

# Artículos

## Los peces, centinelas de los ambientes acuáticos

\* Virginia Haydée Martínez

\* IBIGEO-CONICET y Facultad de Ciencias Naturales-UNSa.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en su informe del 2010, sobre la pesca y la acuicultura señala que los principales problemas que están afectando a los ambientes acuáticos continentales son: la industrialización, la urbanización, la deforestación, los usos agrícolas de la tierra y la extracción minera. Este conjunto de impactos antrópicos constituyen la mayor amenaza para la vida de los peces y la producción pesquera continental.

Los peces constituyen un recurso alimenticio fundamental para el hombre, para otros animales y también un enorme patrimonio en biodiversidad. Son vertebrados exclusivamente acuáticos y desde hace algunos años se han convertido en los organismos más adecuados para evaluar los efectos de la contaminación y por ello se los considera los centinelas de los cuerpos de agua. Los peces se encuentran en la parte superior de la red alimentaria y a lo largo de su desarrollo incorporan y acumulan las sustancias tóxicas.

La supervivencia de las poblaciones de peces se ve afectada por diversos factores que en algunas situaciones se pueden determinar y así tomar medidas correctivas para prevenir pérdidas futuras. En las mortandades que han sido documentadas, las causas más comunes son las relacionadas a vertidos de efluentes municipales (cloacales y domiciliarios), actividades agrícolas e industriales. Entre las causas naturales, la disminución del oxígeno durante el invierno o verano puede ser un problema frecuente a lo que se suma, en los últimos años, las bajas extraordinarias de temperatura.

Los ríos transportan naturalmente materiales de diversos orígenes (Figura 1), por ejemplo: sólidos disueltos producto de la erosión de rocas, aporte atmosférico, lavado de suelos orgánicos, etc. y los derivados de la actividad humana. En los embalses, lagunas, estuarios y en aguas oceánicas se está registrando una acumulación de productos químicos, como pesticidas, metales pesados y materia orgánica, que están modificando seriamente las condiciones para la vida de los peces como la de los otros organismos acuáticos (Figura 2).

Otro aspecto que incide sobre la salud de las comunidades de peces es el cambio climático que provoca alteraciones en el ritmo y cantidad de lluvias y cambios extremos en las temperaturas. En las zonas templadas, el aumento progresivo de la temperatura de los ríos, lagos y océanos pone en peligro la supervivencia de la fauna de peces (ictiofauna), mientras que en regiones tropicales y subtropicales, los registros de temperaturas bajas prolongadas en el aire y en el agua afectaron de manera particular a diferentes especies que no toleran el frío, produciéndose mortandades masivas durante julio de 2010 en Argentina, Bolivia, Uruguay y Brasil.

Cuando los peces se ven afectados por cambios en su entorno, disminuyen sus defensas, son más vulnerables a patógenos y desarrollan enfermedades que alteran su crecimiento y reproducción.

Con el gran incremento de la actividad humana de los últimos años, los ambientes acuáticos han estado sujetos a diversos tipos de alteraciones (ver Cuadro 1) producto de las descargas químicas, tanto inorgánicas como orgánicas (Tabla 1). Hoy existen métodos de análisis para saber qué contienen los diferentes efluentes. Muchos de estos productos son asimilados por los organismos acuáticos porque pueden alcanzar concentraciones más elevadas. La contaminación de ríos, estuarios, aguas costeras y océanos y la consiguiente biocumulación en los organismos acuáticos presentan un riesgo creciente para la vida silvestre y los seres humanos. Esto ha llevado a desarrollar una nueva disciplina, el biomonitoreo ambiental, que estudia a los organismos vivos en su ambien-



**Figura 1.** Los ríos naturalmente transportan materiales de diversos orígenes y actualmente los derivados de la actividad humana como aguas residuales provenientes de los efluentes cloacales, industriales, de irrigaciones agrícolas, canalizaciones, relleno de zonas húmedas; éstos en la mayoría de los casos se vierten directamente a la red hidrográfica sin depuración, provocan un gran impacto en la biota.

#### CUADRO 1

La agricultura es la responsable del drenaje de los humedales ya que provoca la extracción de enormes cantidades de agua mediante el riego y la interrupción de la conectividad entre los ríos y las zonas de anegación. Estas últimas son uno de los hábitats más productivos de la pesca continental, en especial en zonas tropicales, y por esta razón la expansión agrícola está provocando en ellas una alteración progresiva. La ampliación de la frontera agropecuaria, con el desmonte que la acompaña, aumenta la erosión y la sedimentación de las cuencas hidrográficas.

La frecuente canalización de los ríos para satisfacer las necesidades originadas por el incremento de las poblaciones urbanas implica un aumento de la cantidad de agua destinada a fines industriales y municipales. El exceso de efluentes procedentes de las zonas urbanas y de la agricultura, con productos químicos y residuos nocivos, pueden contaminar y provocar la eutrofización (abundancia anormalmente alta de nutrientes) de las aguas continentales afectando el crecimiento y produciendo la mortalidad de las especies acuáticas y/o generando una acumulación de toxinas en los organismos que se pueden transmitir a los consumidores.

La producción de energía hidroeléctrica mediante la creación de presas modifica la calidad y la cantidad de agua disponible para la pesca continental. Con frecuencia, las presas crean barreras infranqueables para los peces que dan lugar a hábitats fragmentados donde los peces no pueden acceder a las zonas cruciales para sus ciclos de vida.

La actividad minera provoca alteraciones en los caudales principales y los niveles de agua; y también por la descarga de sedimentos derivados de procesos de construcción de las plantas, la extracción de minerales y el uso de productos químicos para el tratamiento de los minerales. La toxicidad de estos vertidos procede del elevado nivel de metales pesados, particularmente mercurio y cianuro (minería del oro), plomo, zinc, cobre, estaño, cadmio que aportan al agua, del bajo pH y de la pérdida del oxígeno disuelto al ser consumido por la oxidación de los sulfuros metálicos que arrastran estos lixiviados (Kirschbaum y Murray, 2011: **Temas BGNoa 1: 40–51**).

Todas estas circunstancias pueden afectar el estado y condición de los organismos acuáticos, como así también la estructura, composición y distribución de las comunidades acuáticas.

SUSTANCIA	FUENTE
Aceites	Refinerías de petróleo, talleres mecánicos, fábricas de productos orgánicos
Ácidos	Industria química (baterías, cerveceras, agroquímicos) y efluentes mineros
Alcalis	Industria textil
Arsénico	Agroquímicos (fosfatos, fertilizantes, desinfección de ganado)
Cadmio	Metalurgia y fertilizantes fosfatados
Cloruros	Fábricas de papeles, fábricas blanqueadoras, lavaderos
Cromo	Metalurgia, curtiembres, industria del caucho
Cobre	Metalurgia e industria textil
Cianuros	Metalurgia y producción de gas
Fenoles	Industria petroquímica (resinas sintéticas, extracción y refinerías de petróleo, destilación de brea), industria química (fábrica de gaseosas), industria textil, curtiembres, metalurgia, fabricación de vidrio e industria del caucho
Fluoruros	Fertilizantes fosfatados, limpieza de tuberías de gas, grabados de vidrios
Formaldehído	Obtención de resinas sintéticas y producción de antibióticos
Plomo	Industria química (pinturas, baterías)
Mercurio	Industria química y petroquímica (cloruros, soda cáustica, fungicidas, pinturas, plásticos, papel, cosméticos, farmacéuticos) y en equipamientos eléctricos
Níquel	Metalurgia
Selenio	Electrónica, instrumental, producción de vidrios y gomas
Sulfuros	Curtiembres, industria del caucho, industria textil y producción de gas
Sulfitos	Industria celulósica (pulpa de papel)
Titanio	Industria petroquímica (plásticos), industria química (pigmentos para pinturas), industria celulósica y del vidrio
Zinc	Metalurgia, industria textil, industria del caucho

**Tabla 1.** Sustancias tóxicas presentes en distintos tipos de efluentes industriales, modificado de Hellawell (1988)

te a nivel de ecosistemas, comunidades, poblaciones, individuos, tejidos o células. Para ello se establecen una serie de indicadores para un efectivo trabajo de control (protección) de los ecosistemas que permiten así conseguir un primer nivel de valoración de la salud de un ambiente.

## BIOMONITOREO

Los métodos biológicos de monitoreo permiten obtener una variedad de información que puede incluir: genotoxicidad, lesiones en el sistema nervioso de los animales, estrés en plantas y animales, daño celular, reacciones sinérgicas y antagó-

nicas causadas por mezcla de contaminantes, etc. Además, dan información regional acerca del estado de contaminación y una alerta temprana cuando sus efectos son subletales.

El biomonitoreo se realiza a través de indicadores, busca señales como respuestas bioquímicas, fisiológicas, morfológicas, histopatológicas que indican que existió exposición a contaminantes y permite así “estimar o predecir la exposición química y/o sus efectos a niveles superiores de organización”. El biomonitoreo sirve para relacionar causas y efectos entre la exposición ambiental y las respuestas biológicas. En este contexto, los peces se han convertido en los organismos modelo, totalmente acuáticos y de mayor tamaño, para evaluar

las respuestas biológicas dependientes de cada tipo y nivel de la contaminación.

## INDICADORES DE ESTRÉS

Cuando el entorno cambia los organismos ponen en marcha una serie de mecanismos adaptativos para restablecer el equilibrio. El síndrome de estrés es un conjunto de respuestas fisiológicas que los organismos activan frente a estresantes (por ejemplo, alteraciones ambientales). El síndrome de estrés en sí mismo no es ni bueno ni malo, más bien depende de la capacidad de respuesta del individuo frente a esa nueva situación. Un episodio de estrés es una fuerza potencial de cambio significativo en la salud de las poblaciones, las alteraciones fisiológicas resultantes pueden determinar un aumento de la morbilidad y mortalidad de la población, o pueden disminuir la capacidad productiva y reproductiva y convertirse en problema de conservación de los recursos biológicos.

Un estrés letal o agudo ocurre en respuesta a perturbaciones a corto plazo como los derrames químicos y/o cambios radicales en factores ambientales (temperatura, oxígeno disuelto).

El estrés subletal o crónico es más común y se manifiesta a diferentes niveles de organización, desde el celular al de los ecosistemas. Generalmente el estrés subletal se expresa primero a nivel bioquímico, genético y celular e induce una serie de cambios estructurales y funcionales en los organismos que puede tener efectos en su habilidad para sobrevivir. Si los períodos de exposición son de larga duración y descontrolados, pueden tener un efecto devastador sobre los individuos o poblaciones.

En el agua, el nivel de concentración de materia orgánica, metales pesados, organoclorados, organofosforados, hidrocarbonados aromáticos cíclicos, etc. está aumentando, ¿Cómo responden los peces? ¿Qué mecanismos se ponen en acción? ¿Qué influencia tienen sobre las funciones, en particular la reproducción? ¿Se potencian o se anulan? ¿Qué efectos tienen a largo plazo? ¿Dónde se acumulan? ¿Tienen efectos mutagénicos? Estos son algunos de los interrogantes que hay que responder.

Para medir los efectos de la contaminación se emplean una serie de indicadores biológicos que indican la presencia y magnitud de las respuestas al estrés.

## INDICADORES BIOQUÍMICOS

Los indicadores bioquímicos detectan aumento de niveles en la producción de compuestos biológicos en respuesta a estrés ambiental. El hígado es un órgano multifacético y entre sus numerosas funciones está el de desintoxicar. Las células en general y en especial las del hígado sintetizan enzimas desintoxicantes como la glutato S sintetasa (GSP), citocromo P450, monooxidasas, por citar algunas. Estas enzimas inmovilizan las sustancias tóxicas y transforman los metabolitos y drogas en compuestos hidrosolubles que luego son eliminados por orina. Muchos xenobióticos (compuestos ajenos al organismo) inducen la producción de estas enzimas que originalmente están presentes en las células para contrarrestar el metabolismo oxidativo.

Los procesos de desintoxicación se llevan a cabo en el retículo endoplasmático liso (REL) dentro de las células hepáticas. En presencia de metales pesados, hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) y bifenilos policlorados (PCB) se detecta un aumento en la síntesis de estas enzimas.

Las células animales poseen proteínas que regulan la actividad de los metales dentro de las células. Las metalotioninas (MTs) constituyen una familia de proteínas de bajo peso molecular ricas en cisteína que nuestras células sintetizan inducidas por una variedad de iones metálicos. En situaciones de intoxicación con metales pesados, el nivel de metalotioninas se eleva y representa un indicador bioquímico específico para la detección temprana de posibles efectos de metales pesados en los organismos y en el medio acuático. Las metalotioninas juegan un papel fundamental en la homeostasis (equilibrio) de los metales esenciales como el cobre (Cu), zinc (Zn) y están involucradas en la desintoxicación de metales no esenciales como el cadmio (Cd) y el mercurio (Hg). Las metalotioninas parecen ser agentes antioxidantes eficaces y ejercerían un papel protector de las células; por esta razón se consideran indicadores de estrés por contaminación con metales pesados y otras especies reactivas del oxígeno.

Medir la actividad de la enzima acetilcolinesterasa (AChE) permite determinar exposición y grado de penetración de pesticidas en los ecosistemas acuáticos y valorar el estado fisiológico de los peces. La enzima acetilcolinesterasa favorece la sinapsis y transmisión de impulsos nerviosos. Muchos pesticidas como los compuestos organofosforados, carbamatos, metales pesados, detergentes y toxinas de algas inhiben la acción de esta enzima, impidiendo la hidrólisis de la acetilcolina. La inhibición de la acetilcolinesterasa da lugar a una transmisión



**Figura 2.** Las causas más comunes de mortandad de peces son las relacionadas a vertidos de efluentes municipales (cloacales y domiciliarios), actividades agrícolas e industriales, baja de oxígeno durante verano, bajas extraordinarias de temperatura. En la figura se observa una mortandad de pejerreyes del dique Las Lomitas, Salta, por vertidos de actividades agrícolas.

prolongada de los impulsos nerviosos y provoca una sobre estimulación de las células nerviosas que puede resultar en fallo respiratorio y muerte.

## INDICADORES CELULARES

La integridad de estructuras celulares como los lisosomas es un indicador temprano de estrés celular. Muchos contaminantes ambientales que ingresan al organismo son secuestrados dentro de las células en vesículas y retenidos dentro de los lisosomas. Estos organelos son estructuras fundamentales en la vida celular, degradan organelos dañados y digieren los materiales ingeridos por endocitosis y fagocitosis (procesos esenciales para poder disponer de materia prima). En situaciones de ayuno o lesiones celulares secuestran y digieren proteínas, retienen y acumulan una amplia gama y variedad de productos químicos y farmacéuticos, iones metálicos como hierro, cobre y mercurio, amianto, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), por nombrar algunos.

La membrana de los lisosomas encierra todo el material extraño y para ello es esencial que se mantenga estable. Los

contaminantes terminan afectando a la membrana de los lisosomas, acelerando los procesos de autofagia y conduciendo a lesiones celulares especialmente en el hígado. Tanto en las etapas de acumulación de sustancias extrañas como en las de alteración de las membranas de los lisosomas se acumula un pigmento denominado lipofucsina, que sirve para medir las respuestas a la perturbación del medio ambiente en peces y moluscos.

## INDICADORES HISTOPATOLÓGICOS

La histopatología es una herramienta muy valiosa porque analiza las modificaciones estructurales en diferentes órganos, permite medir el efecto de los contaminantes, estimar el grado de reacción, extensión del daño, órganos involucrados. Ha sido utilizada para evaluar el efecto tóxico de diferentes sustancias como pesticidas, metales pesados y fertilizantes en el ecosistema acuático. Los cambios morfológicos que se observan pueden ser respuestas bioquímicas y fisiológicas de los tejidos y células afectadas.

Los principales órganos de los peces en los cuales hay respuesta al estrés son la piel, las branquias, el hígado y el riñón. Las branquias son el principal sitio de respiración, siempre están en estrecho contacto con el agua y con posibles contaminantes asociados y, como consecuencia, los productos químicos pasan fácilmente a los epitelios y entran en la sangre. Las branquias realizan múltiples funciones, intercambio de gases, intercambio de iones, equilibrio ácido-base, excreción de residuos nitrogenados. En todas las funciones participan diferentes tipos de células, como por ejemplo células pavimentosas, células de cloruro, o células mucosas. Las branquias producen diferentes tipos de reacciones patológicas en respuesta a los contaminantes (Figura 3).

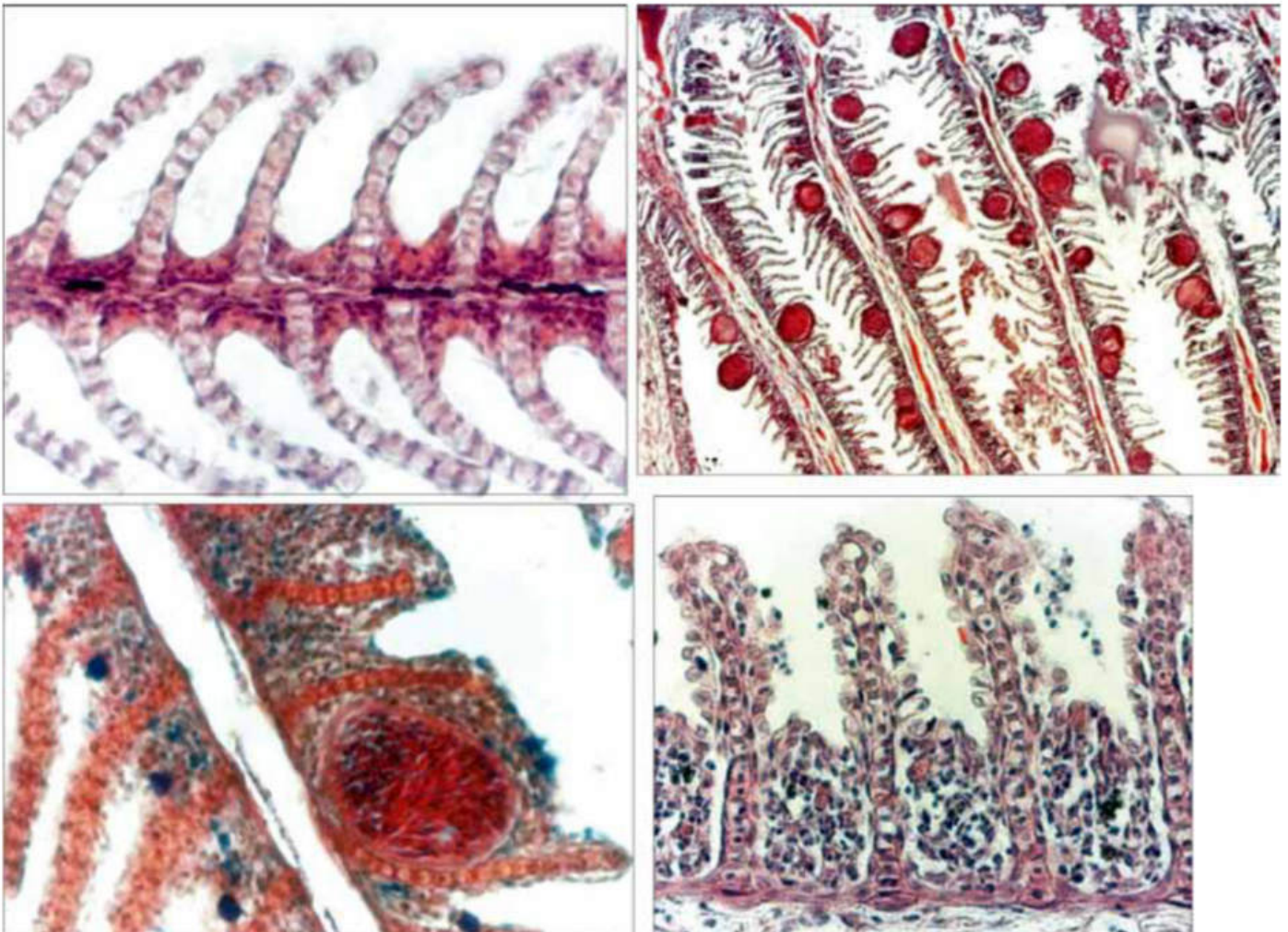
El hígado como principal órgano metabólico, juega un papel importante en la captación, acumulación, biotransformación y

desintoxicación de xenobióticos; reacciona a la exposición química no sólo modificando su estructura, sino a través de modulación funcional de enzimas metabólicas, biotransformación de productos o producción de proteínas de estrés.

El riñón es un órgano que se encuentra involucrado en el metabolismo y excreción de metabolitos y especialmente de contaminantes hidrofílicos (afines al agua), metales pesados y detergentes. La exposición a estresantes provoca la destrucción del sistema de filtrado.

## INDICADORES DE GENOTOXICIDAD

Una amplia gama de compuestos químicos tienen capacidad de producir alteraciones en el material genético ya que



**Figura 3.** Lesiones en branquias de peces del río Arenales. Arriba a la izquierda, aspecto de una branquia normal; las otras imágenes muestran branquias lesionadas, con quistes parasitarios, derrames, inflamaciones, desprendimientos y proliferación celular, en respuesta a continuos vertidos de efluentes domiciliarios e industriales.

provocan rupturas en la molécula de ADN y alteraciones estructurales como cambios cromosómicos y mutaciones, y también muerte celular, reducción de la fertilidad, producción de tumores, desarrollo anormal, desorden hormonal y/o alteración en la descendencia. A nivel de la población o ecosistema pueden producir la disminución o extinción de la población o cambios en su composición genética. Estos efectos se denominan genotóxicos.

Se han desarrollado una serie de indicadores que permiten medir efectos genotóxicos. En peces de agua dulce con niveles altos de metales pesados y pesticidas se realizan ensayos de genotoxicidad mediante el análisis de la presencia de micronúcleos en eritrocitos. Los glóbulos rojos de los peces son nucleados y la presencia de pequeños fragmentos de cromatina separados del núcleo (micronúcleos) sirven como evidencia de cromosomas dañados por agentes genotóxicos. Los micronúcleos se producen en todo tipo de células y se hacen evidentes después del proceso de división celular irregular, ya que un fragmento de cromosoma o todo un cromosoma se retrasa en la división con respecto al resto de los cromosomas y constituye un pequeño núcleo secundario. Un recuento de micronúcleos se considera un buen indicador de daño citogénico a corto plazo.

Una prueba complementaria es el ensayo de Cometa o electroforesis en gel de células individuales que permite detectar rupturas en las cadenas de ADN. Este ensayo consiste en someter los núcleos celulares a corrientes electroforéticas (separación de moléculas según su movilidad en un campo eléctrico) para poner en evidencia fragmentos dañados de ADN que migran fuera del núcleo y adoptan una apariencia de cometa que da origen al nombre de la técnica. Este ensayo es utilizado para el análisis de microlesiones y presenta ventajas respecto a los métodos citogenéticos por su alta sensibilidad y la posibilidad de evaluar células que no se encuentran en división.

## INDICADORES ECOLÓGICOS

Permiten evaluar de manera integral las condiciones de un ambiente determinando, en particular el Índice de Integridad Biótica (IBI por sus siglas en Inglés). Este índice está basado en una serie de atributos ecológicos de las comunidades de organismos, como presencia y ausencia, riqueza de especies, taxones indicadores (especies intolerantes y tolerantes), asociaciones tróficas, abundancia de especies, presencia de

enfermedades y anomalías. El IBI permite examinar la estructura y función de cada comunidad de forma integral. Cuando se analiza la riqueza y abundancia de especies se interpreta la estructura de una comunidad y cuando, por ejemplo, se evalúan los atributos tróficos, reproductivos y otras funciones, se establece el funcionamiento de la comunidad. A medida que los ambientes pierden calidad, la riqueza y abundancia de especies disminuyen. La determinación de los índices de integridad biótica de un ambiente permite establecer las relaciones entre los organismos y los factores ambientales.

## PARÁSITOS

Se ha comprobado la utilidad de analizar las comunidades de parásitos de peces como otro indicador de estrés ambiental. Las poblaciones de peces de ambientes deteriorados suelen aumentar la incidencia de parásitos debido a que pueden encontrarse inmunosuprimidos, haciéndolos más susceptibles a patógenos. Para ello se establecen índices de prevalencia, intensidad, abundancia y riqueza específica de los diferentes parásitos encontrados por especie y localidad.

**Cualquier actividad antropogénica puede generar cambios negativos sobre los ambientes acuáticos, sin embargo, el impacto podría reducirse notablemente con la implementación de medidas que minimicen los riesgos, como el mejoramiento en los estándares de técnicas de producción, extracción, protocolos y planes de contingencia, el control de las tasas de sedimentación, la reforestación ribereña y la prevención ante posibles derrames de residuos químicos.**

**La protección y restauración de los ambientes acuáticos es una responsabilidad de los entes gubernamentales y de la comunidad en general. Los monitoreos biológicos y químicos deberían acompañar el desarrollo de las diferentes actividades y no limitarse sólo a una evaluación de impacto al inicio de las actividades, de manera de establecer un control permanente del desarrollo de las diferentes actividades y así minimizar los posibles impactos en la biota.**

## LITERATURA CITADA Y RECOMENDADA

Casenave, J.; D. A. Wunderlin; A. C. Hued y M. A. Bistoni. 2005. Haematological parameters in a neotropical fish, *Corydoras paleatus* (Jenyns, 1842) (Pisces, Callichthyidae), captured from pristine and polluted water. *Hydrobiologia* 537: 25–33.

Colombo, J. C.; C. Bilos; M. Remes Lenicov; D. C. Colautti; P. Landoni y C. Brochu. 2000. Detritivorous fish contamination in the Río de la Plata estuary: a critical accumulation pathway in the cycle of anthropogenic compounds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57: 1139–1150.

Facey D.E., V. S. Blazer, M. M. Gasper y C. L. Turcotte. 2005. Using Fish Biomarkers to Monitor Improvements in Environmental Quality. *Journal of Aquatic Animal Health* 17: 263–266

FAO. 2010. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Organización de las naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 242 pp

Hellawell, J. M. 1988. Toxic substances in rivers and streams. *Environmental Pollution* 50: 61–85.

Kirschbaum, A., J. Murray. 2011. Minería y aguas ácidas: contaminación y prevención. **Temas BGNoa 1: 40–51**

Liber K., D.M. Janz y L.E. Burridge. 2008. Proceedings of the 35th Annual Aquatic Toxicity Workshop. Saskatoon, Saskatchewan. 199 pp.

Martínez, V.H. 2002. Histopatologías en branquias de peces siluriformes del río Arenales – Arias, provincia de Salta, Argentina. Tesis Magister Ecología Acuática Continental. Universidad Nacional del Litoral. 108 pp.

Paolini A. Berti M., D'Angelo A. y C. Giansante. 2005. Use of the histopathologic indicators on chubs (*Leuciscus cephalus*) and brown trout (*Salmo trutta fario*) in evaluating river environment. *Veterinaria italiana* 41: 189–198