

La industria de la celulosa y sus efectos: certezas e incertidumbres

ALICE ALTESOR^{1,✉}, GABRIELA EGUREN², NESTOR MAZZEO¹, DANIEL PANARIO² & CLAUDIA RODRÍGUEZ¹ (EX AEQUO)

1. *Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.*
2. *Unidad de Ciencias de la Epigénesis, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.*

RESUMEN. El patrón de crecimiento de la industria de la pulpa y del papel, así como del modelo forestal asociado, revela una tendencia creciente a expandirse en países de Asia, África y América del Sur. En este escenario es necesario incorporar la perspectiva ambiental en la conciencia social para que las decisiones de uso y manejo de los recursos naturales no sean tomadas siguiendo sólo la lógica del mercado, por lo cual el concepto de servicios ecosistémicos es una ayuda valiosa para el análisis de los conflictos ambientales. Este artículo analiza las evidencias de los impactos puntuales que producen los efluentes industriales derivados del funcionamiento de las plantas de celulosa. Estos efluentes presentan una considerable complejidad por la cantidad de compuestos químicos que contienen, algunos no identificados al día de hoy. Sus efectos dependen del sitio en el que ocurren, de las características físico-químicas del cuerpo receptor, de su caudal, del tipo de madera, del proceso industrial y del tratamiento de efluentes empleado y de la sensibilidad de las especies presentes en el ecosistema. Sin embargo, existen numerosos estudios ecotoxicológicos y sobre la eutrofización de cuerpos de agua que demuestran que algunos de los potenciales efectos ocurren en regiones diferentes y distantes e independientemente del tipo específico de proceso industrial empleado. Los efectos derivados de la exposición a disruptores endócrinos cuentan con abundantes evidencias de laboratorio y de campo que han permitido establecer sus mecanismos de acción. Además, si bien la incorporación de nuevas fases (e.g., la fase secundaria) a los sistemas de tratamiento de efluentes industriales mitiga los efectos agudos, no mitiga las respuestas crónicas registradas. En función de los efectos conocidos se consideran las posibles consecuencias sobre las funciones ecosistémicas, y cuáles son los principales desafíos de América Latina para planificar esta actividad productiva. Los grados elevados de incertidumbre asociados, el carácter complejo de las respuestas de los sistemas frente a las perturbaciones o al estrés, y los vacíos de información limitan nuestra capacidad para enfrentar los problemas ambientales. El análisis y el aporte académico libre de conflictos de intereses deben contribuir a la toma de decisiones y a que la sociedad construya una opinión fundamentada.

[Palabras clave: conflicto ambiental, consumo de papel, disruptor endócrino, ecotoxicología, efluentes industriales, eutrofización, proceso kraft, servicios ecosistémicos]

ABSTRACT. Effects of pulp industry effluents: certainties and doubts: The growth pattern of the pulp and paper industry, as well as the associated forestry model, reveals a growing tendency to expand in Asia, Africa and South America. We believe that it is necessary to incorporate the environmental perspective on social consciousness so that decisions regarding the use and management of natural resources are not taken just by following the logic of the market. The concept of ecosystem services is a valuable aid in the analysis of environmental conflicts. The identification and quantification of ecosystem services is important because many times these services are not apparent to the average person or decision maker. In this article we focus on the

✉ Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. Iguá 4225, Montevideo, Uruguay. C.P. 11400.
aaltesor@fcien.edu.uy

Recibido: 2 de abril de 2008; Fin de arbitraje: 15 de julio de 2008; Revisión recibida: 28 de octubre de 2008; Aceptado: 7 de noviembre de 2008

analysis of the evidence of the direct impacts produced by the industrial effluents arising from the operation of pulp mills. These effluents have a considerable complexity due to the number of chemical compounds that they contain, some of them unidentified until now. Their effects are site-dependent where the physico-chemical characteristics of the receiver corp, its flow, the type of wood used in the industrial process, the effluent treatment adopted, as well as the sensitivity of the species in the ecosystem are some of the factors that determine the possible responses of the environment. Nevertheless, many ecotoxicological and eutrophication studies of water bodies have shown that some of the potential effects occur in different and distant biogeographic regions of the planet and regardless of the specific type of industrial process used. This work describe these effects, that are widely documented in the scientific literature, presented from the simplest levels of biological organization (molecular) to the most complex (ecosystems). In particular, the effects of the exposure to the endocrine disruptors have abundant laboratory and field evidence that have allowed to determine their mechanisms of action. The incorporation of new phases (e.g., secondary) in the treating systems of the industrial effluents mitigates the acute effects but not the chronic responses recorded. Based on the known effects we consider the potential impacts on the ecosystem functions and the main challenges for Latin America in the planning of this productive activity. Finally, we mention the existing difficulties in addressing environmental problems such as the high levels of associated uncertainty, the complex nature of the responses of the systems to shock or stress and the information gaps. In this scenario, we believe that the independent academic input and analysis should contribute to the decision making and help the society to build a grounded opinion.

[Keywords: environmental conflict, paper consumption, endocrine disruptor, ecotoxicology, industrial effluents, eutrophication, kraft process, ecosystem services]

INTRODUCCIÓN

El uso mundial de papel creció 454% entre los años 1961 y 2005 (FAO 2007). Este crecimiento sostenido se debe fundamentalmente a su demanda para empaques, propaganda e informática, y al incremento en el consumo de papeles sanitarios y de uso doméstico. En consecuencia, la fabricación de pulpa y de papel es en la actualidad uno de los sectores industriales más importantes en el mundo, y ha transformado su producto al estatus de "commodity". Esta industria poderosa está dominada por Estados Unidos, Canadá, Finlandia, Suecia y Japón. Es intensiva en el uso del capital, y posee costos elevados de construcción y de maquinarias, e inversiones grandes en el largo plazo. Los procesos industriales involucrados en la producción de pulpa insumen grandes cantidades de energía y de agua, lo que refuerza la necesidad de producir a gran escala. Esto, a su vez, requiere grandes superficies de terreno para su instalación y lugares con suministro de agua permanente y a elevado caudal. Además, para mantener volúmenes altos de producción se necesita el abastecimiento de materia prima al menor

costo posible. Por esta razón, otro requisito importante es contar con grandes extensiones de tierra dedicadas al monocultivo de especies leñosas de crecimiento rápido. Por último, también resulta muy relevante contar con una ubicación geográfica de fácil acceso y con buenas vías de comunicación (acuáticas o terrestres) que permitan una rápida entrada y salida de insumos y productos.

El patrón de crecimiento de esta industria, y del modelo forestal asociado a ella, revela una tendencia creciente a expandirse en países asiáticos (China, Indonesia, Tailandia, Malasia, Vietnam), africanos (Kenia, Sudáfrica, Swazilandia) y latinoamericanos (Brasil, Chile, Argentina, Uruguay). Estos países reúnen las características antes mencionadas para la producción a gran escala. De las 13 millones de hectáreas de plantaciones forestales que existen en el mundo para abastecer la producción de celulosa, 80% está en América del Sur y Asia, y está previsto que aumenten hasta 17.3 millones de hectáreas en 2020 (FAO 2007). Desde el punto de vista socioeconómico, se trata de países abiertos a las inversiones extranjeras que generen fuentes de trabajo y, en

varios casos, poseen una escasa o nula legislación ambiental y políticas de ordenamiento territorial.

Este escenario de desarrollo industrial y forestal ha provocado conflictos ambientales en distintas partes del planeta. En América del Sur han tenido lugar accidentes que suscitaron la preocupación y el movimiento de organizaciones sociales ambientalistas y de la sociedad en su conjunto. Tal es el caso del accidente de la Industria Cataguazes, que sucedió en 2003 sobre el río Pomba en Minas Gerais (Brasil), y lo acontecido en el sur de Chile durante 2004 en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, en el río Cruces. Si bien todas las actividades humanas implican modificaciones estructurales y funcionales en los ecosistemas, en muchas ocasiones los conflictos surgen como consecuencia de que pequeños grupos toman decisiones que impactan sobre la calidad de vida de la mayoría de la sociedad, y de que para dirimirlos, el único criterio que se utiliza es el de maximización del beneficio económico. Las ciencias ambientales han desarrollado conceptos, hipótesis y teorías que permiten desafiar la "lógica del mercado" para resolver los conflictos ambientales. El concepto de servicios ecosistémicos es un valioso auxiliar en el análisis de estos problemas. Según Myers & Riechter (1997), los servicios de los ecosistemas son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas sostienen y satisfacen la vida humana. Para dirimir los conflictos ambientales, Scheffer et al. (2000) señalan que es imprescindible conocer las respuestas de los ecosistemas a las diferentes actividades humanas, como también disponer de una lista lo más amplia y confiable posible de los servicios ecosistémicos brindados. De acuerdo con el Millennium Ecosystem Assessment (MA, <http://www.maweb.org>), los servicios ecosistémicos incluyen servicios de abastecimiento (alimento, agua, madera y fibra, combustibles), servicios de regulación (climática, de flujos hídricos, de enfermedades y plagas) y servicios culturales (estéticos, espirituales, educativos, recreativos). Por último, los servicios de soporte (biodiversidad, ciclado de nutrientes, formación de suelo, productividad primaria) son aquellos que permiten que

el ecosistema esté en condiciones de brindar los servicios mencionados.

La identificación y la cuantificación de los servicios que proveen los ecosistemas son temas técnicos, y es responsabilidad de los científicos poner a disposición de la sociedad dicha información. Esto es importante porque la sociedad debe opinar y su opinión debe ser considerada en los procesos de toma de decisiones (Dietz 2003). La conciencia sobre los problemas ambientales es relativamente nueva, en particular en América Latina. Scheffer et al. (2003) describen la dinámica de la opinión pública a través de un modelo no lineal, con discontinuidades que representan cambios repentinos de opinión, pero subrayan un largo período inicial de inercia frente a los problemas ambientales. Esta lentitud de respuesta de la sociedad se puede asociar con la dificultad para detectar problemas nuevos, del mismo modo que en el sistema inmunológico, la detección de problemas nuevos depende de la experiencia.

Para analizar las consecuencias ambientales de la industria de la pulpa y del papel es necesario considerar los impactos puntuales que producen los efluentes industriales y los gases derivados del funcionamiento de las plantas de celulosa, así como los impactos difusos de las transformaciones en el uso del suelo por la implantación de árboles. En este mismo número, Jobbágy et al. (2008) analizan los cambios funcionales que generan las plantaciones sobre los ecosistemas, y sus efectos sobre la prestación de servicios ecológicos clave como la provisión de agua o el mantenimiento de la fertilidad de los suelos. En este artículo, en cambio, nos concentraremos en el análisis de las evidencias de los impactos puntuales que producen los efluentes.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES DE LAS PLANTAS DE CELULOSA

El proceso de producción de celulosa blanqueada comprende una etapa de pulpaje en la que se separan las fibras de celulosa de los

otros componentes de la madera (lignina, terpenoides extraíbles y ácidos resínicos, entre otros), y una de blanqueo en la que se remueve la lignina residual (la que le da color a la pulpa) (Mc Master et al. 2003). En la etapa de pulpaje se utilizan procesos mecánicos, semiquímicos o químicos. Los dos primeros generan pulpa con alto porcentaje de compuestos no-celulósicos, mientras que los químicos son más eficientes en la remoción de dichos compuestos (90-95% de lignina) y, por lo tanto, los que más se utilizan. En particular, el proceso químico que emplea sulfato (denominado kraft) es el que más se usa ya que puede aplicarse a diferentes tipos de madera, permite una recuperación eficiente de los reactivos y genera una pulpa con mejor resistencia (Mc Master et al. 2003). Algunos procesos industriales han incorporado un paso previo al blanqueo, que consiste en una etapa de deslignificación prolongada con oxígeno. El blanqueo consiste en una serie de pasos alternados de extracción alcalina con hidróxido de sodio y agentes químicos. En función del agente utilizado pueden emplearse tres sistemas de blanqueo: con cloro elemental, libre de cloro elemental (ECF) y totalmente libre de cloro (TCF). El cloro elemental oxida la lignina residual, la que luego es removida y extraída con hidróxido de sodio. Esta tecnología, muy efectiva y de bajo costo, fue utilizada hasta la década de 1980, cuando el dióxido de cloro comenzó a sustituir de manera gradual al cloro elemental. A partir de la década de 1990 se comenzó a usar el método ECF, que utiliza dióxido de cloro como agente de blanqueo, o lo combina con ozono o con peróxido de hidrógeno. Las secuencias TCF utilizan ozono y peróxido de hidrógeno en diferentes combinaciones porcentuales.

Dada la variedad de tecnologías empleadas en la industria de celulosa, la composición química de sus efluentes es muy heterogénea, y varios compuestos aún no han sido identificados (Hewitt et al. 2006). En este sentido, los efluentes generados en los sistemas de producción que utilizan pulpaje kraft y blanqueo con cloro elemental presentan una amplia variedad y cantidad de compuestos orgánicos clorados persistentes. Los efluentes de procesos ECF contienen compuestos con menor grado de cloración y son menos resistentes a la de-

gradación, pero tienen cargas elevadas de sólidos en suspensión (orgánicos e inorgánicos), de nitrógeno y de fósforo. Además, tanto en procesos ECF como TCF se ha detectado una serie de compuestos derivados de hormonas vegetales (fitoesteroles) o productos de la degradación de componentes no-celulósicos de la madera (principalmente lignina, terpenos y ácidos resínicos) (Mc Master et al. 2006). Estos compuestos, denominados disruptores endócrinos, tienen el potencial de interferir con la producción, liberación, transporte, metabolismo, unión, acción o eliminación de hormonas naturales responsables del mantenimiento de la homeostasis y la regulación de los procesos de desarrollo de los organismos (Kavlock et al. 1996).

En función de su toxicidad potencial y de los elevados volúmenes de descarga (hasta 60 m³/ton de producto elaborado), los efluentes de las plantas de celulosa requieren un tratamiento previo a su descarga. La mayoría de las industrias cuentan con sistemas de tratamiento primario y secundario. Los tratamientos primarios procuran remover los sólidos y el material particulado en suspensión. Los tratamientos secundarios promueven la degradación de la materia orgánica a través de la digestión aeróbica o anaeróbica y reducen la toxicidad asociada a compuestos orgánicos. Últimamente se han incorporado sistemas de tratamientos terciarios que buscan disminuir el contenido de nutrientes y evitar procesos de eutrofización (enriquecimiento artificial de nitrógeno y fósforo). Numerosos estudios han relacionado la exposición a efluentes de celulosa con efectos tóxicos en organismos acuáticos (Boer & Brinkman 1994; De Matteis 1994; Karels & Oikari 2000; Karels et al. 2001; Barra et al. 2005). Sin embargo, estos efectos dependen de la sensibilidad de las especies expuestas, de las características físico-químicas y capacidad de dilución del cuerpo receptor, del tipo de madera empleada, del sistema de pulpaje y blanqueo y del sistema de tratamiento del efluente, entre otros factores.

EFFECTOS EN DIFERENTES NIVELES DE ORGANIZACIÓN

La descarga de los efluentes de plantas de celulosa puede generar en la biota acuática una gama amplia de efectos en diferentes niveles de organización jerárquica (desde el molecular hasta el ecosistémico). Sin embargo, la mayor parte de los trabajos disponibles corresponden a estudios en los niveles más simples de organización biológica, o están vinculados al fenómeno de la eutrofización (Tabla 1). Si bien estos estudios han permitido entender el modo de acción de varios compuestos, resulta necesario profundizar la investigación en niveles superiores para comprender los efectos sobre

los servicios que brindan los ecosistemas. En la Figura 1 se observa que las respuestas tempranas se manifiestan en niveles inferiores de organización biológica (molecular) y poseen poca relevancia en la interpretación de cambios ecosistémicos. Por el contrario, las respuestas en el nivel de comunidad se expresan luego de períodos de exposición prolongados y tienen una relevancia mayor cuando se pretende entender las alteraciones en los servicios de los ecosistemas (Freedman 1995).

Nivel molecular

En el nivel molecular, las primeras respuestas que se usaron para evaluar los efectos de

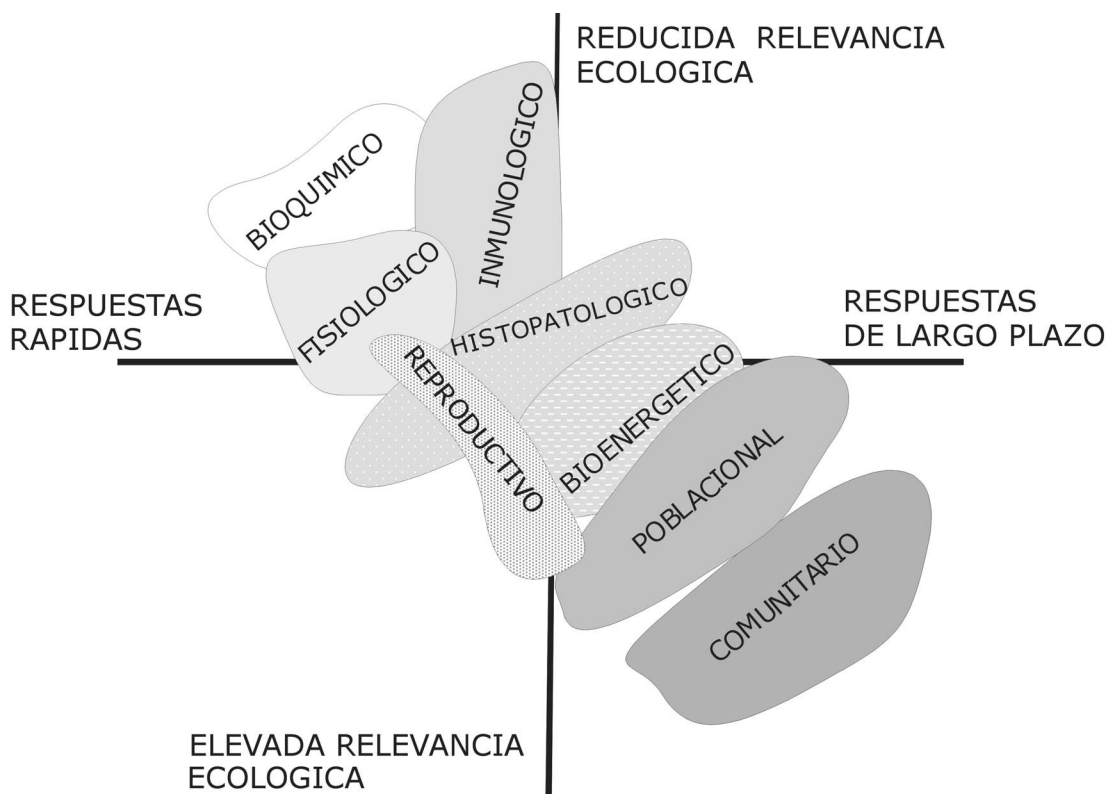


Figura 1. Respuestas de los distintos niveles de organización frente a disturbios o alteraciones, según el tiempo de exposición en que pueden ser observados y su relevancia ecológica. Este último término, indica la utilidad de la información en la protección de los ecosistemas en su conjunto o integridad. (Fuente: Peakall 1992).

Figure 1. Responses of different biological organization levels to disturbances according to the exposure time and the ecological relevance. The ecological relevance indicates the value of the information in order to protect the ecosystem integrity. (Source: Peakall 1992).

Tabla 1. Resumen de los efectos de los efluentes de las plantas de celulosa observados en diferentes organismos y tipos de procesos industriales.

Table 1. Summary of effects of pulp mills effluents (considering different industrial processes) on aquatic species.

Proceso Industrial	Tipo de estudio	Organismo	Nivel jerárquico	Tipo de respuesta	Fuente
BKM	Laboratorio	Bacterias, peces y mamíferos	Molecular	Genética	Rao et al. 1995
BKM	Laboratorio	Peces	Molecular	Genética	Easton et al. 1997
ECF	Laboratorio	Peces	Molecular	Bioquímica	Coakley et al. 2001
BKM	Revisión	Peces	Molecular	Bioquímica	Martel et al. 1996
Kraft con y sin blanqueo	Laboratorio	Peces	Molecular	Bioquímica	Williams et al. 1996
BKM	Revisión	Peces y bentos	Molecular, individual y poblacional	Varias	Parrot et. al. 2006
BKM	Laboratorio	Peces	Individual	Reproductiva	Kiparissis et al. 2000; Tremblay & Van der Kraak 1998; MacLatchy, DL & GJ Van der Kraak. 1995; Van der Kraak et al. 1992
BKM	Laboratorio	Bivalvos	Individual	Reproductiva	Gross et al. 2000
BKM	Laboratorio	Peces	Individual	Bioquímica, fisiológica y reproductiva	Orrego et al. 2005
BKM	Campo	Peces	Individual	Bioquímica y reproductiva	Orrego et al. 2006
BKM	Revisión estudios de campo	Peces y bentos	Individual y poblacional	Varias	Mc Master et al. 2006
BKM	Laboratorio	Peces	Individual y poblacional	Fisiológica y reproductiva	Parrot et al. 2003
BKM	Campo	Peces	Poblacional	Bioquímica y fisiológica	Mukittrick et al. 1992a
BKM con tratamiento secundario	Campo	Peces	Poblacional	Bioquímica	Mukittrick et al. 1992b
BKM	Campo	Peces	Poblacional	Reproductiva	Sandström 1996
TCF	Campo	Peces	Poblacional	Reproductiva	Karels et al. 2001
BKM	Campo	Bivalvos	Poblacional	Fisiológica	Martel et al. 2003
BKM	Revisión	Peces	Poblacional	Reproductiva	Hewitt et al. 2008
BKM	Campo	Macroinvertebrados	Comunitario	Composición y abundancia	Wrona et al. 1997
BKM	Mesocosmos	Trama trófica	Comunitario	Composición y biomasa	Glozier et al. 2002

los compuestos organoclorados presentes en efluentes de celulosa estuvieron vinculadas con la inducción de enzimas del sistema de monooxigenasas de función mixta (MFO). Estas enzimas forman parte de las rutas de detoxificación y participan en la metabolización, biotransformación y eliminación de este tipo de compuestos. Sin embargo, es importante recordar que son responsables también de la biotransformación de moléculas endógenas (e.g., hormonas reproductivas). Por lo tanto, el estado fisiológico del organismo puede influir en la expresión de las enzimas de detoxificación. Las enzimas más representativas e involucradas en la detoxificación de los compuestos químicos presentes en los efluentes de celulosa son la 7-etoxiresorufin-o-detilasa (EROD) y la benzo-pireno-hidroxilasa (BROD).

La inducción de estas enzimas se ha observado en organismos expuestos a efluentes de plantas de celulosa que utilizan cloro elemental como agente de blanqueo, así como de plantas con procesos ECF y TCF (Martel et al. 1996; Williams et al. 1996; Coakley et al. 2001). Los peces fueron los primeros modelos que se utilizaron en estos estudios, tanto en bioensayos de laboratorio (Hodson et al. 1996; Parrot et al. 1999), como en bioensayos *in situ* y en trabajos de campo (Mc Master et al. 2003; Orrego et al. 2005, 2006).

A principios de la década de 1990, cuando se produjo la sustitución de cloro elemental por dióxido de cloro como agente de blanqueo (proceso ECF), los estudios se centraron en los efectos asociados a la presencia de los compuestos denominados disruptores endócrinos. Ciertos estudios de campo señalaron la existencia de cambios en los niveles de esteroides en poblaciones de peces expuestas a efluentes de este tipo plantas (Munkittrick et al. 1992 a,b). Dichos efectos fueron confirmados en ensayos de laboratorio, en los que se observó que las alteraciones ocurren a nivel de la síntesis de vitelogenina y de hormonas involucradas en la reproducción. Estas respuestas también fueron observadas en organismos expuestos a efluentes procedentes de plantas TCF e incluso en aquellas que presentaban sistemas de tratamiento secundario (Van der Kraak et al. 1992; MacLachy & Van der Kraak 1995; Cook et al.

1996; Kiparissis et al. 2000, 2001; Mc Master et al. 2003). Para profundizar sobre los efectos a nivel molecular asociados a la exposición de diversos compuestos químicos presentes en efluentes de industrias de celulosa se puede consultar las revisiones de Ali & Sreekrishnan (2001), McMaster et al. (2006), Parrott et al. (2006) y Hewitt et al. (2008).

Niveles de individuo y población

La evidencia científica acumulada en los últimos 30 años demuestra que las alteraciones en los niveles de esteroides en peces expuestos a efluentes de plantas de celulosa desencadenan efectos en el sistema reproductivo que repercuten en los niveles individual y poblacional. Entre los efectos documentados se ha observado la reducción del tamaño gonadal, la alteración de los caracteres sexuales secundarios y la reducción de la producción de huevos (Hewitt et al. 2008). En tal sentido, Sandström (1996) comparó organismos de ocho especies de peces colectados aguas arriba y aguas abajo de la descarga de efluentes de plantas con procesos kraft ECF (en 18 sitios de Suecia, Canadá y EE.UU.) y observó que 80% de los organismos expuestos retrasaba la maduración sexual y 60% presentaba una reducción del tamaño de las gónadas. Por otra parte, constató que el factor de condición (relación peso/tamaño) de peces colectados aguas abajo de la descarga de efluentes aumentaba en 50%. Esto puede deberse a que los efluentes de plantas con procesos ECF contienen altas cargas de nutrientes, lo que puede beneficiar en un principio el crecimiento y desarrollo de consumidores primarios o secundarios (McMaster et al. 2003). Este decrecimiento del tamaño gonadal, combinado con el incremento en el uso y almacenaje de energía, puede ser interpretado como una disrupción metabólica (Munkittrick et al. 2000) o como una disrupción endócrina ligada al déficit de hormonas esteroides (Van der Kraak et al. 1992). Efectos similares han sido detectados en bivalvos de agua dulce (Martel et al. 2003) y en aves (Wayland et al. 1998) expuestos al mismo tipo de efluentes.

Niveles de comunidad y ecosistema

Existen menos estudios sobre los efectos de la industria de celulosa a nivel de comunidades y ecosistemas. Es posible que el enorme esfuerzo de investigación que se ha concentrado en encontrar los responsables químicos de las respuestas observadas y en determinar los modos de acción hayan limitado los esfuerzos para entender las respuestas en niveles superiores.

Algunos estudios de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, aguas arriba y abajo de plantas de celulosa, indican que no existen cambios en cuanto a la composición de los taxa más abundantes. Sin embargo, se observa una tendencia al aumento tanto de la abundancia como de la diversidad aguas abajo de la descarga de efluentes (Wrona et al. 1997). Esta respuesta suele observarse en las fases iniciales de los procesos de enriquecimiento de nutrientes (Chambers 1997) y ha sido documentada en varios estudios de campo con comunidades bentónicas (Grapentine et al. 2001; Lowell et al. 2001, 2003). Sin embargo, esta respuesta puede variar de forma sustancial según el tipo de proceso que se emplee, el sitio analizado, y los niveles de nutrientes y de materia orgánica presentes en el sistema (Walker et al. 2002). Este tipo de efluentes provoca un impacto considerable sobre los ríos que tienen un nivel basal de nutrientes elevado. Es importante recordar que entre 80 y 90% del fósforo total de los efluentes de las plantas de celulosa es fósforo reactivo disponible inmediatamente para los productores primarios (Priha 1994).

Glozier et al. (2002) analizaron las respuestas en los principales componentes de la trama trófica de un sistema acuático, y observaron un incremento de la biomasa perifítica y cambios en la estructura de la comunidad de diatomeas. Estos cambios se han asociado al aumento de la carga de carbono y de nutrientes, lo que generalmente estimula el crecimiento de algas y de bacterias (Culp et al. 1996). El aumento de la producción primaria repercutió en los niveles tróficos superiores, lo cual también favoreció un aumento en el factor de condición de varias especies de peces.

Es interesante destacar que los escasos efectos estudiados en estos niveles son similares a los observados en los procesos de eutrofización clásicos (Clemente et al. 2005) que se asocian al uso de fertilizantes o vertidos de efluentes domésticos. Sin embargo, los efectos de la adición de nutrientes no son lineales: mientras que la primera fase de enriquecimiento puede estimular un aumento de la biomasa del fitoplancton, del zooplancton y de las poblaciones de peces, un enriquecimiento excesivo tiene efectos nocivos. Livingston et al. (2002) evaluaron que el amoníaco descargado por una planta de celulosa en el estuario del río Amelia (Florida, EE.UU.) provocaba una disminución de la abundancia y la riqueza del fitoplancton y en la abundancia del zooplancton. En experimentos adicionales observaron que las respuestas del plancton eran dependientes de la concentración de amoníaco en el agua.

Uno de los pocos ejemplos de los efectos de las plantas de celulosa sobre las interacciones entre organismos lo constituye el análisis de las relación parásito-hospedante realizado por Khan & Billiard (2007). Estos autores registraron un aumento de ectoparásitos y una disminución de endoparásitos en peces cercanos al punto de descarga del efluente. El papel de los parásitos en el funcionamiento de los ecosistemas ha sido históricamente considerado trivial debido a su baja contribución de biomasa frente a otros grupos. Sin embargo, sus interacciones con las poblaciones hospedantes pueden modificar la estructura de la trama trófica (Hudson et al. 2006). Por otra parte, la incidencia de los compuestos presentes en los efluentes de las plantas de celulosa sobre las interacciones mediadas por comunicación química (info-químicos) es uno de los aspectos menos comprendidos hasta el presente, pero de gran relevancia para entender los efectos a nivel del funcionamiento de ecosistemas (Lurling & Scheffer 2007).

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS, LECCIONES Y ERRORES APRENDIDOS

Un problema central en la evaluación de los efectos de las plantas de celulosa, al igual

que los de cualquier otra actividad humana, es poder separarlos de otros efectos asociados a factores naturales u otras actividades antrópicas presentes en el sistema. En tal sentido, la eutrofización puede deberse a los aportes de nutrientes procedentes de áreas agrícolas por escorrentía superficial y/o al vertido de sistemas de saneamiento, entre otros. Esta situación es en particular compleja dentro del contexto de América Latina, donde la gran mayoría de los centros urbanos tienen sistemas muy limitados de tratamiento de efluentes, y donde la ausencia de tratamientos terciarios es una característica dominante. En el mismo sentido, en el caso de los disruptores endócrinos, existe una multiplicidad de actividades humanas que pueden desencadenar respuestas similares a las ya descritas, como los vertidos domésticos y los efluentes de *feed-lots*, entre otros (Sumpter 2005; Jensen et al. 2006; Orlando & Guillette 2007).

La complejidad de estos fenómenos requiere aproximaciones espaciales (comparación entre sitios impactados y zonas control) diseñadas con mucho cuidado, en especial en cuanto a la selección apropiada de sitios control válidos para las pruebas estadísticas posteriores. Por otra parte, la ausencia de programas de monitoreo sistemáticos de calidad de agua en América Latina dificultan la evaluación de los efectos desde un enfoque temporal (antes y después del inicio de las actividades). En algunos casos, como el incremento de la biomasa de productores primarios (microalgas), esto es posible mediante el análisis de banco de imágenes satelitales. En otros casos, como en ambientes lénticos con buen registro sedimentario, la ausencia de información puede ser compensada con estudios paleolimnológicos.

Una pregunta central es si los bioensayos permiten resolver algunas de las dificultades planteadas. Los bioensayos agudos brindan información sobre los efectos en el corto plazo, pero desde el punto de vista de la relevancia ecológica, es imprescindible contar con bioensayos crónicos que simulen la exposición prolongada a compuestos químicos y sus efectos en el mediano y el largo plazo. La ausencia de efectos agudos no implica que no se

produzcan efectos crónicos. Los bioensayos de larga duración, que incluyen la mayor parte del ciclo de vida de los organismos, permiten evaluar la producción de huevos, que es una de las respuestas más sensibles y de mayor relevancia en la dinámica poblacional. Este atributo es afectado a una concentración que puede ser la mitad a la cual comienzan a observarse efectos en la concentración de esteroides (Borton et al. 1997). Los bioensayos que consideran varias generaciones sugieren que las respuestas adversas sobre la reproducción pueden incrementarse en sucesivas generaciones (Ellis et al. 2005).

La combinación de técnicas (bioensayos y estudios en poblaciones naturales) y efectos en diferentes niveles de organización han permitido entender los principales modos de acción de los disruptores endócrinos asociados a las plantas de celulosa. La estrategia combinada, además, permitió comprender que los impactos reproductivos y las alteraciones en el sistema hepático de poblaciones de peces no están limitados a las plantas que utilizan cloro elemental y que incluso se registran en aquellas que cuentan con sistemas de tratamiento secundario. El mejoramiento de los sistemas de tratamiento permite minimizar los impactos asociados a la temperatura y a los tenores de oxígeno disuelto. Sin embargo, estas condiciones más favorables generan una exposición mayor de la biota a los compuestos responsables de las respuestas crónicas vinculadas a los disruptores endócrinos.

EFECTOS SOBRE LAS FUNCIONES ECOSISTÉMICAS: LA DEUDA PENDIENTE

Algunos de los efectos de los efluentes de las plantas de celulosa se comprenden mejor en términos de su incidencia sobre la producción de servicios de los ecosistemas. Los procesos de eutrofización severos limitan el suministro de agua potable por el crecimiento excesivo de fitoplancton (en muchos casos asociado a poblaciones de cianobacterias) o tienen efectos adversos por la disminución de la diversidad y biomasa de las comunidades de peces. En

cuanto a los efectos ecotoxicológicos sobre las funciones ecosistémicas, las evidencias estudiadas son escasas. El análisis funcional de las especies, el conocimiento de sus relaciones tróficas e interacciones directas e indirectas en las que están involucradas, puede permitir una mejor capacidad de extrapolación de estos efectos sobre las funciones ecosistémicas (O'Connor & Crowe 2005). En América del Norte y en Europa existe un conocimiento muy detallado de los roles tróficos de la mayoría de sus peces nativos, por lo que esta extrapolación a otros niveles de organización es posible dentro de ciertos límites. Sin embargo, en América Latina todavía desconocemos las interacciones y el papel trófico de gran parte de nuestra fauna íctica nativa, lo cual dificulta la comprensión del impacto de los efectos ecotoxicológicos conocidos sobre las funciones ecosistémicas. Desde esta perspectiva, tendrán una gran relevancia los estudios sobre la biología de las especies, los experimentos en meso y macrocosmos (con los principales niveles tróficos de un ecosistema acuático) y un mayor número de trabajos con un enfoque paleolimnológico.

Los problemas ambientales siempre llevan asociados un alto grado de incertidumbre (Dietz 2003), en particular cuando se analizan los efectos a niveles jerárquicos superiores como el ecosistema, dado que su dinámica es compleja y multicausal (Carpenter & Folke 2006). Además, algunos cambios son difíciles de predecir porque son graduales hasta que alcanzan un umbral a partir del cual ocurren bruscamente. Algunos avances científicos recientes han demostrado que los sistemas complejos (sociedades, ecosistemas o sistemas climáticos) pueden perder su resiliencia (capacidad de un sistema de mantener sus funciones esenciales ante perturbaciones) en los estados próximos a estos umbrales. Dichos sistemas complejos se hacen cada vez más frágiles, al punto que pequeñas perturbaciones pueden disparar un pasaje irreversible a otro estado. Los científicos de una gama amplia de disciplinas han cambiado su foco de interés hacia estudios de sustentabilidad y resiliencia. El desafío es, entonces, encontrar los determinantes de la resiliencia de diferentes sistemas complejos (Folke 2006). Este es un campo cien-

tífico en desarrollo en el que, obviamente, se requiere la interacción de varias disciplinas, buenos estudios de caso, experimentos, teorías y modelos.

Redman (1999) señala un conjunto de factores que contribuye a tomar decisiones equivocadas sobre el ambiente y/o los recursos naturales. Destaca los vacíos de conocimiento y el uso de modelos elaborados en otros ecosistemas, con similitudes superficiales pero diferencias críticas. Los períodos de observación suelen ser cortos y no se captan aspectos fundamentales de la dinámica o las tendencias. La reacción de quienes toman decisiones está desfasada de la dinámica del proceso de deterioro, y se termina haciendo "demasiado poco y demasiado tarde". En este escenario, el análisis y el aporte académico sin conflicto de intereses deben contribuir a la toma de decisiones y a que la sociedad construya una opinión fundamentada.

REFERENCIAS

- ALI, M & TR SREEKRISHNAN. 2001. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Adv. Env. Res.* 5:175-196.
- BARRA, R; JC COLOMBO; G EGUREN; N GAMBOA; WF JARDIM ET AL. 2005. Persistent organic pollutants (POPs) in Eastern and Western South American Countries. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 185:1-33.
- BOER, J & U BRINKMAN. 1994. The use of fish as biomonitors for the determination of contamination of the aquatic environment by persistent organochlorine compounds. *Analytical Chemistry* 13(9):397-404.
- BORTON, DL; WR STREBLOW; P VAN VELD; TJ HALL & T BOUSQUET. 1997. Comparison of bioindicators to reproduction during fathead minnow (*Pimephales promelas*) life-cycle tests with kraft mill effluents. Pp. 277-286 en: *3rd Internat. Conf. Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*. November 9-13, Rotorua, NZ.
- CARPENTER, SR & C FOLKE. 2006. Ecology for transformation. *TREE* 21(6):309-315.
- CLEMENTE, J; N MAZZEO; J GORGA & M MEERHOFF. 2005. Succession and collapse of macrozoobenthos in a subtropical hypertrophic lake under restoration (Lake Rodó). *Aquat. Ecol.* 39:455-464.
- COAKLEY, J; PV HODSON; A VAN HEININGEN & T

- CROSS. 2001. MFO induction in fish by filtrates from chlorine dioxide bleaching of wood pulp. *Wat. Res.* **35**:921-928.
- COOK, DL; L LAFLEUR; A PARRISH; J JONES & D HOY. 1996. Characterization of plant sterols in a select group of US pulp and paper mills. Pp. 1-8 en: *Fifth IEAWQ Symposium Preprint of Forest Industry Waste Water*. Vancouver, BC, Canada.
- CULP, JM; CL PODEMSKI; KJ CASH & RB LOWELL. 1996. Utility of field-based artificial streams for assessing effluent effects on riverine ecosystems. *J. Aquat. Ecosys. Health.* **5**:117-124.
- CHAMBERS, PA. 1997. Assessing the effects of pulp mill effluents on nutrient regimes and periphyton production in rivers of Western Canada. En: *3rd Internat. Conf. Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*. November 9-13, 1997, Rotorua, NZ.
- DE MATTEIS, F. 1994. The role of cytochrome P-450 in drug metabolism and toxicity. Pp. 81-92 en: Renzoni, A; N Mattei ; L Lari & MC Fossi (eds.). *Contaminants in the environment a multidisciplinary assesment of risk to man and other organisms*. CRC Press, Inc. Lewis Publishers.
- DIETZ, T. 2003. What is a good decision? Criteria for environmental decision making. *Human Ecology Review* **10**(1):33-39.
- EASTON, MDL; GM KRZYNSKI; II SOLAR & HM DYE. 1997. Genetic toxicity of pulp mill effluent on juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) using flow cytometry. *Water Sci. Technol.* **35**:347-355.
- ELLIS, RJ; MR VAN DEN HEUVEL; MA SMITH & N LING. 2005. Effects of maternal versus direct exposure to pulp and paper mill effluent on rainbow trout early life stages. *J. Toxicol. Environ. Health, Part A*, **68**:369-387.
- FAO. 2007. FAOSTAT on-line statistical service, Available online at: <http://faostat.fao.org>.
- FREEDMAN, B. 1995. *Environmental Ecology. The ecological effects of pollution, disturbance and other stresses*. Academic Press, San Diego. 606 Pp.
- FOLKE, C. 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* **16**:253-267.
- GLOZIER, NE; JM CULP; KJ CASH; RB BRUA & CS WOOD. 2002. Assessing effects of pulp mill effluent on benthic invertebrates with stream mesocosms on the Saint John River, Edmundston, NB. Proceedings, 29th Annual Aquatic Toxicity Workshop. Whistler, BC, Canada, October 21-23. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* **2438**:2-3.
- GRAPENTINE, LC; RB LOWELL; TB REYNOLDS & JC CULP. 2001. Responses of benthic invertebrate communities to pulp and paper mill effluents: Multivariate analyses of pooled data from the National EEM program. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* **2379**:2.
- GROSS, TS; NJ KERNAGHAN; DS RUESSLER & SE HOLM. 2000. An evaluation of the potential effects of papermill effluents on freshwater mussels. Pp 253-257 en: *Proceedings, 4th International Conference on the Environmental Impacts of the Pulp and Paper Industry*. Ruoppa, M; J Passivirta; KJ Lehtinen & S Ruonala (eds.). Report 417. June 12-15, Helsinki, Finland.
- HEWITT, LM; JL PARROTT & ME McMASTER. 2006. A decade of research on the environmental impacts of pulp and paper mill effluent in Canada: sources and characteristics of bioactive substances. *J. Toxicol. Environ. Health, Part B, Critical Reviews*, **9**(4):341-356.
- HEWITT, LM; TG KOVACS; M DUBE; D MacLATCHY; PH MARTEL ET AL. 2008. Altered reproduction in fish exposed to pulp and paper mill effluents: roles of individual compounds and mill operating conditions. *Environ. Tox. Chem.* **27**(3):682-697.
- HODSON, PV; S EFLER; JY WILSON; A EL-SHAARAWI; M MAJ ET AL. 1996. Measuring the potency of pulp mill effluents for induction of hepatic mixed function oxygenase activity in fish. *J. Toxicol. Environ. Health.* **49**:101-128.
- HUDSON, PJ; AP DOBSON & KD LAFFERTY. 2006. Is a healthy ecosystem one that is rich in parasites? *TREE* **21**(7):381-385.
- JENSEN, KM; EA MAKYNEN; MD KAHL & GT ANKLEY. 2006. Effects of the Feedlot Contaminant 17 α -Trenbolone on Reproductive Endocrinology of the Fathead Minnow. *Environ. Sci. Technol.* **40**:3112-3117.
- JOBÁGY, EG; MD NOSETTO; CS SANTONI & G BALDI. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecol. Aus.* **18**:305-322.
- KARELS, A & A OIKARI. 2000. Effects of pulp and paper mill effluents on the reproductive and physiological status of perch (*Perca uviatilis*) and roach (*Rutilus rutilus*) during the spawning period. *Ann. Zool. Fennici.* **37**:65-77.
- KARELS, A; E MARKKULA & A OIKARI. 2001. Reproductive, biochemical, physiological, y population responses in perch (*Perca uviatilis* L.) y roach (*Rutilus rutilus* L.) downstream of two elemental chlorine-free pulp y paper mills. *Environ. Toxicol. Chem.* **20**(7):1517-1527.
- KAVLOCK, RJ; GP DASTON; C DEROSA; P FENNER-CRISP; LE GRAY ET AL. 1996. Research needs for the risk assessment of health and environmental effects of endocrine disruptors: A report of the US EPA

- sponsored workshop. *Environ. Health Perspect.* **104**(4):715-740.
- KHAN, RA & SM BILLIARD. 2007. Parasites of winter flounder (*Pleuronectes americanus*) as an additional bioindicator of stress-related exposure to untreated pulp and paper mill effluent: a 5-year field study. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **52**:243-250.
- KIPARISSIS, Y; R HUGHES; CD METCALFE; AJ NIIMI & T TERNES. 2000. Potential of the flavonoid, genistein to alter gonadal development in fish. In: *Proceedings, 27th Annual Aquatic Toxicity Workshop*. October 1-4, 2000, St. John's, Newfoundland. Penney KC, Coady KA.
- KIPARISSIS, Y; R HUGHES; C METCALFE & T TERNES. 2001. Identification of the isoflavonoid genistein in bleached kraft mill effluent. *Environ. Sci. Technol.* **35**:2423-2427.
- LIVINGSTON, RJ; AK PRASAD; X NIU & SE MCGLYNN. 2002. Effects of ammonia in pulp mill effluents on estuarine phytoplankton assemblages: field descriptive and experimental results. *Aquatic Botany* **74**:343-367.
- LOWELL, RB; LC GRAPENTINE; JC CULP & TB REYNOLDSON. 2001. National assessment of the effects of pulp and paper mills on benthic invertebrate communities: Meta-analyses of the National EEM database (abstr.). *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* **2379**:1-2.
- LOWELL, RB; SC RIBEX; IK ELLIS; EL PORTER; JM CULP ET AL. 2003. *National assessment of the pulp and paper environmental effects monitoring data*. Burlington, Ontario. National Water Research Institute. No. 03-521.
- LURLING, M & M SCHEFFER. 2007. Info-disruption: pollution and the transfer of chemical information between organisms. *TREE* **22**(7):374-379.
- MACLATCHY, DL & GJ VAN DER KRAAK. 1995. The phytoestrogen b-sitosterol alters the reproductive endocrine status of goldfish. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **134**:305-312.
- MARTEL, PH; TG KOVACS & RH VOSS. 1996. Effluents from Canadian pulp and paper mills: A recent investigation of their potential to induce mixed function oxygenase activity in fish. Pp. 401-412 en: *Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*. Servos, MR; KR Munkittrick, JH Carey & GJ Van Der Kraak (eds.). St. Lucie Press. Del Ray Beach, FL, USA.
- MARTEL, P; T KOVACS; R VOSS & S MEGRAW. 2003. Evaluation of caged freshwater mussels as an alternative method for environmental effects monitoring (EEM) studies. *Environmental pollution* **124**(3):471-483.
- MCMASTER, ME; JL PARROTT & LM HEWITT. 2003. A *Decade of Research on the Environmental Impacts of Pulp and Paper Mill Effluent in Canada (1992-2002)*. National Water Research Institute, Burlington, Ontario. NWRI Scientific Assessment Report Series No. 4. 84 Pp.
- MCMASTER, ME; LM HEWITT & JL PARROTT. 2006. A decade of research on the environmental impacts of pulp and paper mill effluent in Canada: field studies and mechanistic research. *J. Toxicol. Environ. Health, Part B, Critical Reviews* **9**(4):313-339.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. 2005. *Ecosystems & Human Well-being: Synthesis Report*. Island Press (MA, <http://www.maweb.org>).
- MUNKITTRICK, KR; ME MCMMASTER; CB PORTT; GJ VAN DER KRAAK; IR SMITH ET AL. 1992a. Changes in maturity, plasma sex steroids levels, hepatic mixed-function oxygenase activity, and the presence of external lesions in lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) exposed to bleached kraft mill effluent. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **49**:1560-1569.
- MUNKITTRICK, KR; GJ VAN DER KRAAK; ME MCMMASTER & CB PORTT. 1992b. Response of hepatic MFO activity and plasma sex steroids to secondary treatment of bleached kraft pulp mill effluent and mill shutdown. *Environ. Toxicol. Chem.* **11**:1427-1439.
- MUNKITTRICK, KR; ME MCMMASTER; G VAN DER KRAAK; C PORTT, WN GIBBONS ET AL. 2000. *Development of Methods for Effects-Based Cumulative Effects Assessment Using Fish Populations: Moose River Project*. SETAC Press. Pensacola, FL. 236 Pp.
- MYERS, JP & JS REICHERT. 1997. Perspectives on Nature's Services. Pp. 17-20 en: Daily, G (ed.). *Nature's Services*. Island Press, Washington DC, USA.
- O'CONNOR, NE & TP CROWE. 2005. Biodiversity loss and ecosystem functioning: distinguishing between number and identity of species. *Ecology* **86**(7):1783-1796.
- ORLANDO, EF & LR JR. GUILLETTE. 2007. Sexual dimorphic responses in wildlife exposed to endocrine disrupting chemicals. *Environmental Research* **104**:163-173.
- ORREGO, R; G MORAGA-CID; M GONZÁLEZ; R BARRA; A VALENZUELA ET AL. 2005. Reproductive, physiological, and biochemical responses in juvenile female rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to sediment from pulp and paper mill industrial discharge areas. *Environmental Toxicology and Chemistry* **24**(8):1935-1943.
- ORREGO, R; A BURGOS; G MORAGA-CID; B INZUNZA; M GONZÁLEZ ET AL. 2006. Effects of pulp and paper mill discharges on caged rainbow trout

- (*Oncorhynchus mykiss*): biomarker responses along a pollution gradient in the Biobio river, Chile. *Environ. Toxicol. Chem.* **25**(9):2280-2287.
- PARROTT, J; R CHONG-KIT & D ROKOSH. 1999. MFO induction in fish: A tool to measure environmental exposure. Pp 99-122 en: S Rao (ed.). *Impact Assessment of Hazardous Aquatic Contaminants: Concepts and Approaches*. CRC Press, Inc. Chelsea, Michigan, USA.
- PARROTT, JL; CS WOOD; P BOUTOT & S DUNN. 2003. Changes in growth and secondary sex characteristics of fathead minnows exposed to bleached sulphite mill effluent. *Environ. Toxicol. Chem.* **22**:2908-2915.
- PARROTT, JL; ME McMASTER & LM HEWITT. 2006. A decade of research on the environmental impacts of pulp and paper mill effluents in Canada: development and application of fish bioassays. *J Toxicol Environ Health B*, **9**(4):297-317.
- PEAKALL, DB. 1992. *Biomarkers: Research and Application in the Assessment of Environmental Health*. Nato Series H, Cell Biology. Shugart, LE (ed.). Springer. 109 Pp.
- PRIHA, M. 1994. Bioavailability of pulp and paper-mill effluent phosphorus. *Water Science & Technology* **29**:93-103.
- RAO, SS; BA QUINN; BK BURNISON; MA HAYES & CD METCALFE. 1995. Assessment of the genotoxic potential of pulp mill effluent using bacterial, fish and mammalian assays. *Chemosphere* **31**:3553-3566.
- REDMAN, CL. 1999. *Human impact on ancient environments*. The University of Arizona Press, Tucson. 239 Pp.
- SANDSTRÖM, O. 1996. In situ assessments of the impact of pulp mill effluent on life-history variables in fish. Pp 449-457 en: Servos, MR; KR Munkittrick; JH Carey & GJ Van Der Kraak (eds.). *Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*. St. Lucie Press. Del Ray Beach, FL, USA.
- SCHEFFER, M; W BROCK & F WESTLEY. 2000. Socioeconomic mechanisms preventing optimum use of ecosystem services: an interdisciplinary theoretical analysis. *Ecosystems* **3**:451-471.
- SCHEFFER, M; F WESTLEY & W BROCK. 2003. Slow Response of Societies to New Problems: Causes and Costs. *Ecosystems* **6**:493-502.
- SUMPTER, JP. 2005. Endocrine disrupters in the aquatic environment: an overview. *Acta hydrochim. hydrobiol.* **33**:9-16.
- TREMBLAY, L & GJ VAN DER KRAAK. 1998. Use of a series of homologous in vitro and in vivo assays to evaluate the endocrine modulating actions of β -sitosterol in rainbow trout. *Aquat. Toxicol.* **43**:149-162.
- VAN DER KRAAK, GJ; KR MUNKITTRICK; ME McMASTER; CB PORT & JP CHANG. 1992. Exposure to bleached kraft pulp mill effluent disrupts the pituitary-gonadal axis of white sucker at multiple sites. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* **115**:224-233.
- WALKER, SL; K HEDLEY & E PORTER. 2002. Pulp and paper environmental effects monitoring in Canada: An overview. *Water Qual. Res. J. Canada* **37**:7-19.
- WAYLAND, M; S TRUDEAU; T MARCHANT; D PARKER & K HOBSON. 1998. The effect of pulp and paper mill effluent on an insectivorous bird, the tree swallow. *Ecotoxicology* **7**:237-251.
- WILLIAMS, TG; JH CAREY; BK BURNISON; DG DIXON & HB LEE. 1996. Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) mixed function oxygenase responses caused by unbleached and bleached pulp mill effluents: A laboratory-based study. Pp 379-389 en: Servos, MR; KR Munkittrick; JH Carey & GJ Van Der Kraak (eds.). *Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*. St. Lucie Press. Del Ray Beach, FL, USA.
- WRONA, FJ; WM GUMMER; KJ CASH & K CRUTCHFIELD. 1997. Assessing cumulative impacts: The Northern River Basins Study. En: *3rd Internat. Conf. Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*. November 9-13, 1997. Rotorua, NZ.