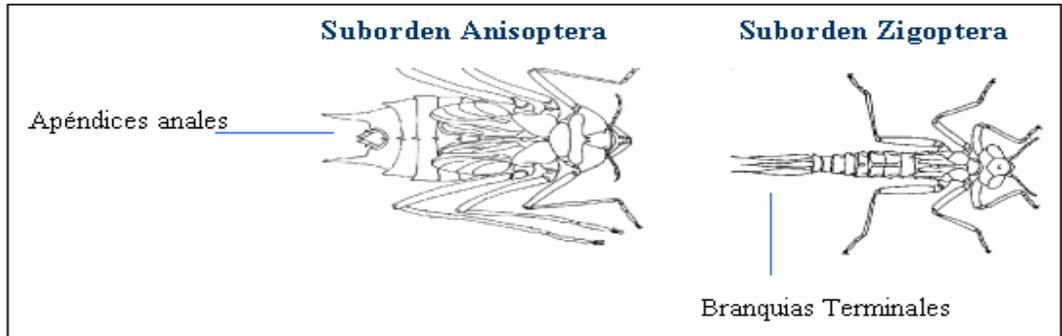
Ninfas con branquias en el 2° segmento abdominal operculadas, cubriendo las restantes. Branquias del primer segmento vestigiales. Branquias 3° al 7° segmento abdominal con márgenes con flecos.



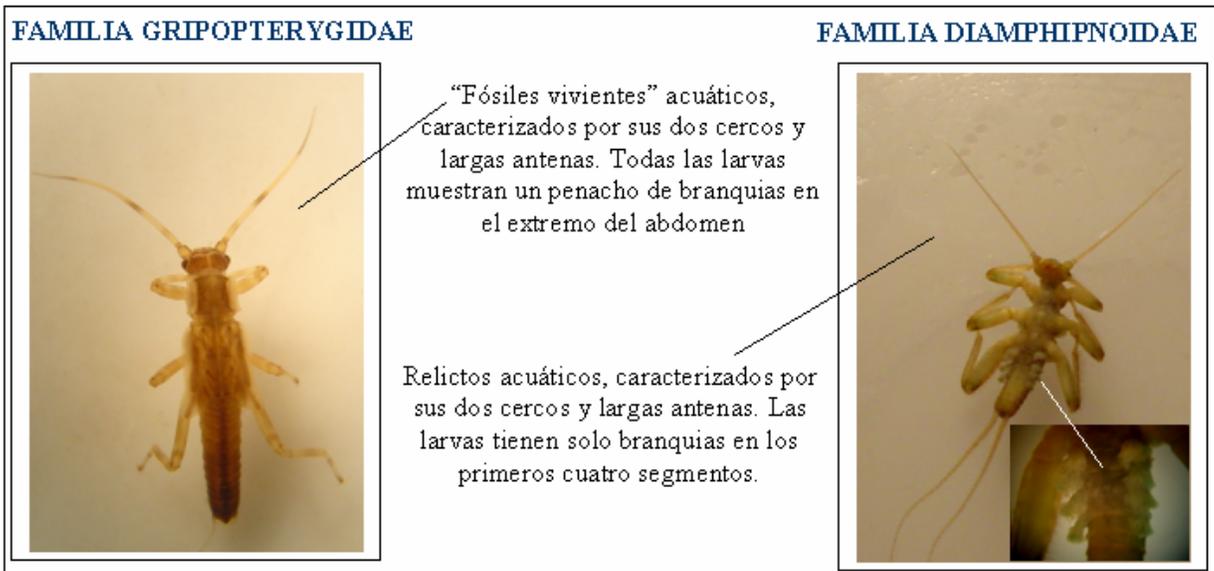
Branquia Opercular

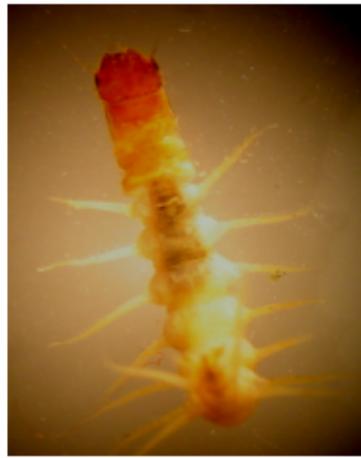


ORDEN ODONATA



ORDEN PLECOPTERA

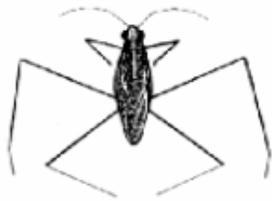




ORDEN MEGALOPTERA

FAMILIA CORYDALIDAE

Larvas de 10 a 70 mm. De longitud, caracterizadas por su coloración oscura y fuertes mandíbulas.



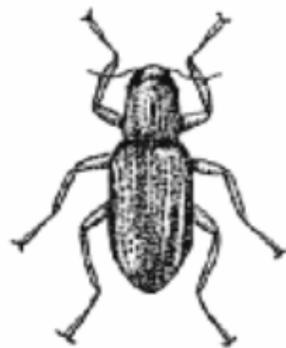
ORDEN HEMIPTERA

FAMILIA GERRIDAE:

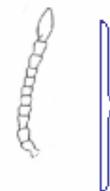
Insectos con piezas bucales modificadas en forma de "pico". Fémures posteriores muy largos, se extienden más allá del ápice del abdomen.

ORDEN COLEOPTERA

FAMILIA ELMIDAE



Adulto



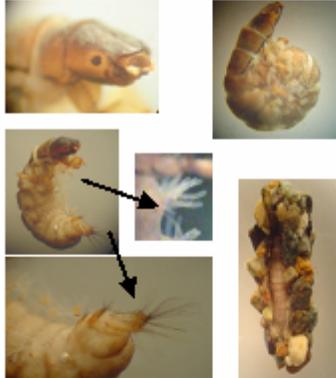
Antena



Larva

Larvas cilíndricas de 3.5 mm. de longitud, cuerpo muy esclerosado. Abdomen con noveno esterno como opérculo con un par de ganchos. Tres pares de branquias anales retráctiles. Adulto acuático con patas largas, tarsos simples y garras largas.

ORDEN TRICHOPTERA



FAMILIA HIDROPSYCHIDAE:

Segmentos torácicos cubiertos por placas esclerosadas. Abdomen con una hilera de branquias ventrolaterales y un prominente cepillo de largos pelos en la base de la uña anal.

Cepillo y uña anal





FAMILIA HELICOPHIDAE



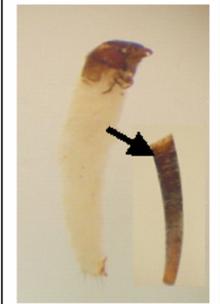
Las larvas tienen el pronoto esclerotizado, mesonoto parcialmente esclerotizado, especialmente en la parte anterior. Las primeras construyen capullos que consisten de un tubo central con amplias expansiones hacia los lados a medida que crecen

FAMILIA HIDROPTILIDAE



Abdomen carente de branquias, dos a tres pelos en la base de la uña.

FAMILIA SERISCOSTOMATIDAE



Las larvas de las especies sudamericanas tienen hileras de espinas sobre el borde o el área anterior del pronoto, construyen capullos tubulares de seda

FAMILIA GLOSSOSOMATIDAE

I-II seg. Abdominal membranoso y parcialmente esclerosados. Construyen casas en forma de tortuga de pequeñas piedras adheridas a un sustrato.



Estuches



FAMILIA HIDROBIOSIDAE

Sólo el primer seg. Torácico esclerotizado. Pata anal extendida libremente del abdomen. Noveno segmento abdominal con esclerito oscuro en la parte dorsal.



} IX segmento abdominal



ORDEN DIPTERA

FAMILIA ATHERICIDAE:

Cada segmento abdominal con un par de pseudópodos ventrales y un par de pelos en el extremo del último seg. (cola).

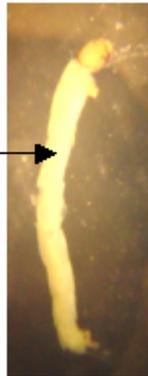


FAMILIA CHIRONOMIDAE

Larvas con un pseudópodo sobre el primero y último segmento del cuerpo.



Larva de Chironomidae



Estuche y pupa de Chironomidae

FAMILIA BLEPHAROCERIDAE

No se distingue una separación entre la cabeza y el tórax. Ventralmente cada segmento posee un disco adhesivo.



FAMILIA SIMULIIDAE



Un par de pseudópodos sobre el protórax y un disco adhesivo en el último segmento abdominal.

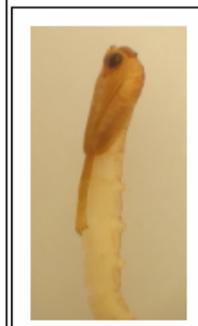
FAMILIA CERATOPOGONIDAE

La larva carece de pseudópodos, no se distinguen divisiones en los segmentos torácicos y abdominales.



FAMILIA TIPULIDAE

Larvas con cabeza no retráctil, disco lobular y espiracular en el último segmento abdominal.



Estado pupal de Tipulido.

ORDEN BASOMMATOPHORA

FAMILIA ANCYLIDAE

Gastrópodos o caracoles acuáticos, cuyos huevos son depositados en masas gelatinosas, sobre rocas, palos y hojas. Son devorados principalmente por peces, coleópteros y Odonatos.

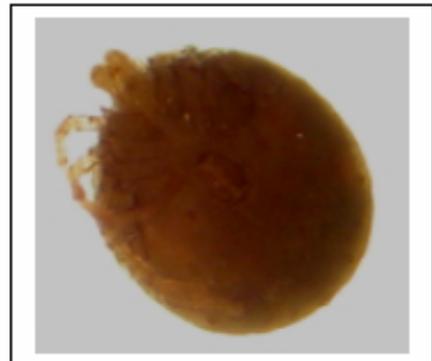


ORDEN ACARI

FAMILIA HYGROBATIDAE



FAMILIA SPERCHONIDAE



Forma globular u ovoide, coloración vistosa y abdomen fusionado en un solo cuerpo.

ANEXO II

Uso de Índice Biótico para Determinación de la Calidad del Agua

M. Ximena Molina Paredes
Lab. Bioensayo y Microbiología, CENMA
Facultad de Ciencias, U. de Chile.

USO DE ÍNDICE BIÓTICO PARA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

1.- Materiales necesarios para un Monitoreo Biológico

- Hoja de Trabajo: registro de datos de terreno.
- Red para muestreo cualitativo y/o cuantitativo.
 - Bandejas de plástico blanco.
 - Botas para trabajo de campo.
 - Huincha de medir.
 - Instrumentos para medir parámetros físicos y químicos *in situ*.
 - GPS – Mapas correspondientes.
 - Envases para almacenar las muestras.
 - Frascos de terreno etiquetados (lugar, fecha, réplica, hora, estación).
 - Pinzas.
 - Lupa.
 - Fijador.
 - Claves para identificar Macroinvertebrados.
- Frascos para conservar muestras clasificadas, etiquetados (lugar, fecha, estación, determinador).

Es recomendable la aplicación de más de un índice para asegurar una buena determinación de la calidad biológica de las aguas. Para esto se realiza un muestreo cualitativo con la red correspondiente (por ejemplo tipo D, o de pantalla, o recolección manual), en un área suficientemente representativa del lugar (10 a 15 m²), cuidando de obtener muestra de todos los sectores. Para esto se debe levantar las rocas, piedras, ramas sumergidas y troncos, como también recolectar entre macrófitas, que son substrato donde se adhieren los organismos, el muestreo se considera suficiente cuando comienzan a repetirse los mismos organismos (Roldán, 2003). Luego del muestreo cualitativo se realiza un muestreo cuantitativo usando la red correspondiente al tipo de substrato, como por ejemplo una red Surber.

2.- Aplicación del Índice Biótico de Familia, IBF (Hilsenhoff, 1988)

El índice Índice Biótico de Familia, IBF (Hilsenhoff, 1988) es un índice de aproximación cuantitativa, incorpora la abundancia y diversidad de familia. Tiene una serie de ventajas por las que es recomendable su uso: es simple de aplicar y de bajo costo; es posible determinar la calidad de agua por su sensibilidad de respuesta a nivel de familia. Ha sido principalmente aplicada en ríos del Sur de Chile (Figueroa *et al.*, 2003).

Pasos a seguir:

Paso 1: Los organismos recolectados son transportados al laboratorio para su clasificación taxonómica a nivel de familia, se obtiene el número de familias (riqueza) y la abundancia de macroinvertebrados bentónicos (ind./m²) por estación.

Paso 2: Para cada familia se determina el puntaje de tolerancia a la contaminación orgánica. Los valores de tolerancia por familia deben de ser adaptados a la fauna local, en este caso se ejemplifica con los valores usados por Figueroa *et al.*, 2003 (adaptado de Hauer & Lamberti, 1996) (Tabla 1).

Paso 3: Para la estimación del IBF (Hilsenhoff, 1988) se procede de la siguiente manera: En una tabla se registra la información obtenida (ver Tabla 2). Multiplicar el número de individuos por familia que corresponde a la (**columna B**) por el puntaje de tolerancia por familia que se indica en la (**columna C**) este resultado se incorpora en la columna (**D**). Luego se divide la sumatoria de la (**columna D**) por la sumatoria de la (**columna B**).

Fórmula:

$$IBF = (1/N \sum n_i t_i)$$

Donde:

N = número total de individuos en la muestra (Estación).

ni = número de individuos en una Familia

ti = puntaje de tolerancia de cada Familia.

Paso 4: Los valores del IBF se expresan en clases de calidad ambiental (Tabla 3), correspondiente a una escala de condición biológica para determinar el grado de contaminación orgánica, asignándoles a cada una un color determinado.

Paso 5: Los resultados obtenidos serán representados en un mapa de calidad de agua. En este mapa se marca con el color que corresponda la clase de calidad de agua (Roldán, 2003).

3.- Aplicación del Índice Iberian Biological Monitoring Working Party (IBMWP; Alba-Tercedor, 1996)

Este es un índice cualitativo, basado en la comunidad de macroinvertebrados y se aplica a un nivel taxonómico de familias. En algunos países latinoamericanos como el caso de Colombia es muy frecuente la aplicación sólo de este índice cualitativo BMWP/Col., (Roldán, 2003) pero tienen varios años de generación de información tanto en taxonomía como en aplicación de bioindicación a través de la fauna bentónica. Esto para Chile no es posible aún, ya que hay sistemas fluviales en los que aún se carece de muestreos o son insuficientes.

Este índice clasifica a los cuerpos de agua en cinco clases de calidad. Para la obtención de las muestras se elige la red adecuada, por ejemplo una red de mano de 250 μm de apertura de malla, se trata de cubrir la mayor variedad de hábitats de cada segmento estudiado del río. Si la profundidad del río no permitiera el uso de redes, se recomienda el uso de substratos artificiales con un tiempo de colonización de 25 – 30 días (Hauer & Lamberti, 1996; Roldán, 2003; Figueroa, 2004).

Pasos a seguir:

Paso 1: Los organismos recolectados son transportados al laboratorio para su clasificación taxonómica a nivel de familia, se obtiene el número de familias por estación y se le asigna el puntaje de tolerancia, Tabla 4 (modificada para Chile).

Paso 2: Se suma el total de puntaje obtenido por todas las familias por estación, el resultado del IBMWP corresponde a una clase de calidad de agua indicada en la Tabla 5. Finalmente se puede construir un mapa de calidad con el color correspondiente para el sistema fluvial estudiado.

Referencias

- Alba-Tercedor J. 1996. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. IV Simposio del Agua en Andalucía, Almería, II-203-213.
- Figueroa R., Valdovinos C., Araya E. & O. Parra. 2003. Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua del sur de Chile. Revista Chilena de Historia Natural, 76:275-285.
- Figueroa, R. 2004. Calidad ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chillán, VIII Región, Chile. Tesis Doctoral. Fac. Ciencias, Depto. Ecología y Geología, U. de Málaga. 260 pp.
- Hauer F.R. & G.A. Lamberti. eds. 1996. Methods in Stream Ecology. Academic Press. USA. 674 pp.
- Roldan G.A. 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/Col.. Ciencia y tecnología. Editorial Universidad de Antioquia. 170 pp.

TABLA 1:

Valores de tolerancia para macroinvertebrados bentónicos dulceacuícolas, para ríos de Chile mediterráneo *ChIBF*, en Figueroa *et al.*, 2003 (Tabla modificada de: Hauer & Lamberti, 1996). El valor 0 corresponde al menos tolerante a la contaminación orgánica, mientras que el valor 10 corresponde a la mayor tolerancia a contaminación orgánica.

| Orden (o Clase) | Familia | Valor de Tolerancia |
|------------------|------------------------|---------------------|
| Plecoptera | Gripopterygiidae | 1 |
| | Notonemouridae | 0 |
| | Perlidae | 1 |
| | Diamphipnoidae | 0 |
| | Eustheniidae | 0 |
| | Autroperlidae | 1 |
| Ephemeroptera | Baetidae | 4 |
| | Caenidae | 7 |
| | Leptophlebiidae | 2 |
| | Siphonuridae | 7 |
| | Oligoneuridae | 2 |
| | Ameletopsidae | 2 |
| | Coloburiscidae | 3 |
| | Oniscigastridae | 3 |
| Odonata | Aeshnidae | 3 |
| | Calopterygidae | 5 |
| | Gomphidae | 1 |
| | Lestidae | 9 |
| | Libellulidae | 9 |
| | Coenagrionidae | 9 |
| | Cordulidae | 5 |
| | Petaluridae | 5 |
| Trichoptera | Calamoceratidae | 3 |
| | Glossosomatidae | 0 |
| | <i>Helicopsychidae</i> | 3 |
| | Hydropsychidae | 4 |
| | Hydroptilidae | 4 |
| | Leptoceridae | 4 |
| | Limnephilidae | 2 |
| | Ecnomidae | 3 |
| | Helicophidae | 6 |
| | Polycentropodidae | 3 |
| | Philopotamidae | 2 |
| | Hydrobiosidae | 0 |
| Sericostomatidae | 3 | |

| Orden (o Clase) | Familia | Valor de Tolerancia |
|-----------------|-----------------|---------------------|
| Megaloptera | Corydalidae | 0 |
| | Sialidae | 4 |
| Lepidoptera | Pyralidae | 5 |
| Platyhelminthes | Turbellaria | 4 |
| Decapoda | | 6 |
| Coleoptera | Elmidae | 4 |
| | Psephenidae | 4 |
| Diptera | Athericidae | 2 |
| | Blephariceridae | 0 |
| | Ceratopogonidae | 6 |
| | Chironomidae | 7 |
| | Empididae | 6 |
| | Ephydriidae | 6 |
| | Psychodidae | 10 |
| | Simuliidae | 6 |
| | Tipulidae | 3 |
| Amphipoda | Gammaridae | 4 |
| | Hyalellidae | 8 |
| Mollusca | Amnicolidae | 6 |
| | Lymnaeidae | 6 |
| | Physidae | 8 |
| | Sphaeriidae | 8 |
| | Chiliniidae | 6 |
| Oligochaeta | | 8 |
| Hirudinea | | 10 |

TABLA 2:- Ficha de registro de macroinvertebrados utilizada para el cálculo del IBF.

| | | | |
|--|---------------|-----------------------|-----------------|
| Fecha: Localidad: Estación : Responsable: | | | |
| A | B | C | D |
| Familias | Nº organismos | Puntaje de tolerancia | (Col.B * Col C) |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

$$IBF: (\sum D / \sum B)$$

TABLA 3: Calidad de agua basado en los valores del IBF de Hilsenhoff (1988) en Hauer & Lamberti, (1996).

| Clase calidad | Rangos del IBF | Calidad del agua | Color |
|---------------|----------------|--------------------|----------|
| I | 0,00 – 3,75 | Excelente | Celeste |
| II | 3,76 -4,25 | Muy bueno | Azul |
| III | 4,26 – 5,00 | Bueno | Verde |
| IV | 5,01 – 5,75 | Regular | Amarillo |
| V | 5,76 – 6,5 | Relativamente mala | Café |
| VI | 6,51 -7,25 | Mala | Naranja |
| VII | 7,26 -10,00 | Muy malo | Rojo |

TABLA 4:- Puntuaciones asignadas a las diferentes familias de macroinvertebrados acuáticos para ríos de Chile mediterráneo (ChBMWP) (modificado de Alba-Tercedor, 1996).

| Familias | Puntaje |
|--|---------|
| Austroperlidae, Diaphipnoidae, Eustheniidae, Gripopterygiidae, Notonemouridae, Perlidae, Leptophlebiidae, Siphonuridae, Ameletopsidae, Oligoneuridae, Anomalopsychidae, Calamoceratidae, Helicophidae, Kokriidae, Leptoceridae, Phylorhynchidae, Sericostomatidae, Stenopsychidae, Tasiimidae, Corydalidae, Athericidae, Blephariceridae, Limnichidae, Psephenidae | 10 |
| Oniscogastridae, Phylopotamidae, Glossosomatidae, Lestidae, Calopterygidae, Gomphidae, Aeshnidae, Cordulidae, Libellulidae, Parastacidae | 8 |
| Enomidae, Hydrobiosidae, Polycentropodidae, Limnephilidae | 7 |
| Hydroptilidae, Coenagrionidae, Petaluridae, Aeglideae, Hyallelidae, Ancylidae, Chilinidae, Irídea | 6 |
| Hydropsychidae, Tipulidae, Simulidae, Dryopidae, Elmidae, Tricladia * Amnicolidae | 5 |
| Baetidae, Caenidae, Sialidae, Tabanidae, Stratiomyidae, Empididae, Dixidae, Ceratopogonidae, Limoniidae, Psychodidae, Haliplidae, Curculionidae, Psephenidae, Belostomatidae, Hydracarina | 4 |
| Hydrophilidae, Dytiscidae, Gyrinidae, Gerridae, Notonectidae, Corixidae Limnaeidae, Physidae, Planorbidae, Sphaeridae, Janiiridae, Hirudinea* | 3 |
| Chironomidae, Culicidae, Ephydriidae | 2 |
| Syrphidae, Oligochaeta | 1 |

Se han eliminado aquellas familias que no se encuentran en Chile, se han incorporado otras asignando los puntajes de tolerancia, Figueroa, 2004. *Todas las familias se consideran dentro del grupo.

TABLA 5: Transformación IBMWP en clases de calidad ambiental (Alba-Tercedor, 1996).

| Clase | Calidad | Valor IBMWP | Característica ambiental | Color |
|-------|-------------|-------------|--|----------|
| I | Buena | >150 | Aguas muy limpias, | Azul |
| | | 101-120 | Aguas no contaminadas o no alteradas de modo sensible. | |
| II | Aceptable | 61-100 | Son evidentes algunos efectos de contaminación | Verde |
| III | Dudosa | 36-60 | Aguas contaminadas | Amarillo |
| IV | Crítica | 16-35 | Aguas muy contaminadas | Naranja |
| V | Muy Crítica | <15 | Aguas fuertemente contaminadas | Rojo |

ANEXO III

GLOSARIO

Abiótico: componentes físicos y químicos de un sistema.

Acidez: Contenido en ácidos de una solución. Medida de la concentración de iones hidrogeno en una solución.

Adsorción: Adherencia de las moléculas de un gas, iones, o moléculas en solución a la superficie de un sólido.

Agua residual: Efluentes líquidos acuosos provenientes como desecho de la actividad urbana, industrial, ganadera o agrícola.

Agua residual doméstica: Son las aguas de desecho procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por las excretas humanas y las actividades domésticas.

Agua residual industrial: Todas las aguas de desecho generadas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad industrial o comercial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.

Agua subterránea: Agua situada bajo la superficie del terreno rellenando el espacio vacío entre las rocas, o el material poroso, y que se extiende por toda la zona considerada como saturada.

Arcilla: Desde el punto de vista mineral, filossilicato hidratado que se presenta en cristales muy pequeños (del orden de micrómetros) en forma de láminas hexagonales o fibras. Desde el punto de vista del tamaño de partícula se clasifican como arcillas los materiales cuyo tamaño es menor de 2 mm.

Arena: Sedimento detrítico no consolidado cuyo tamaño está comprendido entre 20 mm y 2 mm.

Autotrofia: Capacidad de un organismo para producir materia orgánica a partir de

compuestos químicos inorgánicos y de alguna fuente de energía.

Bacterias: organismos procariontes importantes en el proceso de descomposición de materia orgánica y fundamentales en los ciclos biogeoquímicos. Son relevantes en la dieta para organismos detritívoros.

Bentos: organismos que viene en el fondo, ya sea en la superficie (epibentos) o bien enterrados (endobentos). Pueden ser vegetales (fitobentos) o animales (zoobentos).

Bioacumulación: proceso por el cual los organismos vivos pueden coleccionar y concentrar productos químicos (ej. xenobióticos o contaminantes) ya sea directamente del ambiente que les rodea o indirectamente a través del alimento.

Biodegradable: Susceptible de descomponerse a través de procesos biológicos, generalmente mediados por microorganismos (bacterias, hongos, protozoos, etc).

Biodisponibilidad: Estado de una sustancia química en el que es posible de ser absorbido por un determinado organismo.

Bioensayos: Prueba de laboratorio en el que se observa la respuesta fisiológica de uno o más organismos frente a un estímulo.

Bioensayo de Toxicidad Aguda: Prueba biológica que cuantifica la alteración causada por alguna sustancia tóxica o una matriz compuesta sobre organismos de una especie, en un tiempo corto de exposición (24 – 72 Hrs).

Bioensayos de Toxicidad Crónica: Prueba biológica que cuantifica los efectos en el desarrollo, reproducción o viabilidad poblacional, de una especie determinada expuesta a un tóxico, por un tiempo no inferior al 20 % de su ciclo de vida.

Biomonitoreo: registro de parámetros biológicos, presencia o relación de organismos en el ambiente natural.

Calidad: Término que cuando se emplea referido a la composición de un agua se refiere a su adecuación a un uso concreto.

Calidad biológica: calidad de las aguas mediante el estudio de la composición y/o estructura de las comunidades biológicas.

Cepa: organismos con características morfofisiológicas comunes, normalmente de carácter clonal o provenientes de reproducción asexual o vegetativa.

Ciclo de vida: alternancia de estados nucleares, citológicos y reproductivos de una especie.

Ciclo hidrológico: Sucesión de fases por las que pasa el agua en su dinámica de distribución y circulación en la tierra. Incluye tres fases fundamentales: atmosférica, superficial y subterránea y los procesos de flujo (precipitación, escorrentía, infiltración, percolación, evaporación y condensación), que permiten el movimiento de la masa de agua entre y a través de las fases.

Comunidad: Conjunto de poblaciones que interactúan entre sí y que habitan en una misma área.

Conductividad: capacidad de una solución para conducir electricidad, los iones son los que conducen la corriente eléctrica.

Contaminante: Cualquier forma de materia o energía ajena a la composición natural del agua.

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. Medida de la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación del material carbonoso de una muestra de agua, por la población microbiana, a lo largo de cinco días de incubación, a una temperatura aproximada de 20° C (es la estándar).

Detritívoro: Organismos que se alimentan de la materia orgánica muerta. El término es usualmente aplicado a organismos diferentes de bacterias y hongos que se alimentan de detritos.

Detritus: material animal o vegetal fresco o parcialmente descompuesto.

DQO: Demanda química de oxígeno. Ensayo empleado para la medida del contenido en materia orgánica de una muestra de agua residual. Como agente oxidante se emplea una sustancia química, como el dicromato, fuertemente oxidante en medio ácido y a elevada temperatura.

Dureza del agua: Suma de las concentraciones de cationes metálicos con la excepción de los metales alcalinos y del hidrógeno. Suele expresarse en miliequivalentes de CaCO₃ o en grados franceses (1 grado francés = 10 mg/L de CaCO₃).

Detergente: Sustancia empleada en la limpieza, por sus propiedades emulsionantes de las grasas. Sustancia que posee una porción no polar (hidrofóbica) y una parte polar (hidrofilica) que tiene la capacidad de disolver las grasas y aceites.

Ecosistema: Comunidad biótica y su ambiente abiótico funcionando como un sistema.

Efluente: Flujo de agua saliente proveniente de procesos industriales o productivos en general.

Escorrentía superficial: Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo.

Estandarización: Proceso por el cual se igualan condiciones de realización de una prueba.

Eutrofización: Aumento del contenido en nutrientes (especialmente los compuestos de nitrógeno y fósforo) de una masa de agua que

provoca un crecimiento explosivo de algas y otros organismos, afectando su función ecológica.

Especie indicadora: “especie (o conjunto de especies) que tienen un particular requerimiento en relación de variables físicas o químicas, tales que los cambios en la presencia/ausencia, número, morfología, fisiología o de comportamiento de esas especies indican que las variables físicas o químicas consideradas, están por fuera de los límites acostumbrados o normales.

Evapotranspiración: Proceso conjunto de evaporación de agua desde el suelo y de la transpiración de las plantas a través de sus estomas.

Exactitud: Es el grado de aproximación entre el valor obtenido experimentalmente y el valor real o aceptado; normalmente se expresa en términos de error. Se tienen de referencia los Patrones preparados en el laboratorio, y por lo menos un patrón externo Certificado.

Filtración: Proceso de separación de un sólido suspendido en un líquido al hacerlo pasar a través de un medio poroso con un tamaño de poro adecuado.

Fitoplancton: microalgas cuyo tamaño fluctúa entre 5 μm a 500 μm . Se distribuyen preferentemente en pozones y zonas potámicas como epilíticas.

Gases disueltos en el agua: El agua de precipitación contiene disueltos los mismos gases que la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, gases nobles) aunque en diferente proporción, en función de sus presiones parciales y solubilidad en el agua.

Hábitat: lugar donde vive un organismo.

Infiltración: Flujo del agua o de otro fluido a través de los poros de un cuerpo sólido. Flujo del agua a través del suelo.

Inóculo: volumen inicial de cultivo de microorganismos.

Integridad biológica: capacidad de un ecosistema acuático para soportar y mantener un balance integrado, una comunidad de organismos adaptada teniendo una composición de especies, diversidad y organización funcional comparable al del hábitat natural de una región.

Intercambio iónico: Sustitución de un ión por otro en la superficie de determinadas sustancias. Es posible tanto el cambio de cationes como de aniones. Las arcillas y la materia orgánica del suelo son cambiadores iónicos naturales que contribuyen significativamente en los procesos de depuración de las aguas que atraviesan el suelo y los acuíferos.

Limnología: Disciplina científica, parte de la ecología que estudia los ecosistemas acuáticos continentales.

Límite de detección (LD): Se define a partir de la más pequeña cantidad detectable por encima del ruido de un procedimiento y dentro de un límite declarado de aceptación; este último se establece de modo que las probabilidades de que se presenten errores de tipo I (falso positivo) y II (falso negativo) sean razonablemente pequeñas.

Limo: Fracción granulométrica comprendida entre 2 y 20 mm.

Lixiviar: Separar una sustancia soluble de la matriz que la contiene por efecto del agua.

Macroinvertebrado bentónicos: organismos invertebrados que habitan el bentos, por su tamaño son retenidos por redes de tamaño de apertura de malla entre 25-200 μm .

Macrófitas: Vegetación emergente o sumergida la cual está enraizada o flotante localizada en forma más abundante en zonas ribereñas.

Matriz: Medio o solución en que es disuelto un elemento o compuesto.

Matriz compleja: medio en que se encuentran disueltos o mezclados diferentes tipos de compuestos.

Medio oxidante: Medio en el que existen donadores electrónicos que pueden producir la oxidación de las especies reducidas.

Medio reductor: Medio en el que existen aceptores electrónicos que pueden producir la reducción de las especies oxidadas.

Necton: fauna de tamaño superior a 500 μm , poseen movilidad propia.

Neonato: etapa larval de microcrustáceos cladóceros, no supera las 48 horas de vida.

Nutriente: Sustancia necesaria para el crecimiento y mantenimiento de la actividad vital de los organismos.

Potamón es la zona en que las temperaturas medias mensuales ascienden a más de 20 °C, pueden haber deficiencias de oxígeno, la corriente es lenta de tipo más bien laminar y predomina en el lecho la arena o cieno.

Precisión: Indica el grado de concordancia entre los resultados obtenidos para réplicas de una misma muestra, aplicando el mismo procedimiento experimental bajo condiciones prefijadas. Usualmente se expresa en términos de la Desviación estándar (Ds) o Coeficiente de variación (CV).

Procesos redóx: Proceso químico de oxidación- reducción en el que una sustancia se oxida perdiendo uno o varios electrones, y otra se reduce ganando los electrones que perdió la sustancia oxidada.

Rápido: Tramo de río, entre dos pozas, con aguas corrientes someras, rápidas y turbulentas.

Raspador: Insecto acuático que se alimenta raspando la materia orgánica del substrato.

Recolectores: Grupo trófico de invertebrados que recogen partículas del fondo de los cursos de agua.

Recuperación: Es la capacidad que tiene un procedimiento analítico para determinar cuantitativamente una especie química que ha sido adicionada a una muestra.

Repetibilidad: es una medida de la precisión de datos obtenidos por un solo operador trabajando siempre en las mismas condiciones (equipos, materiales y reactivos).

Reproducibilidad: es una medida de la precisión de los datos obtenidos entre dos o más analistas y/o laboratorios que utilizan el mismo método y similares condiciones.

Ritrón región que se extiende desde las zonas de nacimiento del río, las temperaturas medias mensuales no ascienden a 20 °C, concentraciones de oxígeno elevadas, velocidades de corrientes altas y turbulentas y el lecho se compone de sustratos de bolones, piedras o grava con espacios ocasionales de arena o limo.

Saprobio: capacidad de ciertos organismos de vivir en determinados niveles de contaminación. Se distinguen tres niveles polisapróbico, mesosapróbico y oligosapróbico.

Sistema: conjunto de componentes que interactúan entre sí.

Sensibilidad: Es una medida del factor de respuesta del instrumento como una función de la concentración. Normalmente se mide como la pendiente de la curva de calibración.

Sensibilidad biológica: grado de susceptibilidad de un organismo a reaccionar con un determinado contaminante.

Sólidos en suspensión: Sólidos insolubles, de naturaleza orgánica o inorgánica, suspendidos la solución, pueden ser separados mediante técnicas físicas como la centrifugación, decantación o filtrado.

Tasa de crecimiento: Razón entre el crecimiento de un organismo y el tiempo en que éste se efectúa.

Tóxico de referencia: Sustancia química que provoca efectos tóxicos sobre organismos y que es utilizada para determinar el grado de sensibilidad de una cepa de bioensayos.

Usos extractivos o consuntivos: aquellos usos en los que el agua se extrae o consume de su lugar de origen (ríos, lagos, agua subterránea).

Usos no extractivos o no consuntivos: aquéllos usos que ocurren en el ambiente natural de la fuente del agua, sin extracción o consumo del recurso.

o.

ANEXO IV

TABLA DE METODOLOGÍAS PARA LA DETECCIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS

ANEXO IV: Tabla de metodologías para la detección de compuestos químicos

Metodologías para la determinación de los Compuestos o elementos químicos, que exige el Anteproyecto de Norma Secundaria de calidad ambiental para la protección de las Aguas Continentales Superficiales. Metodologías descritas en : “Standard Methods” for Examination of Water and Wastewater. 20th edition 1998. APHA-AWWA-WPCF.

| Compuesto o elemento | Metodología |
|-------------------------------------|---|
| Aceites y Grasas | 5520 C. Partición-infrared Method 5520 D. Soxhlet Extracción Method |
| Aldicarb | 6610B High-performance liquid chromatographic methods |
| Aluminio | 3500-Al B. Eriochrome Cyanine R Method 3111 D. Direct Nitrous Oxide-Acetylene Flame Method (AA) |
| Amonio | 4500-NH ₃ F. Phenate Method |
| Arsénico | 3500-As B. Silver Diethyldithiocarbamate Method 3114 B. Manual Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method (AA) |
| Bifenilos policlorados (PCBs) | 6431 B. Liquid-liquid Extracción Gas Chromatographic Method. 6431C Liquid-liquid Extracción Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method. |
| Boro | 4500-B B. Curcumin Method 4500-B C. Carmine Method |
| Cadmio | 3500-Ca B. EDTA Titrimetric Method 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method (AA) |
| Calcio | 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method |
| Carbofurano | 6610B High-performance liquid chromatographic methods |
| Cianuro | 4500 CN ⁻ E. Colorimetric Method |
| Clordano | 6630B. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method I 6630 C. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method II |
| Clorofila a | 10200 H Chrolophyll |
| Cloruro | 4500-Cl B. Argentometric Method 4110 Determination of Anions by Ion Chromatography |
| Cobre | 3500-Cu B. Neocuproine Method 3500-Cu C. Bathocuproine Method 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method (AA) |
| Color aparente | 2120 B. Visual Comparison Method |
| Coliformes fecales | 9221 Membrane fliter Technique for Members of the Coliform Goup. |
| Coliformes totales | 9221 Membrane fliter Technique for Members of the Coliform Goup. |
| Conductividad Eléctrica | 2510 B Laboratory Method |
| Cromo Total | 3500-Cr B. Colorimetric Method 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method (AA) |
| Cromo VI | 3500-Cr C. Ion Chromatographic Method |
| DBO ₅ | 5210 B. 5-Day Test |
| DDT | 6630 B. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method I 6630 C. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method II |
| Detergentes (SAAM) | 5540 B. Surfactant Separation by Sublation |
| Diclorometano (cloruro de metileno) | 6200 B Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromathographic/Mass Spectrometric Method. 6200 C Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromathographic Method. |
| Dureza | 2340 B. Hardness by calculation 2340 C. EDTA Titrimetric Method |
| Estaño | 3111B. Direct Air-Acetylene Flame Method |

ANEXO IV: Tabla de metodologías para la detección de compuestos químicos

| | |
|---|--|
| | 3113B. Electrothermal Atomic Absorption Spectrometric Method |
| Fluoruro | 4500-F ⁻ C. Ion-Selective Electrode Method |
| Fósforo | 4500-P E. Ascorbic Acid Method 4110 Determination of Anions by Ion Chromatography |
| Acido 2,4 diclorofenoxiacético (2,4-D) | 6640 B Micro Liquid-liquid Extraction Gas Chromatographic Method. |
| Hidrocarburos | 5520 F. Hydrocarbons |
| Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos | 6440 B Liquid-Liquid Extraction Chromatographic Method 6440 C. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method |
| Hierro | 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method (AA) 3500 Fe-B Phenantholine Method 3120 B. Inductively Couple Plasma (ICP) Method |
| Índice de fenol (fenoles) | 6420 B. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method |
| Magnesio | 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method |
| Manganeso | 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method |
| Mercurio | 3114 B. Manual Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method 3112 B. Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometric Method. 3125 B. Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) Method |
| Molibdeno | 3111 D. Direct Nitrous Oxide-Acetylene Flame Method (AA) 3120 B. Inductively Couple Plasma (ICP) Method 3125 B. Inductively Couple Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) Method |
| Níquel | 3111B. Direct Air-Acetylene Flame Method 3111C. Extraction/air-acetylene Flame Method 3113B. Electrothermal Atomic Absorption Spectrometric Method. 3120 B. Inductively Couple Plasma (ICP) Method 3125 B. Inductively Couple Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) Method |
| Nitrógeno orgánico | 4500-N C. Persulfate Method |
| Nitrógeno Kjeldahl | 4500-NH ₃ F. Phenate Method |
| Nitrato | 4110 B. Ion Chromatography with Chemical Suppression of Eluent Conductivity. 4110 C. Single-Column Ion Chromatography with Electronic Suppression of Eluent Conductivity and Conductimetric Detection. |
| Nitrito | 4110 B. Ion Chromatography with Chemical Suppression of Eluent Conductivity. 4110 C. Single-Column Ion Chromatography with Electronic Suppression of Eluent Conductivity and Conductimetric Detection. |
| Oxígeno disuelto | 4500-O G. Membrane Electrode Method |
| Pentaclorofenol | 6420 B. Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method 6640 B. Micro Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method |
| Pesticidas organoclorados (Aldrín, Lindano, Heptaclor, Dieldrín, Captán, DDT, Clordano, Paratión, Trifluralina) | 6630 B. Liquid-liquid Extraction Gas Chromatographic Method I 6630 C. Liquid-liquid Extraction Gas Chromatographic Method II 6630 D. Liquid-liquid Extraction Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method |
| Ph | 4500-H ⁺ B. Electrometric Method |
| Plomo | 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method (AA) 3113 B Electrothermal Atomic Absorption Spectrometric Method 3125 B. Inductively Couple Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) |

ANEXO IV: Tabla de metodologías para la detección de compuestos químicos

| | Method |
|------------------------------|---|
| Productividad primaria | 10300 D. Primary Productivity |
| Selenio | 3114 B. Manual Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method 3114 C. Continuous Hydride generation/Atomic Absorption Spectrometric Method 3113 B. Electrothermal Atomic Absorption Spectrometric Method |
| Sodio | 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method (AA) 3500-Na B. Flame Emission Photometric Method 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) Method 3125 B. Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) Method |
| Sólidos disueltos | 2540 C Total dissolved Solids dried at 180°C. |
| Sólidos suspendidos | 2540 D. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C |
| Sulfato | 4500-SO ₄ ²⁻ Turbidimetric Method 4110 Determination of Anions by Ion Chromatography |
| Sulfuro | 4500-S ²⁻ D. Methylene Blue Method 4500-S ²⁻ F. Iodometric Method |
| Temperatura | 2250 B Laboratory and Field Method |
| Tetracloroetano | 6200 B. Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method 6232 B Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatographic Method |
| Tetracloruro de carbono | 6200 B Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method. 6200 C Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromatographic Method. |
| Tolueno | 6200 B Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Method. 6200 C Purge and Trap Capillary-Column Gas Chromatographic Method with PID only. |
| Zinc | 3111B. Direct Air-Acetylene Flame Method 3111C. Extraction/air-acetylene Flame Method 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) Method 3125 B. Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry (ICP/MS) Method |
| Aldicarb [CAS 116-06-3] | Method 531.1 (3ª revisión, 1989) Measurement of N-methylcarbamoyloximes and N-methylcarbamates in water by direct aqueous injection HPLC with post column derivatization. |
| Atrazina [CAS 1912-24-9] | Method 507 (2ª revisión, 1989) Determination of nitrogen- and phosphorus- methylcarbamoyloximes and N-methylcarbamates in water by direct aqueous injection HPLC with post column derivatization. |
| Carbofurano [CAS 1563-66-2] | Method 531.1 (3ª revisión, 1989) Measurement of N-methylcarbamoyloximes and N-methylcarbamates in water by direct aqueous injection HPLC with post column derivatization. |
| Clorotalonil [CAS 2921-88-2] | Method 508 (3ª revisión, 1989) Determination of chlorinated pesticides in water by gas chromatography with an electron capture detector. |
| Cyanazina | [Method 507 (2ª revisión, 1989)] [Determination of nitrogen- and phosphorus- methylcarbamoyloximes and N-methylcarbamates in water by direct aqueous injection HPLC |

ANEXO IV: Tabla de metodologías para la detección de compuestos químicos

| | |
|-----------------------------------|--|
| | with post column derivatization] |
| Simazina [CAS 122-34-9] | Method 507 (2ª revisión, 1989) Determination of nitrogen- and phosphorus- methylcarbamoyloximes and N-methylcarbamates in water by direct aqueous injection HPLC with post column derivatization. |
| Demeton | Hydrolysis alkaline determining the acid release. CIPAC Handbook 1970.1,312 |
| Diclofop-metil | GLC analysis. CIPAC Handbook, 1985,1c, 2096 |
| Dimetoato | GLC analysis CIPAC Handbook , 1992, e, 69-72 |
| N-dealkil metabolitos de atrazina | ECD or FID analysis B.G.Tweedy R.A. Kahrs, 1978, 10, 493 |
| Transparencia | Disco Secchi |
| Mercurio | Method 1631 Mercury in Water by, Oxidation, purge and Trap, and Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry (CVAFS) |
| Elementos traza | Method 1638. Trace Elements in Ambient Waters by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. (ICPMS) |
| Metales traza | Method 1669. Sampling Ambient Water for Trace Metals. |
| Metales traza | Trace Metal Cleanroom. EPA 600/R/96/018 |
| Amoniaco | Method 350.1. Determination of ammonia nitrogen by semiautomater colorimetry. Revisión 2.0 August 1993 |
| Calcio | Method 200.7 Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively couple plasma atomic emission spectrometry. Revision 4.4 1994 |



Pedro F. Enríquez. (pedro.enriquez@sag.gob.cl)

Bioquímico, U. de Valparaíso; Ingeniero Civil en Bioquímica, U. de Valparaíso; Post- Título en “Metodologías en Análisis de Contaminantes Ambientales” I.M.A Universidad de Santiago. Actualmente es Jefe Subdepartamento de Química Ambiental y Alimentaria (SAG), Lab. Toxicología Ambiental. Ha participado en CONAMA en estudios y elaboración de Normas Ambientales; en el programa nacional de evaluación y control de la contaminación hídrica, medio agropecuario; implementación de programas de fiscalización, y aplicación de métodos analíticos instrumentales y ecotóxicológicos en la determinación de sustancias químicas contaminantes; en el desarrollo y aplicación de modelos (USEOA/CEE) para la evaluación de riesgo ambiental de vertidos contaminantes sobre el medio agropecuario. Proyecto Chile – Canadá “Transferencias de tecnología para mejorar el uso y manejo de plaguicidas en la agricultura chilena” 1998-2001, aplicación de normas ISO y GLP en la operación del Laboratorio de Toxicología, e implementación y aplicación de métodos instrumentales para el análisis de residuos de plaguicidas. Formó parte del Comité de Evaluación de Registros de Plaguicidas SAG. (1999-2003), en la aplicación de modelos USEPA/CEE en el análisis y caracterización de riesgo ambiental y toxicólogo de productos fitosanitarios, y en la supervisión de laboratorios analíticos de residuos de plaguicidas.



Manuel A. Leiva Guzmán. (manleiva@cenma.cl)

Jefe Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental, Centro Nacional del Medio Ambiente Profesor Instructor, Centro de Química Ambiental, Facultad de Ciencias U. de Chile Licenciado en Ciencias, U de Chile; Doctor en Química, U. de Chile. Post doc, Centro de Química Ambiental, Fac. de Ciencias U. de Chile. Su quehacer científico y docente se ha enmarcado en las áreas de la Físico-química molecular y en el de las Ciencias Ambientales, principalmente en el campo de la Química Atmosférica. Dicta y ha dictado cursos de pregrado y postgrado, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. Participo como autor en capítulos del libro “Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en la Ciudad de Santiago” (en edición) y tiene publicaciones científicas en revistas de corriente principal. Ha recibido honores académicos tales como Beca CONICYT de doctorado; Medalla Doctoral de la U. de Chile y APRU Collaborative Research Paper Award (2004). Ha participado y participa en proyectos FONDECYT, FDI-CORFO y proyectos internacionales en conjunto con JICA. Así mismo ha realizado auditorias en laboratorios de ensayo y consultorías en el ámbito medio ambiental



Maribel V. López Sanhueza, (marilopez@cenma.cl)

Bióloga, Lic.Biología, U. de Concepción. Se ha desempeñado en el área de Biología Molecular siendo ayudante de investigación en proyectos tales como: “Molecular Analysis of Breast Cancer Susceptibility”, U. Washington – Lab. de Genética Molecular Humana, Fac Medicina, U. de Chile; “Caracterización cinética y estructural del plegamiento de la Tubulina”, “Estabilidad y mecanismo de plegamiento de FtsZ y Tubulina, y su relación con la actividad GTPasica en el control de la polimerización”. Lab. Biología Estructural y Molecular, Fac. Ciencias, U. de Chile; “Uso de Bioindicadores y Bioensayos como medida de condición biológica de un cuerpo de agua”, “Programa de Monitoreo de la Calidad del agua del Río Tinguiririca y Estero Zamorano”, Lab. Bioensayos y Microbiología, CENMA. Cuenta con publicaciones en “Pesquisa Molecular y Clínica del Síndrome de X-Frágil en 300 Pacientes con Retardo Mental Inespecífico”. Rev. Med. Chile 1998, “Síndrome de X-Frágil: Análisis Clínico en 300 Pacientes con Retardo Mental Inespecífico en la Población Chilena”. Rev. Med. Chile 1998; “Fluorecense resonance energy transfer and molecular modeling studies on 4',6'diamidino-2-phenylindole (DAPI) complexes whith tubulina. Protein science, vol 15pp410 419, 2006. Actualmente se desempeña como Encargada de Bioensayos y Equipos en el Laboratorio de Bioensayos y Microbiología de CENMA



Marly A. López Correa (mlopez@cenma.cl)

Químico Ambiental, Lic. Ciencias Ambientales mención en Química, U. de Chile. Actualmente cursa el Magíster en Gestión y Planificación Ambiental, U. de Chile. Ha realizado cursos de especialización en el área de gestión de calidad tales como: Auditorías Internas bajo ISO 17025 en INN, Sistemas de Calidad para Laboratorios Químicos y Acreditación Integral de acuerdo a la Norma ISO 17025 y Gestión de Pruebas de Aptitud Analíticas en CSI Environment Canadá. En el área de gestión ambiental ha participado en cursos de Auditoría Ambiental bajo el modelo ISO 14001 y de Sistemas de Gestión Ambiental bajo el modelo ISO 14001. Actualmente se desempeña como Coordinadora de Calidad Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental, CENMA.



Mª Ximena Molina Paredes. (xmolina@cenma.cl)

Lic. Biología, U. de Concepción. MCs Biológicas mención Ecología, U. de Chile. Encargada de Coordinación de Proyectos Hídricos en el Lab. Bioensayo y Microbiología CENMA. Académico en la Fac. de Ciencias, U de Chile. Ha participado en una serie de proyectos y estudios en temas de medioambiente y ecología en sistemas acuáticos, tales como: Fotobiología; Diagnóstico ambiental para planes de Gestión de calidad de aguas; Bioensayos y/o Bioindicadores para evaluación de calidad de aguas; dicta cátedra en asignaturas de Biogeoquímica, Sistemas e Instrumentos de Gestión, Contaminación Ambiental, Limnología, Ecología, Impacto Ambiental, Gestión Ambiental. Posee publicaciones en temas de Biología de algas, Ecología y Fotobiología. Ha sido Profesor Guía de Tesis en temas de Ecología acuática, Evaluación de calidad de aguas continentales y Determinación de metales pesados en sedimentos, Fac. de Ciencias, Escuela de Ciencias Ambientales, U de Chile. Ha participado en el área de la gestión en temas de: Gestión del recurso hídrico, la familia ISO 14000 y auditorías ambientales desarrollando capacitación a nivel nacional e internacional y participado en el proceso normativo ante el INN, en la etapa de Consulta Pública, NCh-ISO 14001.cR2005 e ISO 14001:2004 Sistemas de gestión ambiental – Requisitos con orientación para su uso.



Ana Mª Mora Tapia, (amora@cenma.cl)

MCs Biológicas mención Botánica, U. de Concepción. Profesora de Biología y Ciencias Naturales, Lic. Educación UMCE. Colaboradora externa del Museo Nacional de Historia Natural en el área Ficología. Presenta especialización en la Universidad de Konstanz, Alemania, en cultivo *in vitro* y biología de la reproducción en macroalgas, biología molecular y en la Universidad de Berna en Quimiosistemática. Docente universitaria en cátedras como Cultivo de Algas, Ficología, Botánica Marina, Botánica Sistemática, Biología Celular, Biología Vegetal (General y Sistemática). Ha participado en proyectos tales como: “Diferencias en la capacidad de bioconcentración de arsénico en cultivos unialgales clonales de *Hinckia mitchelliae* (Harvey) Silva. Libro de resúmenes de XXIII Congreso de Ciencias del mar”. Uso Bioindicadores y Bioensayos como medida de condición biológica de un cuerpo de agua”, : “Programa de Monitoreo de la Calidad del agua del Río Tinguiririca y Estero Zamorano”; Determinación de Contenidos Algales estomacales del chitón *Plaxiphora mecatoris*, Isla de Pascua.; Tiene participación en diversas publicaciones en temas de: Biodiversidad; Ficología; Ecotoxicología.



M^a Isabel Olmedo Castro. (miolmedo@cenma.cl)

Licenciada en Ciencias mención Biología y Magíster en Ciencias Biológicas con mención en Genética, ambos obtenidos en la Universidad de Chile, se desempeña actualmente como Jefe del Laboratorio de Bioensayos del Centro Nacional del Medio Ambiente.

Junto con asumir a jefatura de la Unidad de Bioensayos de CENMA, ha asumido la jefatura de importantes proyectos de carácter nacional orientados a mejorar la normativa nacional vigente relacionada con la calidad de las aguas entre los que se cuenta “Desarrollo de un modelo para el uso de bioindicadores y bioensayos como medida de la condición biológica de un cuerpo de agua” financiado por FONSAG. ; Jefe del proyecto “Programa de Monitoreo de la Calidad del agua del Río Tinguiririca y Estero Zamorano”; y participación en Diagnóstico ambiental para planes de Gestión de calidad de aguas; Análisis económico y social de normas de emisión. Ha sido coinvestigadora en proyectos FONDECYT financiados por el Estado de Chile. También tuvo una destacada Participación en el Proyecto milenio “Estudios avanzados en biología celular y biotecnología”. Ha participado en el proceso normativo: NCh 2726-2002 “Guía para la acreditación de laboratorios que realizan ensayos microbiológicos” Posee publicaciones en el ámbito de la Biología celular y Ecología acuática en revistas nacionales e internacionales. En 2000 realizó una estadía en Suiza, Ginebra en la empresa de Biotecnología Serono, para manejar técnicas de cultivo, clonación y biología molecular. A participado como docente en varias Universidades y ha sido tutoras de diferentes tesis de Magister y pregrado.



Rodrigo Pardo Luksic. (rodrigo@abulafia.ciencias.uchile.cl)

Biólogo Marino, U. del Norte; MCs Biológicas, mención Ecología y Biología Evolutiva. U. de Chile. Dr (c) Cs Biológicas, mención Ecología y Biología Evolutiva. U. de Chile. Ha participado en proyectos en las áreas de Limnología, ecológica, conservación y biodiversidad de fauna íctica y de modelación aplicado a lagos, ríos y bofedales; y en estudios de impacto ambiental en sistemas acuáticos Posee publicaciones en el área de ecología, eutrofización y salinización de lagos, en especial lagos de altura; biología y ecología de fauna íctica y biodiversidad. Ha dictado cátedra de

Ecología y Modelación Aplicada a las carreras de Ecología y Biogeoquímica de la U. de Chile.



Raquel Peñaloza Cabrera. (raquelpenaloza@gmail.com)

Profesora de Biología y Ciencias Naturales, U. de Chile. Postgraduate Training Course in Limnology. Academia de Ciencias, Austria – U. de Viena. MCs Biológicas mención en Ecología, Fac. de Ciencias Básicas, U. de Chile. Profesor Asociado, U. Metropolitana de Ciencias de la Educación. Ha dictado cátedra en Ecología y Metodologías de Investigación. Ha publicado en temáticas de: metodologías educacionales, toxinas de microalgas, producción secundaria, insectos bentónicos. Ha dirigido numerosos proyectos en reservas nacionales, en el precordillerano

mediterráneo de Chile, en temas de: Diseños de senderos de interpretación ambiental; implementación de estrategia metodológica para el conocimiento y valoración del patrimonio natural; biodiversidad; y estudio de colonización de entomofauna bentónica.



Luciano Rodríguez Ortega. (lrodriguez@udelmar.cl)

Ingeniero Pesquero de la U. Católica de Valparaíso. Director del laboratorio TCI de la U. del Mar. Sus áreas de interés son la utilización de herramientas del área de la Inteligencia Artificial a la resolución de problemas complejos, principalmente en el ámbito de los recursos naturales. En este contexto utiliza ANN, PNN, Lógica Difusa o Borrosa.



María Catalina Sabando Gómez. (mcsabando@yahoo.es)

Lic. Biología, U. Metropolitana de Ciencias de la Educación. Estudiante del programa de doctorado de Ecología y Biología Evolutiva (EBE). Becaria Mecesus (UNC0204A012), Fac. de Ciencias Básicas. U. de Chile. Profesor Instructor, U. Metropolitana de Ciencias de la Educación. Se ha especializado en el área de Ecología de poblaciones y comunidades de sistemas fluviales. Ha participado en numerosos proyectos en reservas nacionales, en el precordillerano mediterráneo de Chile, en temas de: Identificación y Valoración del Patrimonio Natural; Biodiversidad. Posee una serie de publicaciones en el área de Comunidades Bentónicas.



Irma Vila Pinto. (limnolog@uchile.cl)

Limnóloga. U. de Chile. Master of Sciences. Ohio State University USA. Profesor Asociado, Directora Depto. Ecología, U. de Chile. Profesora de Biología y Química, U de Chile. Ha dirigido proyectos de investigación en el área de Limnología. Ha contribuido al conocimiento de los lagos en Chile, tales como: La Paloma, Rapel, Chungará; ríos, vegas y bofedales de Chile. Ha coordinado proyectos tales como: Monitoreo y Manejo de Biodiversidad Acuática en Sistemas Altiplánicos; Proyecto de obtención de Información de Fauna Acuática Continental de la I, II y III región de Chile; Uso de Bioindicadores y Bioensayos como medida de la condición biológica de un cuerpo de agua; Proyecto Integrated Ecological Coastal Zone Management System. ECOMANAGE. Union Europea; Proyecto Red de Eutrofización Sudamericana- EUTROSUL. Academia de Ciencias, Brasil. Ha colaborado activamente con diversos servicios públicos del país tales como Dirección General de Agua (DGA); Servicio Agrícola Ganadero (SAG); Servicio Nacional de Pesca (Sernapesca). Ha sido Coordinador de la Red XVII B Iberoamericana de Eutrofización de lagos y embalses. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), España-CONICYT-Chile. Posee una serie de publicaciones en temáticas de: Biología de fauna acuática en especial íctica; ecología; conservación de la biodiversidad en fauna acuática; manejo de embalses; impactos ecológicos en ecosistemas acuáticos de montaña; eutrofización; Interacciones sedimento-agua; ecotoxicología acuática. Ha sido editora del libro: 2005. Vertebrados de los sistemas límnicos de Chile. Editores: I. Vila, A. Veloso, R. Schlatter, C. Ramírez y W. Sielfeld. (en revisión).