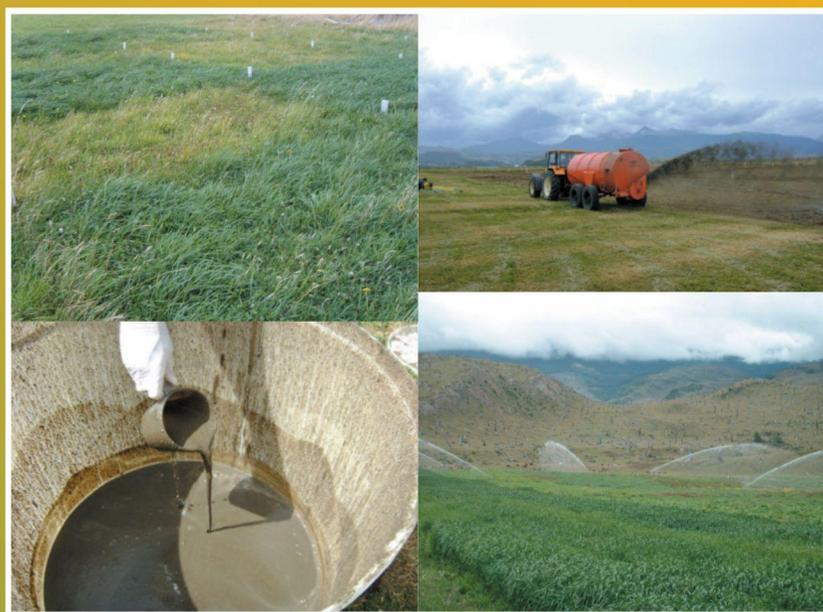


INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

# RESULTADOS PRELIMINARES SOBRE EL USO DE LODOS DE PISCICULTURAS SOBRE SUELOS AGROPECUARIOS DE ORIGEN VOLCÁNICO DE LA PATAGONIA OCCIDENTAL (AYSÉN)



EDITOR:

**CHRISTIAN HEPP K.**

COYHAIQUE, CHILE, 2012

BOLETÍN INIA N° 223



---

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

---

**RESULTADOS PRELIMINARES SOBRE  
EL USO DE LODOS DE PISCICULTURAS  
SOBRE SUELOS AGROPECUARIOS  
DE ORIGEN VOLCÁNICO DE LA  
PATAGONIA OCCIDENTAL (AYSÉN)**

EDITOR:  
**CHRISTIAN HEPP K.**

**COYHAIQUE, CHILE, 2012**

**BOLETÍN INIA N° 223**

ISSN 0717-4829

### **Equipo de trabajo:**

Christian Hepp	INIA Tamel Aike (Ing. Agr MPhil PhD, Director Proyecto)
María Paz Martínez	INIA Tamel Aike (Bióloga)
Pier Barattini	INIA Tamel Aike (Biólogo)
Daniel Cross	INIA Tamel Aike (bioquímico)
Felipe Vidal	INIA Tamel Aike (Ing. Ambiental)
Marta Alfaro	INIA Remehue (Ing. Agr. PhD)
Patricio Almonacid	INIA Tamel Aike (Técnico Agr.)
Adriana Carvajal	INIA Tamel Aike (Químico lab.)
Luis Ramírez	INIA Remehue (Técnico Agr.)
Rodrigo Muñoz	INIA Tamel Aike (Ing. Ej Químico))
Viola Saldivia	INIA Tamel Aike (Análisis laboratorio)
Cristian Cárcamo	INIA Tamel Aike (operario terreno)
Mirna Medina	INIA Tamel Aike (Apoyo laboratorio)
Fabiola Carrasco	INIA Tamel Aike (Ing. Com, gestión financiera)
Viviana Soto	INIA Tamel Aike (Contador, Contabilidad)

**Editor:** Dr. Christian Hepp K., Ing. Agr. MPhil PhD

Este libro fue editado en el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro INIA Tamel Aike, Ministerio de Agricultura, como parte de las actividades comprometidas en el proyecto Innova-Chile (Corfo) Uso sustentable de lodos procedentes de la fase de crianza de salmonideos, sobre suelos agropecuarios de origen volcánico de la Patagonia Occidental.

**Cita:** Hepp, C. 2012. Resultados preliminares sobre uso de lodos de pisciculturas sobre suelos agropecuarios de origen volcánico de la Patagonia Occidental (Aysén). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Aysén-Patagonia, Chile. Boletín técnico N° 223. 82 pp.

Cantidad de ejemplares: 300

Impresión: Imprenta América (Temuco)

## ÍNDICE

Cap.	Título	Autor(es)	Pág.
1	Acuicultura y generación de lodos en pisciculturas (fase de agua dulce).	Christian Hepp	5
2	Sistemas de producción acuícola de flujo terrestre: recirculación y flujo continuo.	M. Paz Martínez	11
3	Estabilización de lodos en lagunas.	Daniel Cross	19
4	Caracterización de lodos de piscicultura con potencial agropecuario.	Christian Hepp Felipe Vidal Pier Barattini Adriana Carvajal	25
5	Efectos de la aplicación de lodos de piscicultura en praderas naturalizadas de Aysén.	Christian Hepp Rodrigo Muñoz Felipe Vidal Patricio Almonacid	35
6	Efectos del uso de lodos de piscicultura sobre praderas artificiales y cultivos en Aysén.	Christian Hepp Felipe Vidal	41
7	Evaluación de lixiviados producto de la aplicación de lodos de piscicultura en suelos agropecuarios de Aysén.	Christian Hepp Felipe Vidal Adriana Carvajal Marta Alfaro María Paz Martínez Pier Barattini Viola Saldivia	49
8	Antibióticos en acuicultura	Pier Barattini	61
9	Impacto económico del uso de lodos de piscicultura como potencial fuente de nutrientes en agricultura.	Christian Hepp	69
10	Consideraciones finales.	Christian Hepp	77
	Bibliografía.		81

## CAPITULO 1

### ACUICULTURA Y GENERACIÓN DE LODOS EN PISCICULTURAS (FASE DE AGUA DULCE)

Christian Hepp K.

La problemática del uso de lodos procedentes de pisciculturas es un tema contingente, sobre todo considerando el desarrollo que ha tenido la acuicultura en la zona sur y austral de Chile. Las proyecciones de producción de la industria permiten señalar que necesariamente debiera crecer la cantidad de lodos generados a nivel de pisciculturas. A diferencia de lo que ocurre en otras instalaciones, que implican el manejo intensivo de especies animales, como salas de ordeña de bovinos, patios de alimentación, *feedlots*, crianza de aves y cerdos, donde también se producen purines y lodos; en el caso de las pisciculturas no existe normativa que autorice aún su uso en la agricultura. Dada la relevancia del tema, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) está desarrollando estudios en la región de Aysén, que tienen como objetivo general la determinación del potencial de los lodos de piscicultura para su uso benéfico en sistemas agropecuarios, particularmente sobre suelos volcánicos dominantes en esta zona (y todo el sur de Chile).

#### ANTECEDENTES GENERALES

Chile exportó en 2008 un récord de 445.000 toneladas de salmón y trucha, volumen que cayó 33% hacia 2010, con 297.000 toneladas exportadas. En 2011 se produjo ya una recuperación, con más de 395.000 toneladas producidas. En términos de divisas, el país exportó en el año 2008 casi 2.400 millones de dólares en productos de salmón y trucha, con una caída de 14% hacia 2010, pero luego recuperándose en 2011 con más de 2.920 millones de dólares (Salmón Chile, 2012).

En la Región de Aysén, la industria acuícola está teniendo un desarrollo explosivo, y se constituye en el principal sector productivo, con un aporte importante al desarrollo económico regional. A noviembre de 2005, el 16% del total de cosechas de salmónidos provenía de la Región de Aysén. En 2008, producto de la crisis del virus ISA, se produjo una contracción a nivel nacional, pero hacia 2011 se ha recuperado la dinámica de crecimiento y se proyecta que la Región de Aysén será un actor principal en los volúmenes producidos para exportación. En cuanto a pisciculturas, se estima que su número podría potencialmente cuadruplicarse hacia 2015. De acuerdo a datos de Salmon Chile (2012), Chile es el segundo productor de salmón en el mundo y el primero en trucha. La industria acuícola nacional se expandió a tasas de 22% anual en las últimas dos décadas. El sector acuícola genera alrededor de 55.000 empleos directos e indirectos, según la misma fuente. El número de centros operativos se expandió en casi 44% en la región de Aysén y un 16% en la región de los Lagos. La biomasa en centros de crianza se ha incrementado en 89% en la región de Aysén, superando a la región de los Lagos (Sernapesca, 2013).

En base a los antecedentes que se entregan más adelante, se desprende que la industria acuícola regional genera diariamente materiales residuales, comúnmente denominados “lodos”. Este material proviene del sistema de producción y corresponde básicamente al material fecal de los peces y restos de alimento no consumido en los estanques, los que son rescatados en las etapas finales del ciclo de flujo de pasada y/o en el proceso final de recirculación y filtrado de aguas. Se hace hincapié que en adelante los lodos se refieren a la fase dulceacuícola en pisciculturas terrestres.

Como la capacidad de almacenamiento de los lodos en las plantas de piscicultura es limitada, los residuos deben ser retirados. La normativa actual obliga a la industria a disponer de estos materiales residuales en vertederos autorizados o en plantas de tratamiento de aguas. En la Región de Aysén no existen realmente vertederos que cuenten con las condiciones para recibir este tipo de material, lo que lleva a problemas de tipo ambiental. Junto a lo anterior, la distancia desde los centros de producción acuícola (pisciculturas de crianza) hasta vertedero, junto al elevado contenido de humedad de los lodos (sobre 93-99,5%), hacen de las alternativas de disposición una posibilidad de muy alto costo operativo y cuestionable imagen desde el punto de vista medioambiental. En algunos casos se puede optar por la deshidratación de lodos, lo que implica tecnología de alto costo y también genera una torta deshidratada que presenta fuertes limitaciones para su uso productivo posterior, especialmente debido al uso de aditivos como p. ej. cloruro férrico.

Debe recordarse que las plantas de producción acuícola (pisciculturas) corresponden a la fase de crianza (alevinaje) y se realizan en aguas interiores, asociado a arroyos y/o ríos. De esta forma, requieren de un destino autorizado y ambientalmente aceptable para sus lodos de residuo. Tanto las características de los lodos, como su origen y localización difieren fundamentalmente de aquellos generados en centros de engorda de ubicación lacustre o marina.

El uso de lodos de piscicultura (fase de agua dulce), de no mediar el uso de sustancias sujetas a cuestionamiento ambiental, permitiría eventualmente incorporar nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo) en los suelos de los sistemas agropecuario vecinos. Ambos elementos son generalmente deficientes en la mayoría de suelos volcánicos de la zona y su corrección es imprescindible para sostener niveles adecuados de producción ganadera.

Desde el punto de vista de los productores agropecuarios, el reemplazo de fuentes de nitrógeno y fósforo tradicionalmente aplicados en programas de fertilización de suelos (urea, superfosfatos), tiene implicancias tanto económicas (costo de la unidad aplicada), como también ambientales (menor uso de fertilizante inorgánico y la no disposición en vertederos, con los consiguientes problemas de percolación y lixiviación de nutrientes).

La posibilidad de utilización de estos lodos en sistemas agropecuarios, con beneficio para los sistemas productivos ganaderos a través del aporte nutritivo a los suelos, tiene impacto como medida correctora de las deficiencias nutritivas de éstos, además de aportar elementos para detener su eventual degradación en algunas situaciones.

## **CICLO DE VIDA DE LOS SALMÓNIDOS Y LA GENERACIÓN DE LODOS**

La figura 1.1 muestra el ciclo de vida de un salmón, donde la etapa de agua dulce abarca desde el estado de ova hasta la etapa de smolt (este último es el estado en que se traslada a agua salada). En el caso de las pisciculturas, los ciclos se acortan y este tamaño debe ser llevado en camiones-estaque hacia los centros de producción de aguas saladas. Los lodos de piscicultura se producen especialmente entre el estado de alevín (cuando deja de alimentarse de su saco vitelino) hasta el smolt, que abandona la unidad de agua dulce.

Los lodos de piscicultura (material fecal de los peces + restos de alimento) se generan diariamente y habitualmente requieren ser sedimentados para su posterior extracción. Normalmente tienen muy altos contenidos de agua, con bajos niveles de materia seca, variable entre <1% hasta 12%, siendo más habituales los valores bajo 1%.

Los peces se alimentan en general en base a pellets de concentrados. Los pellets no consumidos, muy ricos en proteína y grasas, aportan especialmente nitrógeno, entre otros nutrientes. La mayor proporción de nitrógeno disuelto se produce por pérdidas de amoníaco vía branquial. El fósforo proviene mayoritariamente de las fracciones sólidas (heces o fecas de los peces), que provienen del proceso digestivo del pez.

En algunas situaciones, los lodos son tratados para su deshidratación, previa disposición. En estos casos pueden encontrarse niveles de hierro elevados, que pudieren limitar el uso de los lodos en usos agrícolas. Otros compuestos que se utilizan en los procesos deben ser analiza-

dos adecuadamente, como es el caso de antibióticos, cal, sal y otros. Asimismo, es necesario chequear presencia de eventuales patógenos.

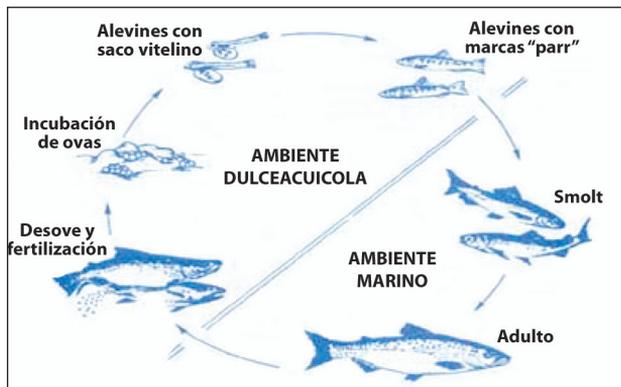


FIGURA 1.1. Ciclo de vida de los salmónidos, con sus etapas de desarrollo (*Agronovida*)

## APORTES DE NITRÓGENO Y FÓSFORO

El fósforo y el nitrógeno son elementos químicos de vital importancia en el desarrollo y crecimiento de los vegetales y condicionan fuertemente la producción y calidad de los mismos, con un fuerte impacto en los sistemas productivos agropecuarios. Su presencia en suelos volcánicos es habitualmente deficitaria y se requiere su reposición a través de fertilizantes comerciales.

Este trabajo estudia la alternativa de evaluar el encadenamiento entre la industria acuícola y la agropecuaria, ya que esta última utilizaría residuos orgánicos de la primera, dando un uso beneficioso a dichos residuos. De esta forma, cada piscicultura podría reciclar sus lodos en suelos cercanos a su punto de producción, bajando costos tanto para la empresa acuícola como para la empresa agropecuaria.

Las diferentes especies animales de importancia económica en la industria alimentaria producen estiércol y orina, que constituyen parte de los desechos, los que tienen un valor nutricional para uso en vegetales. El cuadro 1.1 compara diferentes especies y el aporte de sus desechos en términos de nitrógeno, fósforo y potasio. Si bien los rangos son bastante amplios en cada caso, los lodos de piscicultura tienen contenidos de nitrógeno y fósforo, que resultan interesantes en sistemas agropecuarios. Los niveles de potasio son bajos.

Las variaciones observadas en cada caso, dentro de la misma especie, se deben a factores como prácticas de manejo, tipo de animal, edad, alimento utilizado, fase de producción, dinámica del flujo de agua, procesos de tratamiento, etc.

g/kg (base MS)	Trucha	Vaca lechera	Aves	Cerdo
Nitrógeno	0,20-0,39	0,01-1,01	0,13-1,50	0,06-1,00
Fósforo	0,06-0,47	<0,01-0,25	0,01-0,40	0,04-0,65
Potasio	<0,01-0,02	0,01-0,65	0,06-0,54	0,05-0,63

CUADRO 1.1. Rangos en contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio en estiércol de diferentes especies de importancia económica en la industria alimentaria. (*Aquaetreat, 2003*).

La presente publicación entrega los resultados de un primer estudio titulado “Uso sustentable de lodos, procedentes de la fase de crianza de salmónidos, sobre suelos agropecuarios de origen volcánico en la Patagonia Occidental (Aysén)” que fue financiado por INNOVA Chile de Corfo y empresas asociadas.



## CAPITULO 2

### SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ACUÍCOLA DE FASE TERRESTRE: RECIRCULACIÓN Y FLUJO CONTÍNUO

María Paz Martínez de U.

El creciente desarrollo de la acuicultura chilena ha generado mayores exigencias a la producción de *smolt*, en términos de cantidad y calidad, en los sistemas productivos terrestres, que son los encargados de abastecer las necesidades de la fase en agua de mar (engorda de los peces). Incluso se ha llegado a decir que el “cuello de botella” para la salmonicultura del futuro puede estar en esta etapa.

Existen distintos tipos de sistemas productivos en acuicultura, y una clasificación ampliamente utilizada es la que toma en cuenta la cantidad de biomasa producida (cantidad de peces, smolt o cultivos que es capaz de soportar el sistema). De esta forma, se pueden clasificar en: sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos.

Los sistemas intensivos en acuicultura consisten principalmente, en el cultivo de peces en alta densidad, con utilización de un flujo de agua cuyos objetivos principales son proporcionar oxígeno a los peces y, por otro lado, retirar los productos de desecho del metabolismo de los mismos o los desechos de alimentos no utilizados, para que no se acumulen y así no interfieran en el proceso de producción. Para implementar estos sistemas se debe utilizar estanques, los que se encuentran disponibles en los mercados en variadas formas y tamaños. Además se debe disponer de un volumen adecuado de agua, el cual dependerá de diferentes factores, como son: la especie a cultivar, la densidad a utilizar, las prácticas de manejo acuícola y la tecnología de producción a emplear.

En muchos países, el acceso al agua disponible para estos tipos de cultivo, ha sido regulado. En la actualidad muchos inversionistas han decidido apostar a los cultivos de recirculación, o sea con re-utilización del agua.

El residuo generado en estos sistemas de producción se denomina “lodo” (fecas de los peces más restos de alimentos) y éste ha sido la materia prima utilizada durante la ejecución del presente proyecto. Es importante destacar que la tecnología utilizada para la producción de smolt y la cantidad de biomasa a producir, determinará la cantidad de lodos que se genere durante este proceso. Este capítulo pretende presentar una breve descripción de dos sistemas intensivos de producción, profundizando en los de recirculación.

## **SISTEMAS DE RECIRCULACION EN ACUICULTURA**

Un sistema de recirculación en acuicultura (SRA) es aquel que permite, mediante una serie de tratamientos del agua de cultivo, garantizar una calidad de agua suficiente y adecuada para el mantenimiento de los organismos acuáticos en sus diferentes estadios (reproducción, larvario, pre-engorda o engorda). Todo ello con un importante ahorro de agua nueva al sistema (renovación de entre un 5 y un 10 % de todo el volumen de cultivo al día). Los SRA proporcionan un medio de cultivo estable para los peces que debe ser manejado en forma integral. Estos funcionan para mantener los parámetros de calidad del agua mediante procesos como la filtración, el control de temperatura, el control del nivel de oxígeno, el nivel de amonio, el pH, la desinfección y otros. De esta manera, están contribuyendo a una producción más intensiva, además de lograr ahorros significativos en energía y agua en relación a las pisciculturas tradicionales de circuitos abiertos.

Existen estudios en Francia, Dinamarca y Alemania, llevados a cabo en pisciculturas de truchas, que aportan datos muy interesantes en relación a los SRA. En estos sistemas, las necesidades de agua nueva son de aproximadamente 1m<sup>3</sup> por cada kg de alimento aportado, lo que supone una proporción cien veces menor que en los sistemas tradicionales de circuito abierto (pasada). Por consiguiente, el caudal de agua residual desciende proporcionalmente, simplificando enormemente el tratamiento de los efluentes.

En la actualidad los SRA son valorados, porque con ellos se puede lograr un incremento notable de la productividad, la producción continuada a lo largo del año con mayor independencia de las condiciones climáticas externas, incrementar el índice de conversión de los alimentos, mejorar el control de la calidad del agua de cultivo y reducir el volumen de agua residual a tratar.

Es importante tener en cuenta que la tecnología de los SRA requiere de una inversión inicial superior, que puede verse compensada con el incremento del rendimiento de producción

por m<sup>2</sup> de superficie cultivada o por m<sup>3</sup> de agua nueva utilizada. Es necesario destacar que el manejo simultáneo de muchos parámetros para lograr el buen funcionamiento del SRA, requiere de personal calificado. En un SRA óptimo se mantienen los peces bien alimentados y con una calidad de agua adecuada para garantizar el máximo bienestar y crecimiento de toda la biomasa. Al sistema se le aporta alimento y los peces generan residuos (fecas y restos de alimentos) y estos consumirán oxígeno, lo que produce un deterioro de la calidad del agua rápidamente si no se toman las medidas necesarias. El flujo del agua es el mecanismo mediante el cual se aporta el oxígeno necesario al tanque de cultivo. Al mismo tiempo, con ese mismo flujo se retiran los productos residuales generados. Estos son llevados hacia los sistemas de tratamiento de agua y de ahí, una vez tratada y mejorada (por distintos tipos de rotofiltros, biofiltros etc), retorna al tanque de cultivo. El diseño de un SRA debe garantizar que los parámetros más importantes que afectan la calidad del agua (oxígeno, nitrógeno amoniacal total (TAN), dióxido de carbono, sólidos en suspensión, pH, temperatura), se mantienen estables y equilibrados a lo largo de todo el proceso de cultivo. Los parámetros más importantes a monitorear durante el proceso son los siguientes:

Eliminación de sólidos:

Existen diversos sistemas de eliminación de sólidos disponibles en el mercado nacional: filtro de tambor rotatorio (Figura 2.1), filtro de banda o espumadores. Es importante mencionar que por cada kilo de alimento aportado al sistema, se generan aproximadamente, 250 gramos de sólidos (SST).

El filtro rotatorio funciona cuando las partículas son atrapadas en el lado interno de la malla de filtración, escurriendo el agua filtrada fuera de la malla. El filtro permanece en su posición inicial, es decir, estático. A medida que las partículas son retenidas, la malla comienza a saturarse, lo que provoca un incremento en el nivel del agua en el interior del filtro, hasta alcanzar el nivel máximo establecido. Una señal eléctrica generada por un sensor de nivel del tipo varilla, acciona el tambor rotatorio conjuntamente con la bomba del retrolavado. El tambor rotatorio gira en 180 grados, con lo que la parte limpia de la malla queda sumergida en el agua, continuando la filtración. La bomba de retrolavado inyecta agua limpia con una presión de 3 bar sobre la parte superior de la malla, con lo que se retiran los residuos de la misma. Éstos caen directamente en una bandeja interna con declive para ser conducidos en un estanque de depósito de lodos. Luego una bomba retira los lodos de forma continúa hacia otro estanque



FIGURA 2.1 : Filtro de Tambor Rotatorio.

### **Eliminación de amonio:**

Los biofiltros (figura 2.2) son simples depósitos de material, con una gran superficie específica para obtener una elevada colonización de bacterias nitrificantes.

Existen varios tipos de estos biofiltros en el comercio, entre los cuales se mencionan los sumergidos, los biodiscos rotatorios, etc. Hace más de 20 años, los biofiltros sumergidos se consideraban como los mejores, sin embargo, en los últimos años, otros tipos como los biológicos rotatorios y los filtros de lecho, han demostrado ser más efectivos para la remoción del amoníaco. Existen numerosos factores que pueden afectar el buen funcionamiento de un biofiltro y estos pueden ser tanto de origen físico, como químico y biológico. Los factores químicos se relacionan al pH del medio, la alcalinidad del agua, la concentración de amoníaco y nitritos, el oxígeno existente, los sólidos suspendidos, la salinidad, la tasa de difusión de los gases; mientras que los factores físicos abarcan la temperatura, la profundidad de ubicación del filtro, la sección transversal de éste, el material de confección, la luz, etc. Finalmente, los factores biológicos también influyen. Por ejemplo, la cantidad en peso de las células bacterianas existentes, la formación de un lecho de bacterias para el inicio del funcionamiento del biofiltro, etc.

Se estima que por cada gramo de nitrógeno amoniacal nitrificado se requiere 4,57 g de oxígeno y 7,05 de  $\text{CaCO}_3$  o 0,143 equivalentes de alcalinidad.



FIGURA 2.2 Detalle de construcción de un biofiltro.

### **Aporte de Oxígeno:**

Es necesario aportar aproximadamente unos 500 gramos de oxígeno por cada kilo de alimento suministrado a los peces. Las bacterias nitrificantes también respiran, por lo que deben ser consideradas en este cálculo. Se utilizan muchos sistemas para oxigenar el agua: bombas aireadoras, bi-cono invertido, tubo en U, etc.

### **Eliminación de CO<sub>2</sub>:**

El CO<sub>2</sub> de la respiración de los peces y las bacterias debe ser eliminado. Se estima que por cada kilo de alimento aportado al sistema se generan en el sistema 0,7 kilos de CO<sub>2</sub>. La manera más sencilla y económica que se utiliza para eliminarlo son las columnas de desgasificación o simple aireación.

### **Control del pH:**

La respiración de los peces y las bacterias del biofiltro, hacen aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> en el agua, haciendo que ésta tenga tendencia a acidificarse. Por otro lado, las bacterias utilizan el carbono presente en el agua para crecer, por tanto debe monitorearse la alcalinidad, sobre todo en agua dulce. Se deben aplicar aproximadamente 200 gramos de bicarbonato sódico o el equivalente con alguna base tipo NaOH, por cada kilo de alimento suministrado al sistema.

### **Desinfección:**

En todos los SRA se realiza la desinfección mediante lámparas ultravioletas u ozonización. Se estima que por cada kilo de alimento suministrado se deben aplicar entre 13 y 24 gramos de ozono.

### Modificación de la temperatura:

Únicamente en los SRA se plantea la necesidad de aumentar la temperatura del agua, y es importante destacar que sólo se calienta la fracción de agua nueva que se ingresa al sistema. Los métodos que se utilicen para conseguir el aumento de la temperatura, dependerán de la realidad de cada piscicultura (en relación a disponibilidad y costos). Por nombrar algunos sistemas, están las calderas, bombas de calor reversible, gas, energía solar, etc.

### Control y Automatización del sistema:

Todos los parámetros señalados anteriormente, hacen que el SRA no sea un proceso simple, por lo que se ha optado por su automatización. Estos funcionan muy bien gracias a las tecnologías disponibles, incluso algunos incluyen sistemas de alarmas lo que permite mantenerlos funcionando 24 horas al día los 365 días del año.

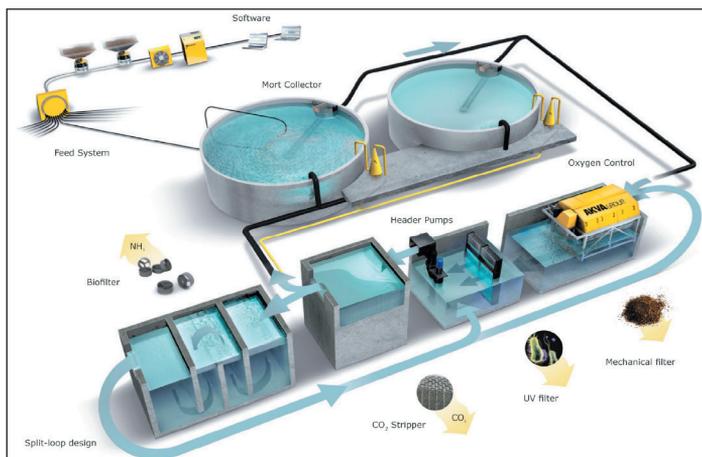


FIGURA 2.3: Diagrama de componentes de un sistema de recirculación. (Fuente AKVA Group)

### SISTEMA TRADICIONAL (Flujo Continuo)

Las prácticas tradicionales de producción en piscicultura requieren grandes cantidades de agua de muy buena calidad, que actualmente se encuentra limitada en muchas áreas del planeta. Se puede definir un sistema de producción tradicional de flujo continuo como aquel que utiliza grandes volúmenes de agua para mantener en buen estado un cultivo. En estos sistemas, a diferencia del descrito en el punto anterior, la reutilización de agua puede ser parcial o nula. La generación de aguas residuales es alta, aunque se cuenta en algunos casos con distintos tipos de filtros cuya finalidad es eliminar la materia orgánica del agua, evitar la entrada de peces silvestres u otros depredadores.

Este tipo de pisciculturas cuentan con una serie de filtros de distintos tipos, los que son ubicados antes y después del ingreso del agua a los estanques. Algunos ejemplos son los tamices fijos, bolsas de malla, filtros de piedra y grava, filtros de caja, etc. Además, este tipo de producción está generalmente asociado a la utilización de un decantador, para acumular los sólidos del proceso de producción. La decantación es un método físico de separación de mezclas heterogéneas, que pueden ser formadas por un líquido y un sólido. Es necesario dejarla reposar para que el sólido se sedimente, es decir, descienda y sea posible su extracción por acción de la gravedad, y una vez que sedimenta puede ser succionado por bombas para su disposición final.

Como conclusión general, se puede decir que estas tecnologías permiten intensificar la producción. En el caso de la SRA, la mantención de los cultivos controlados se produce ahorrando agua, energía, reduciendo las superficies de cultivos y simplificando el retiro de los residuos, con altas inversiones iniciales que después se compensan en sus ahorros, siendo una de las alternativas más sustentables de producción en muchas partes del planeta.

En el caso de sistemas continuos tradicionales de producción, también se pueden lograr producciones intensivas, con mayores gastos de agua, calefacción y recursos humanos, pero con inversiones iniciales menores.

A la hora de elegir un sistema de producción, se debe considerar, los recursos con que se cuenta, objetivos de producción y características del emplazamiento de la futura piscicultura. Cada uno de estos factores, ayudará a la hora de tomar decisiones sobre cuál sistema será el adecuado para una empresa determinada.



## CAPITULO 3

### ESTABILIZACIÓN DE LODOS EN LAGUNAS

Daniel Cross O.

La utilización de lagunas para tratamiento de residuos líquidos con carga orgánica biodegradable se ha utilizado desde mediados del siglo pasado. ¿En qué radica que un procedimiento de tratamiento se mantenga, aún cuando se han desarrollado tratamientos de residuos líquidos con tecnología más avanzada? La respuesta a esto se obtiene al destacar los siguientes aspectos que son propios del tratamiento por medio de lagunas:

- Bajo costo de construcción y operación.
- Demanda muy poca operación dedicada o especializada.
- Tienen una retención de sólidos que puede alcanzar los 5 a 10 años.
- Son compatibles con tratamiento o disposición final de efluentes en suelos.
- 

Es importante destacar, al mismo tiempo, que este tipo de tratamiento presenta algunas desventajas o problemas que son necesarios de considerar y evaluar. En particular, lagunas sin aireación requerirán algún tipo de tratamiento secundario para cumplir las normas de descarga:

- Pueden requerir una superficie significativa de terreno.
- En algunos casos se puede presentar un gran desarrollo de algas o plantas acuáticas superficiales, lo que puede complicar su descarga regular.
- Es necesario tener el suelo de las lagunas perfectamente aislado para no contaminar los acuíferos.
- Lagunas con un diseño inapropiado u operadas incorrectamente pueden producir olores molestos (de especial cuidado en sectores aledaños a poblaciones).

Las lagunas se pueden clasificar según:

- Régimen de operación hidráulico
- Disponibilidad de oxígeno

### **RÉGIMEN DE OPERACIÓN HIDRÁULICO**

Se definen los siguientes tipos y procedimientos:

#### **Lagunas cero descarga:**

El nivel de la laguna se controla sólo por la tasa de evaporación, de manera que el caudal de afluente, en régimen estacionario, debe ser igual a la pérdida por evaporación. Estas lagunas sólo son aptas para lugares de baja tasa pluviométrica y altas temperaturas.

#### **Lagunas de descarga controlada:**

El nivel de la laguna se mantiene por descargas discretas, que se realizan en determinadas épocas del año. En particular, si se descarga a cuerpos de agua superficial, la frecuencia se establecerá de acuerdo a la capacidad de abatimiento secundario de éstos.

#### **Lagunas de descarga hidrográfica:**

Son similares a las de descarga controlada, pero se refieren a cursos de aguas como ríos o arroyos. La descarga se hará coincidir con el máximo caudal de dicho cuerpo de agua, que en general ocurrirá durante la época de deshielo. De esta manera, el diseño de laguna deberá considerar un ajuste a este tipo de descarga restringida.

#### **Lagunas de descarga continua:**

Este régimen hidráulico obliga a tener un sistema de tratamiento secundario para poder mantener la descarga continua. Éste puede ser a través de sistemas de riego, un humedal o un cuerpo de agua que tenga la capacidad para dar cuenta del tratamiento secundario del efluente.

### **DISPONIBILIDAD DE OXIGENO**

Según la disponibilidad de oxígeno, se tienen los siguientes tipos de lagunas:

#### **Lagunas aeróbicas:**

La condición aeróbica se obtiene por el desarrollo de microorganismos fotosintéticos en toda la columna de agua. Para lograr esta condición, estas lagunas se diseñan con poca profundidad, ya que con esto se permite que la luz solar penetre hasta el fondo de la misma, lo que permite una gran actividad fotosintética en toda la columna de agua mientras haya luz solar.

En general, la profundidad o altura de columna de agua va desde los 0,3 a 0,6 metros. Estas lagunas tienen generalmente un tiempo de retención hidráulica o HRT de cinco días (es decir demoran hasta cinco días para llenarse). Se utilizan en conjunto con otras lagunas o tratamientos previos. Son adecuadas para climas soleados y cálidos.

### **Lagunas facultativas**

Este tipo de lagunas son las más comunes dada su gran versatilidad y se conocen también como lagunas de estabilización u oxidación. La columna de agua va desde los 1,5 a 2,5 m, y se puede distinguir una zona superior que es aeróbica y una zona inferior anóxica (llegando a ser prácticamente anaerobia en su fondo). La extensión de cada una de las zonas dependerá de elementos naturales como el viento y la temperatura, que podrán favorecer la disolución de oxígeno en el agua y su mezcla con zonas más profundas. Aquí también la fotosíntesis puede jugar un rol importante en términos de aportar oxígeno a parte de la columna de agua.

El abatimiento de la carga orgánica es llevado a cabo por bacterias aeróbicas ubicadas en el segmento superior, y también por las bacterias facultativas y anaerobias que se ubican en la zona inferior. Las lagunas facultativas se pueden utilizar con cualquier régimen hidráulico y pueden operar con HRT de 20 a 50 días o más.

### **Lagunas aireadas con mezcla parcial:**

Este tipo de lagunas son más profundas y con una mayor capacidad de carga orgánica en el afluente. El oxígeno es aportado por medio de mezcladores mecánicos que están en la superficie en balsas y con difusores que se encuentran en el fondo de la laguna.

La columna de agua va desde los 2 a 6 m, y trabajan con un tiempo de retención (HRT) de tres a veinte días. El uso de estas lagunas está muy difundido, ya que pueden tratar una cantidad de carga orgánica por unidad de superficie muy superior al de las lagunas facultativas. Lagunas anaeróbicas:

Estas lagunas se utilizan para afluentes con alta carga orgánica en zonas rurales remotas. La columna de agua es de 5 a 10 metros y trabajan con un HRT de 20 a 50 días o más.

## **FUNCIONES DE UNA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN**

La capacidad de remoción o abatimiento de parámetros críticos en lagunas tiene un comportamiento diferente a los sistemas de depuración intensivo, a pesar de ser ambos un tipo de tratamiento biológico de la carga orgánica, medida a través de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO); los sólidos suspendidos totales (SST); el nitrógeno; el fósforo; y la remoción de patógenos.

### **Abatimiento carga orgánica (DBO):**

Las lagunas se pueden considerar como reactores biológicos de baja masa, donde la oxidación de la materia orgánica es realizada por una masa microbiana aerobia o facultativa. En general, la DBO insoluble es removida por sedimentación. El alcance de estos sistemas para la remoción de DBO depende principalmente del diseño, operación y condiciones climáticas. Pueden remover hasta un 90 % de la DBO si su diseño y operación es la correcta.

Remoción de Nitrógeno:

La remoción de nitrógeno en lagunas es dependiente de varios factores, como volatilización de amonio (que es dependiente del pH), fijación en biomasa de algas, ciclos microbianos de procesos de nitrificación/desnitrificación, sedimentación de los lodos, etc. La remoción de nitrógeno puede variar de un 40 a 80% dependiendo del tipo de laguna y condición climática.

### **Remoción de fósforo:**

La remoción de fósforo en lagunas es mínima. Para incrementar la capacidad de las lagunas para la remoción de este elemento se deben agregar algunos químicos como alúmina o cloruro férrico. Evidentemente que esto complica la operación y aumenta los costos del tratamiento. Deberá analizarse siempre la posibilidad de la reducción del fósforo en un tratamiento secundario, como fijación en biomasa vegetal, entre otros.

Como se ha planteado, los sistemas de tratamiento de residuos líquidos por lagunas, normalmente requieren de algún proceso secundario para llevar los parámetros críticos a niveles de descarga al ambiente. El tratamiento en suelo consiste en la aplicación controlada de efluentes en una superficie de tierra cultivada. La presencia de una gran biomasa asegura que la carga orgánica (ahora nutrientes) puedan ser fijados, dejando un escurrimiento libre de contaminantes.

### **APLICACIÓN DE EFLUENTES AL SUELO**

Existen al menos tres procedimientos para la aplicación de efluentes al suelo: flujo lento; infiltración rápida; y el escurrimiento. Desde un punto de vista de uso agropecuario, el flujo lento es el sistema utilizado, ya que este procedimiento considera la aplicación discreta de efluentes sobre cultivos con un concepto asimilable al de riego. De esta manera, la aplicación de efluentes tiene un aporte de nutrientes y también un aporte hídrico, que puede ser aprovechada por las praderas y/o cultivos. Este sistema ha probado ser muy eficiente en la remoción de los parámetros como carga orgánica (DBO), sólidos suspendidos totales; nitrógeno, fósforo, y la remoción de patógenos

## APLICACIONES PRÁCTICAS

A través de un proyecto experimental, destinado a explorar las potencialidades de uso de lodos de pisciculturas, se han realizado pruebas prácticas de aplicación de estos lodos sobre suelos agropecuarios. Dado que ello no está normado en la actualidad, solamente se autoriza para fines experimentales, aunque se debe estudiar su implementación como forma de reciclaje de estos elementos residuales. Lo anterior, debido a que la carga nutricional del lodo contiene elementos, especialmente nitrógeno y fósforo, que es de utilidad para el crecimiento vegetal, y que de esta forma puede ser retirado parcialmente de estos efluentes para un uso benéfico.

De esta forma, en la Región de Aysén, para el tratamiento de lodos se probó el uso en una fase primaria de una laguna facultativa y una fase secundaria por irrigación de suelos para cultivo y praderas (Figura 3.1), con flujo lento. La laguna tuvo una columna de 3 m, con una HRT variable, pero al menos de 30-50 días, remoción de la fase líquida con sistema de riego y retención de lodos por períodos prolongados, que puede superar los dos años.



FIGURA 3.1 Aspersión de la fase líquida de una laguna de sedimentación.



## CAPÍTULO 4

### CARACTERIZACIÓN DE LODOS DE PISCICULTURA CON POTENCIAL PARA EL SECTOR AGROPECUARIO

Christian Hepp, Felipe Vidal, Pier Barattini y Adriana Carvajal

#### GENERALIDADES

Los lodos de piscicultura son residuos de un proceso de producción, que involucra organismos vivos y está sujeto por lo tanto a una serie de factores que inciden sobre su composición final. Como ya se señaló anteriormente, los lodos son el resultado de la producción de heces de los peces, además de los restos de alimento no consumido, y de otros elementos utilizados eventualmente en el proceso (sal, cal, productos farmacológicos, etc.). Desde el punto de vista nutricional, sin embargo, las fecas y restos de alimento serán indudablemente los determinantes principales de la composición final del lodo.

Por ejemplo, la composición del lodo dependerá de la fase de producción en la piscicultura y tipo de alimento utilizado (ej. contenido de proteína, digestibilidad), del manejo de alimentación (eficiencia del mismo y el porcentaje de pérdidas), e incluso del tipo de piscicultura. Posteriormente incidirá la forma en que se manipule el lodo, es decir si se considera al estado fresco o bien estabilizado en una laguna de decantación u otra modalidad. De esta forma, existirán variaciones naturales en la composición del mismo. Un factor adicional lo constituye el porcentaje de materia seca que contenga el lodo (o al revés, el nivel de humedad del mismo), que tendrá implicancias directas de tipo práctico al momento de aplicarlo sobre el suelo.

## CARACTERIZACIÓN DE LODOS

Los resultados de los lodos analizados por el proyecto en la Región de Aysén, indicaron niveles promedio de materia seca de 65,2 g/l, mientras que en otras pisciculturas los valores fueron muy inferiores, de sólo 0,4 - 1,4 g/l, aproximadamente. Ello se debe a diferentes sistemas de producción y a diferentes formas de manejar el residuo. En los casos de residuos de muy baja concentración, para el eventual uso agropecuario será necesario concentrar estos lodos, mediante sistemas de decantación, que a su vez permitan pre-estabilizarlos. La figura 4.1 muestra la alta variabilidad encontrada en muestras de lodos extraídos de un mismo decantador de piscicultura.

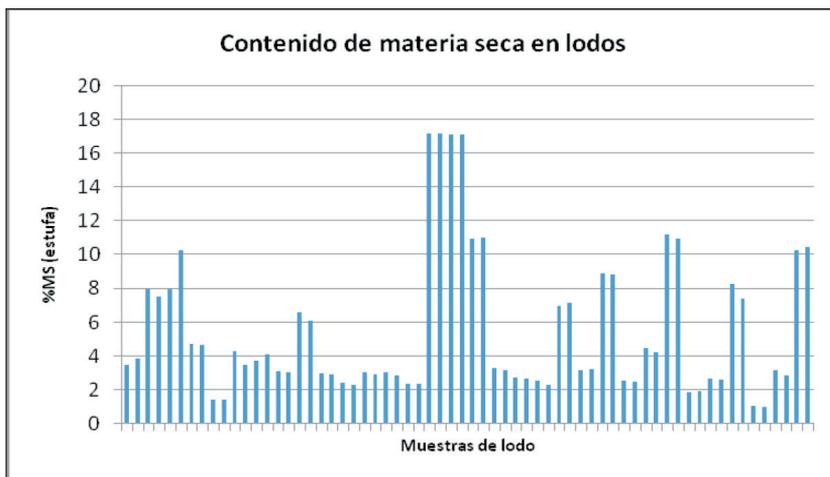


FIGURA 4.1. Contenido de materia seca de muestras de lodos extraídos de un mismo decantador de piscicultura.

De acuerdo a la alta variabilidad observada, es importante caracterizar el lodo que se extrae de las lagunas o decantadores (especialmente su contenido de materia seca, un elemento vital a la hora de dosificar su aplicación en terreno) y que la metodología de extracción debe ser observada con cuidado, ya que el uso de los mismos equipos, implementos y personal pueden redundar en contenidos de materia seca muy diferentes en cada situación. Por ejemplo, en este caso, un factor central es el constante cambio de la manguera de succión en el fondo del decantador, de modo de poder maximizar el contenido de sólidos en cada extracción.

Material		%MS	Sólidos totales	Sólidos Suspendidos volátiles	Sólidos suspendidos totales	DQO	pH
			g/l			mg/l	
Lodo sedimentado	mín	0,7	6,1	0,17	2,72	3.700	6,01
	max	11,9	90,2	4,27	79,62	25.610	7,07
	promedio	3,84	34,84	1,34	24,5	12.800	6,46
Fase líquida laguna	mín	0,2	2,1	0,014	0,1	403	6,93
	max	0,9	8,8	0,304	4,13	1.378	7,53
	promedio	0,41	4,33	0,114	1,32	979	7,25

CUADRO 4.1. Parámetros promedio medidos en lodo y sobrenadante de pisciculturas en Aysén.

El cuadro 4.1 resume algunos parámetros medidos en el lodo y la fracción líquida de lagunas de varias pisciculturas. Se aprecia nuevamente una amplia variación en el contenido de humedad, el que fluctuó entre 88,1 a 99,3%, con un promedio de 96,2% en lodos; y entre 99,1-99,8%, con promedio de 99,6% en la fracción líquida (sobrenadante). Los valores de pH tuvieron promedios de 6,46 y 7,25, en lodo y fracción líquida, respectivamente. En sólidos totales, los lodos tuvieron un promedio de cerca de 35 g por litro, con una proporción menor en cuanto a sólidos suspendidos volátiles. En la fase líquida, el promedio de sólido total supera levemente los 4 gramos por litro. El lodo tiene un valor DQO promedio de 12.800 mg/l, mientras que en la fase líquida es de sólo 979 mg/l, en promedio, lo que indica que una parte sustancial de la fracción orgánica se encuentra en el lodo.

Según el cuadro 4.2, el lodo analizado tuvo una variación amplia en nitrógeno disponible, de hasta cuatro veces. Éste corresponde principalmente a nitrato y amonio, el cual es de inmediata disponibilidad para los vegetales, siendo probablemente el causante de las rápidas respuestas que se observan al aplicar lodos en praderas y cultivos, como se verá más adelante. Sólo una parte del nitrógeno está en forma disponible, ya que la mayor parte corresponde a formas orgánicas.

En el mismo cuadro 4.2, el fósforo también se encuentra en formas inorgánicas disponibles y orgánicas (no disponibles en forma inmediata). Se observó también una amplia variación para este elemento en las muestras analizadas, llegando a variar hasta en un factor de seis la concentración de fósforo disponible. Sólo una muy pequeña fracción corresponde a P disponible, mientras que la mayoría se encuentra en forma orgánica. En términos de fósforo total, este elemento presenta una concentración muy variable de entre 8,5-75,5 g/kg en el lodo analizado (cuadro 4.2).

La concentración de potasio y de azufre disponible es baja y no representa en este caso mayor importancia para el uso agropecuario, dada su baja magnitud de aporte (cuadro 4.2).

Muestra	N* disponible	N total	P disponible	P total**	K disponible	S disponible	pH	M.O.
	mg/kg	%	mg/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg		%
Base seco	539 – 3122	2,6-3,7	862 – 5257	8,5-75,5	71-173	29 – 67	5,3 – 6,9	47 – 56

\*N como nitrato y amonio (8-31% del N total) \*\*fracción importante en eventual efecto residual

CUADRO 4.2. Rangos encontrados en contenido de nutrientes principales disponibles y totales en muestras de lodos de piscicultura. Lodo base materia seca (100%).

En el caso de nitrógeno y fósforo existen aportes significativos de N y P disponible. En nitrógeno, una aplicación de 100 m<sup>3</sup> de lodo, por ejemplo con un 7% de materia seca implica un aporte de nitrógeno disponible de entre 4-22 unidades de nitrógeno (como nitrato y amonio). En el caso del fósforo, el aporte es mayor aún, y fluctuaría entre 6-37 kg de P/ha, lo que implica entre casi 14-78 unidades de fósforo (expresado como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Esa dosis puede, en ciertas circunstancias suplir la totalidad de fósforo que requiere una pradera o cultivo forrajero durante la temporada. Ello significa por lo tanto reemplazar fuentes artificiales de fósforo por un aporte de origen orgánico (lodo estabilizado).

El cuadro 4.3 resume los rangos de concentración de metales pesados (valores totales), encontrados en muestras de lodo analizadas. Los valores encontrados son muy inferiores a los reportados como limitantes para el uso de lodos en suelos agropecuarios.

As	Cd	Cu	Cr	Hg	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
mg/kg											
2,5-5,7	2,3-3,3	28-31,3	5,61	0,11	4750	491,2	0,87	<3,5-1,8	3,8-3,9	2,27	768- 952

CUADRO 4.3 Rangos encontrados en concentración de metales pesados en muestras de lodos de piscicultura.

Los suelos volcánicos presentan muy frecuentemente déficit en los niveles de fósforo disponible. Éste es un elemento vital para un adecuado crecimiento, desarrollo y producción de las plantas. Su relevancia es tal, que es la base del programa de recuperación de suelos degradados (SIRSD) que se aplica en gran parte del centro y sur del país, incluyendo las regiones australes. De esta forma, el estado subsidia hasta el 80% del costo la aplicación de fósforo en dosis tales que permitan corregir las deficiencias.



FIGURA 4.2 Lodo de piscicultura estabilizado, en su estado natural para aplicación sobre suelos agropecuarios

Debe tenerse en cuenta, que en el caso de estos lodos, una parte de los nutrientes está disponible y otra se encuentra en forma ligada a moléculas orgánicas, que debe entrar al sistema suelo y ser mineralizado. Es por ello que al aplicar lodos debe considerarse también los efectos residuales de fósforo entre temporadas sucesivas.

La concentración de nitrógeno disponible, si bien es menor a la de fósforo, no deja de ser significativa, sobre todo considerando las fracciones de más inmediata disponibilidad para los vegetales.

Un aspecto en el que también debe hacerse hincapié, es que la aplicación de lodos debe seguir parámetros técnicos que consideren una dosificación tal que no genere aplicaciones excesivas de este elemento al suelo.

De acuerdo a otros estudios (cuadro 4.4), el proceso de decantación genera diferencias entre la fase líquida y el lodo propiamente tal, en términos físicos y químicos. El valor de  $DBO_5$ , N total, N amoniacal, P total y K total son muy superiores en el lodo que en la fracción líquida, con lo que el proceso de decantación permite concentrar los nutrientes (y las poblaciones microbianas) en el lodo (sedimento). Asimismo, la comparación con lodos de establecimientos de cerdos (como referencia) muestra que dichos lodos tienen valores  $DBO_5$  muy superiores (4 veces), mayores niveles de nitrógeno total (el triple), 20 veces más potasio, pero 5 veces menos fósforo. Los suelos volcánicos sobre los cuales se aplicarían estos lodos son deficitarios justamente en este último elemento. El agua sobrenadante tendrá un efecto de riego, ya que su contenido de materia seca es bajo y su concentración de nutrientes es más limitada, como se verifica más adelante.

	Materia Seca	pH	DBO <sub>5</sub>	N total	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	P total	K total
	%		mg/l	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
Fase líquida	4,3	7,2	21	0,09	0,00	0,05	0,02	0,81
Lodo piscicultura	22,6	6,8	5.615	2,65	0,00	0,45	10,09	0,21
Lodo cerdos	6,0	7,0	20.000	8,33	0,00	5,00	2,17	4,17

CUADRO 4.4 Análisis físico-químico de material en tanque de decantación en piscicultura de Turbot. Unión Europea (Proyecto Aquaetreat-UE)

Durante el desarrollo del proyecto, se realizaron muestreos periódicos a aguas asociadas a las pisciculturas, lodos en sus diferentes etapas (fresco, decantado, tratado, etc.) y sobrenadantes o fracciones líquidas de lagunas de sedimentación. Se realizó una analítica completa para caracterizar las aguas relacionadas con las pisciculturas, tanto aquellas de ingreso, como las de salida. Asimismo se tomaron algunos puntos como testigo, para comparación (cuadro 4.5).

Las aguas de ingreso a la piscicultura tienen una acidez (indicada por valor pH) algo superiores a 7 (neutro) y no presentan en su composición factores limitantes según norma de riego. Las aguas post-proceso (rebalse y sobrenadantes), es decir aquellas que van a cursos de agua o bien a laguna de sedimentación y posteriormente podrían ser extraídas para uso agropecuario, cumplen normalmente con la norma, aunque presentan niveles más altos en la relación de absorción de sodio (RAS), producto de mayores concentraciones de este elemento, lo que se relaciona con la adición de cloruro de sodio en ciertas etapas del proceso de la piscicultura. La RAS relaciona la concentración de cationes de sodio con los de calcio y magnesio. En conjunto con la conductividad eléctrica (CE) es un indicador de potenciales riesgos de salinización, en el caso de suelos con alto contenido natural de sales y más bien de texturas finas (arcillosos) y drenaje impedido o lento.

Sin embargo, estos niveles de RAS y de CE deben evaluarse en relación a los tipos de suelos. En el caso de estos suelos volcánicos, se trata de suelos altamente permeables y bajos en contenidos de sales, por lo que probablemente no se esperarían mayores riesgos en este sentido, al manejarse adecuadamente las dosis de aplicación. En ellos, la salinidad es muy baja en forma natural, su textura es de tipo franco arenoso y presentan muy buen drenaje, con tendencia a favorecer la lixiviación y por lo tanto el lavado de sales desde el perfil, ayudado también por un régimen pluviométrico más alto.

Descripción	pH	CE	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>
		μS/cm	mg/l					
Agua ingreso pisciculturas*	7,2-7,9	83-155	0,86-1,31	0,11-0,25	0,10-0,15	0,03	9,6-14,9	<1
Fase líquida laguna**	6,86	285	0,84	0,14	1,52	0,03	11,5	34,8
Rebalse laguna piscicultura**	6,94	327	0,92	0,15	1,89	0,03	11,0	53,9
Aguas abajo desembocadura efluente**	7,1	232	0,88	0,18	1,08	0,04	12,0	22,3
Lodo fresco***	6,93	3.800	8,73	3,62	7,50	0,51	154	111

\*Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales en plantas.

\*\*Agua con la cual, generalmente, no se observarán efectos perjudiciales en plantas. Contenido de sodio porcentual excede valor normado.

\*\*\*No clasifica como agua.

CUADRO 4.5. Análisis de aguas, sobrenadantes/fracciones líquidas y lodos de piscicultura, según norma chilena de calidad de aguas de riego.

En cuanto a los lodos, éstos claramente no califican como “agua”. El lodo fresco presenta valores similares de pH a las fracciones líquidas, sólo levemente más ácido, aunque muy cercano a la neutralidad. La concentración de sales es muy superior, ya que éste, a pesar de ser bastante diluido, presenta mayor contenido de sólidos solubles y totales a diferencia del agua y de los sobrenadantes. Destacan los mayores niveles de sodio, que también inciden en una alta conductividad eléctrica. Estos lodos representarán un aporte de algunas sales (bases) al suelo.

Por otra parte, un caso especial representa el lodo obtenido de un proceso de prensado y deshidratación, que ha sido tratado con elementos coagulantes, como el cloruro férrico y polímeros. Este lodo, dada su composición, con muy altos niveles de sodio y cloro, además de una elevada conductividad eléctrica y pH extremadamente alcalino, no es apto para su uso en suelos agropecuarios. El lodo que se utilizaría sobre suelos agropecuarios no debe ser sometido a este proceso de deshidratación, sino que se derivaría directamente como lodo fresco a decantación normal de lodos, donde se concentra y se permite su estabilización.

Como antecedente adicional, el instituto EULA, dependiente de la Universidad de Concepción, realizó un análisis de algunos lodos de piscicultura en la Región de Aysén y concluyó que los materiales analizados: no presentan toxicidad por metales pesados (los niveles encontrados en este estudio son además muy inferiores a los normales en suelos de la zona); no son reactivos (ácido cianhídrico, ácido sulfhídrico); no son corrosivos; no son inflamables; no presentan toxicidad aguda ni crónica.

## INFILTRACIÓN EN SUELOS

La cantidad e intensidad de lluvias en las zonas estudiadas asegurarían un adecuado lavado de sales mediante procesos de lixiviación natural, lo que ha sido comprobado a través de pruebas de infiltración en etapas anteriores. En términos de aplicación de agua, el balance teórico promedio indica que sería factible aportar agua vía riego desde al menos septiembre en adelante y hasta fines de abril e incluso el mes de mayo.

Pruebas de infiltración en suelos (figura 4.4) en el sector de Valle Simpson muestran que en este suelo se requieren 60 minutos para infiltrar alrededor de 80 mm de agua (alrededor de 100 mm en 80 minutos). La tasa de infiltración, medida en mm/h indica que la curva se estabiliza aproximadamente a los 30 minutos y en esta evaluación tiende a lograr un valor de estabilización de aproximadamente 70 mm/h (figura 4.3a).

Analizando las figuras para el sector de Emperador Guillermo (figura 4.3b), se observa que en este suelo se requieren 60 minutos para infiltrar alrededor de 135 mm de agua (alrededor de 165 mm en 80 minutos). La tasa de infiltración, medida en mm/h indica que la curva se estabiliza aproximadamente a partir de los 60 minutos y en esta evaluación tiende a lograr un valor de estabilización de aproximadamente 95-100 mm/h.

Estos suelos volcánicos se caracterizan por presentar texturas relativamente gruesas (franco arenosos a areno francosos) y drenaje rápido, de hidratarse muy rápidamente luego de un evento de precipitación, pero también de perder la humedad en forma acelerada luego de varios días de drenaje. Estas características deben tenerse en cuenta cuando se programa la aplicación de lodos o sobrenadantes/fracciones líquidas, ya que los contenidos de humedad de estos elementos son habitualmente altos.

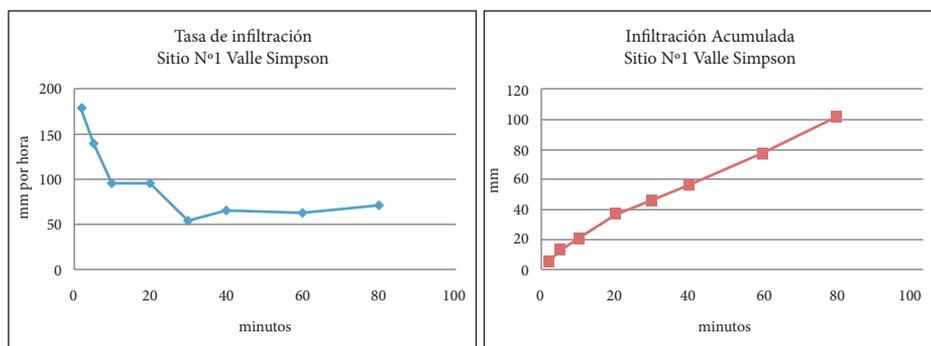


FIGURA 4.3a Tasa de infiltración e infiltración acumulada de un suelo del sector Valle Simpson, Aysén, 2008.

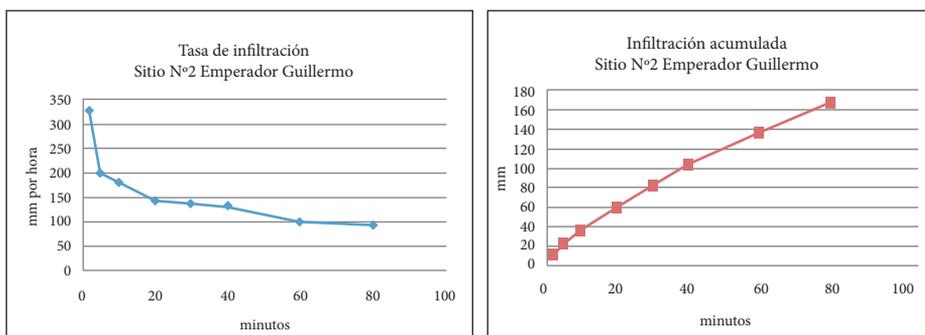


FIGURA 4.3b Tasa de infiltración e inf. acumulada de un suelo del sector Emperador Guillermo, Aysén, 2008.



FIGURA 4.4 . Procedimiento de medición de infiltración en suelos, mediante el uso de infiltrómetro. Valle Simpson y Emperador Guillermo, Aysén, verano 2008.

## ANTIBIÓTICOS

Otro factor que está en investigación es el uso de antibióticos en acuicultura y su influencia sobre los residuos en lodos. Como en otros sistemas intensivos animales (cerdos, aves, bovinos) es frecuente el uso de productos farmacológicos. Estudios preliminares no han indicado limitaciones respecto a respuestas en vegetales, y se está estudiando la eventual presencia de antibióticos en los lodos y su posible efecto sobre la actividad microbiológica del suelo, tema que es materia de un capítulo posterior. Si bien es frecuente el uso de antibióticos en acuicultura, éste se concentra mayoritariamente en las fases de agua salada. Este tema se analiza más profundamente en el capítulo 8.



## CAPITULO 5

### EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LODOS DE PISCICULTURA EN PRADERAS NATURALIZADAS DE AYSÉN

Christian Hepp, Rodrigo Muñoz, Felipe Vidal y Patricio Almonacid

#### GENERALIDADES

Los lodos de piscicultura han demostrado tener niveles de fósforo y nitrógeno en concentraciones útiles para la producción agropecuaria. Las pisciculturas están emplazadas generalmente en predios de potencial ganadero y agrícola eventual o cerca de éstos. Es importante conocer los efectos de la aplicación de lodos sobre praderas naturalizadas de la zona, las que ocupan suelos con deficiencias habituales de fósforo y nitrógeno.

Dado el alto volumen y contenido de humedad de los lodos que generan las pisciculturas (habitualmente entre 95 y 99%), la utilización y manejo de ellos requiere de un proceso de concentración, el que puede realizarse en sistemas de lagunas de sedimentación de tipo facultativo. En ellas se produce también el proceso de estabilización de la materia orgánica, al menos en forma parcial. Producto del llenado de la laguna, se tienen dos fases definidas: lodo propiamente tal en la sección inferior de la laguna (sedimento) y una segunda fase, más superficial, que es la fracción líquida o sobrenadante. Esta última tiene muy altos niveles de humedad (sobre 99%) y sólidos solubles, además de suspendidos de pequeño tamaño. El manejo de llenado de la laguna exige que cada cierto tiempo se descargue parte de este sobrenadante, el cual puede ser asperjado sobre las praderas.

Se presentan aquí resultados de estudios realizados para evaluar los efectos de la aplicación de lodos de piscicultura en primavera, sobre la producción de materia seca de la pradera naturalizada y las variaciones en su composición botánica. Junto a ello, se buscaba establecer el efecto de la aplicación combinada de fracciones líquidas en forma periódica o de agua equivalente.

## UBICACIÓN Y MANEJO

Las experiencias se realizaron en el valle Emperador Guillermo, a 40 km al NW de Coyhaique sobre suelos de capacidad de uso III-e, cubiertos con pradera naturalizada. Los suelos de tipo Andisoles son permeables, con abundante materia orgánica, y texturas franco a franco-arenoso. En profundidad (87 cm) se encontraron capas de grava gruesa. El drenaje era bueno y no había napas freáticas superficiales.

Sobre praderas naturalizadas del sector se establecieron experimentos para medir el efecto de la aplicación de lodos de piscicultura sobre la pradera naturalizada y su interacción con la aplicación de la fracción líquida de una laguna de decantación o la aplicación equivalente de agua. Se probaron diferentes volúmenes de lodo y sobrenadante para evaluar efectos sobre la pradera. Se aplicaron lodos con un contenido promedio de materia seca de 5,7%, mientras que la fracción líquida procedente de la laguna de decantación promediaba un 0,25% de materia seca. El agua y sobrenadante aplicado en cada oportunidad equivalía a 15 mm de precipitación.

## RESPUESTAS EN PRADERAS

El cuadro 5.1 muestra los resultados de aplicaciones de lodo en primavera, con una respuesta rápida y significativa ( $p < 0,05$ ) en la pradera naturalizada. Al segundo mes de aplicado el lodo ya se observa 15% mayor cantidad de biomasa en la pradera en el nivel L2 (48 m<sup>3</sup>/ha) y que aumenta gradual y sostenidamente hasta llegar a 190% mayor producción en el nivel L5 (384 m<sup>3</sup> lodo/ha) respecto de L0 (sin lodo). Hacia el final de la temporada siguen presentándose diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Ello redundaba en que en la primera temporada, la producción de biomasa total sea significativamente mayor en aplicaciones de L3 (96 m<sup>3</sup>/ha) en adelante, respecto a L0, con 29%, 64%, y 205% mayor rendimiento de forraje en L3, L4 y L5, respectivamente.

Nivel lodo	kg MS/ha						
	10-feb-10	02-jun-10	11-nov-10	28-mar-11	Total temporada 1	Total temporada 2	Total 2 temporadas
L0	1305 d	484 c	1383 d	2846 b	1790 c	4229 c	6018 d
L1	1130 d	690 bc	2323 cd	4893 a	1820 c	7216 b	9035 c
L2	1501 c	895 abc	2708 cd	5491 a	2397 c	8200 b	10596 bc
L3	2566 b	1527 ab	2979 bc	5251 a	4093 b	8230 b	12323 b
L4	3140 ab	1593 a	4325 ab	6501 a	4733 ab	10826 a	15559 a
L5	3787 a	1670 a	4801 a	6528 a	5457 a	11330 a	16786 a

Promedios con letras diferentes dentro de cada fecha (columna) son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

CUADRO 5.1. Producción de biomasa (kg MS/ha) de una pradera naturalizada sometida a diferentes cargas de lodos de piscicultura aplicados a fines de primavera (diciembre 2009) y noviembre 2010.

Promedios generales tratamiento principal. Valle Emperador Guillermo, Región de Aysén.

El cuadro 5.1 muestra también la producción de biomasa del segundo año de crecimiento vegetal, con reaplicación de lodo en primavera. En este caso, al analizar el total de biomasa producida al final del segundo año, se tiene que incluso con el nivel más bajo de lodo aplicado, la respuesta es estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ), en que L1 ( $24\text{m}^3/\text{ha}$ ) supera en casi 71% la producción de biomasa del tratamiento testigo (sin lodo). Los tratamientos L2, L3, L4 ( $192\text{m}^3/\text{ha}$ ) y L5 superan en 94%, 95%, 156% y 168% la producción de biomasa de L0, respectivamente. Al contabilizar ambas temporadas, la aplicación de niveles variables de lodo a praderas naturalizadas en primavera permitió aumentar significativamente ( $p < 0,05$ ) su producción de biomasa desde algo más de 6 t MS/ha hasta sobre 16 t MS/ha, en promedio, lo que significa aumentos de hasta 179% (casi triplicar la producción).

Las medias anteriores se referían a efectos combinados de lodos, sobrenadantes y agua, por lo que resulta interesante desglosar los efectos independientes de estos sub-tratamientos (sólo lodo; lodo+agua; lodo+sobrenadante). El cuadro 5.2 entrega esta información, y señala que hay diferencias significativas entre ellos ( $p < 0,05$ ).

Aplicación	kg MS/ha						
	10-feb-10	02-jun-10	11-nov-10	28-mar-11	Total temporada 1	Total temporada 2	Total 2 temporadas
Sólo lodo	2065 b	853 b	2602 b	4148 c	2918 b	6751 c	9669 c
Lodo+agua	2050 b	1182 ab	2988 b	5129 b	3231 b	8117 b	11348 b
lodo+sobrenadante	2600 a	1395 a	3670 a	6477 a	3995 a	10147 a	14142 a

Promedios con letras diferentes dentro de cada fecha (columna) son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

CUADRO 5.2 Producción de biomasa (kg MS/ha) de una pradera naturalizada sometida a diferentes combinaciones de cargas de lodos de piscicultura, sobrenadante de laguna de decantación y agua.

Promedios generales de los sub-tratamientos. Valle Emperador Guillermo, Región de Aysén.

En general, se aprecia un efecto positivo de combinar el lodo con aplicaciones de agua y, especialmente, un incremento importante si se combina el lodo con aplicaciones posteriores de sobrenadantes. Es así como en la primera temporada la aplicación de la combinación lodo+sobrenadante produjo en promedio 37% más biomasa que aquellas praderas que sólo recibieron diferentes combinaciones de lodo. En la segunda temporada, las diferencias son mayores, con un 20% de mayor rendimiento en parcelas de lodo+agua, y 50% más biomasa en parcelas de lodo+sobrenadante, respecto de aquellas que sólo recibieron lodo. En general, al sumar ambas temporadas, la adición de aplicaciones de agua permitió subir en 17% la producción de biomasa, mientras que al combinar lodo con aplicaciones de sobrenadante se logró en promedio 46% mayor rendimiento, respecto a lodo solo ( $p < 0,05$ ).

La figura 5.1 muestra que los aumentos de producción de biomasa en ambas temporadas son prácticamente lineales al menos hasta el nivel L4 en el lodo aplicado. Niveles mayores (L5), si bien no parecen tener efectos negativos, pareciera producir incrementos marginales menores cuando se asocia a aplicaciones combinadas con sobrenadantes. Es muy interesante comprobar el potencial de crecimiento y rendimiento que tiene la pradera naturalizada de esta zona, ya que los aumentos de producción primaria observados implican un incremento en la productividad de los sistemas productivos ganaderos a los que puedan estar asociados.

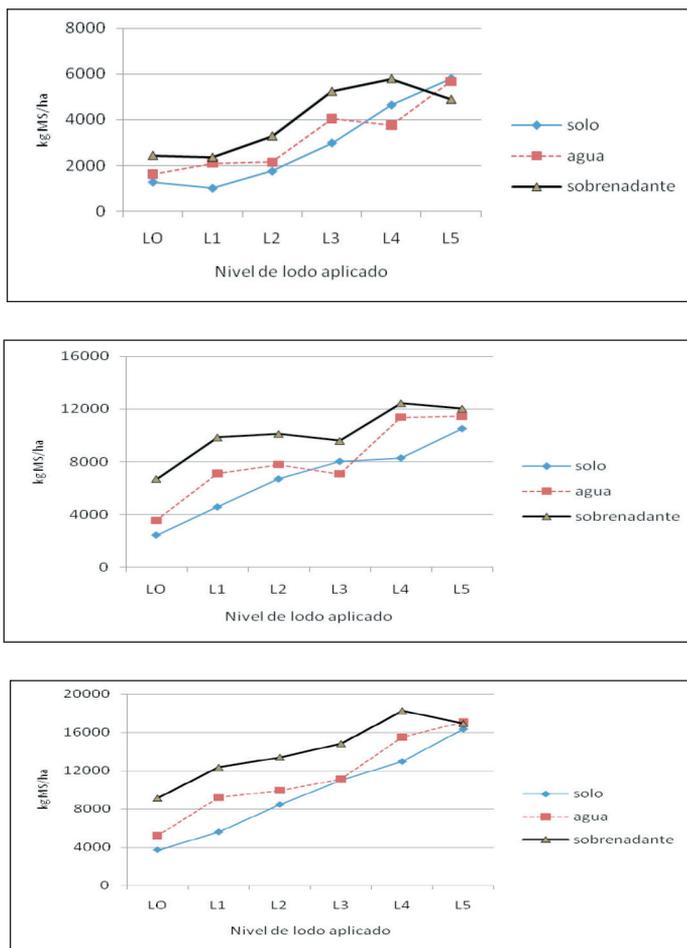


FIGURA 5.1. Producción de biomasa (kg MS/ha) de una pradera naturalizada sometida a diferentes combinaciones de cargas de lodos de piscicultura (lodo solo), sobrenadante de laguna de decantación (lodo+sobrenadante) y agua (lodo+agua). Primer año (arriba), Segundo año (con reaplicación; medio) y TOTAL de los dos años (abajo). Valle Emperador Guillermo, Región de Aysén.

Junto a los efectos sobre la producción de biomasa se producen cambios en la composición botánica de la pradera (gramíneas, leguminosas (tréboles) y hierbas (diferentes especies de hoja ancha)). A los dos meses de aplicado el lodo, ya se observa un incremento de las gramíneas, que parece ser en primera instancia a expensas del grupo de hierbas. En la segunda temporada de crecimiento, inicialmente se observan elevados niveles de leguminosas en noviembre, que superan el 30% incluso con el nivel de lodo L2, para decaer luego hasta llegar a menos de 10% con L5. Luego de la segunda aplicación de lodo, se aprecia una disminución sostenida de leguminosas desde sobre 40% en L1 hasta prácticamente cero en L5. Por otra parte, las gramíneas aumentan desde algo menos de 40% en L0 hasta cerca de 85% en L5. La proporción de especies de hoja ancha (hierbas) disminuye fuertemente en todos los tratamientos y se mantiene entre un 5-10% de la materia seca total.

Las categorías de gramíneas también tienden a potenciarse con aplicación de sobrenadantes, lo que ocurre en desmedro de leguminosas y hierbas de hoja ancha. Es probable que los niveles de nitrógeno disponible del sobrenadante confieran ventajas competitivas al grupo de gramíneas, y al revés, afecte el desarrollo de los tréboles. Lo anterior se extrema hacia fines de la segunda temporada, donde los tratamientos de lodo+sobrenadante aumentan hasta 83% la composición de gramíneas, contra 58% en aquellos que sólo recibieron lodo. En el caso de leguminosas es al revés, ya que bajan desde cerca de 28% a sólo 11%, al considerarse la aplicación paralela de sobrenadante.

Al final de la primera temporada de crecimiento, se aprecia que la concentración de nitrato en el suelo aumenta sostenidamente con la concentración de lodo utilizada, pero especialmente con el nivel más alto (L5), que tiene más de seis veces en nitrato respecto de L0 (cuadro 5.3). También se aumenta la concentración de amonio, que es entre 39% y 175% mayor en L3 y L5, respecto a L0, respectivamente. Los niveles de fósforo total también aumentan en hasta 70% con L5, mientras que también hay mayor disponibilidad de éste. Los niveles de pH y de materia orgánica no se ven mayormente afectados por el uso de los lodos. La capacidad de intercambio catiónico muestra una tendencia a elevarse. El uso adicional de sobrenadantes sobre lodos muestra resultados similares para las variables indicadas.

Nivel	Tratamiento	pH	N-nitrato	N-amonio	P-total	P-Olsen	%MO	CIC
			mg/kg		%	mg/kg	%	cmo(+)/kg
L0	sin lodo	6,01	0,2	35,5	1,62	20,4	15,1	9,76
L1	sólo lodo	6,06	0,12	49,3	2,11	19,4	16,4	
L3	sólo lodo	6,09	0,33	57,1	2,36	30	13,9	
L5	sólo lodo	6,14	1,33	97,7	2,74	37,8	16,5	12,06
L0	+sobrenad	6,11	0,2	48,8	1,97	22,8	12,8	10,22
L1	+sobrenad	6,14	0,16	56	1,87	18,2	13,8	
L3	+sobrenad	6,27	0,5	53,1	2,38	34,8	17,7	
L5	+sobrenad	6,25	0,64	74,9	2,89	38,8	17	10,93

CUADRO 5.3 Análisis de suelo en otoño 2010 (final primera temporada de crecimiento). Emperador Guillermo, Aysén.

Al repetir la aplicación de lodo en una segunda temporada, se observa un aumento considerable en los niveles de fósforo total del suelo, con entre 58% más (L3) y 234% más (L5) respecto de L0. La concentración de P disponible igualmente se incrementa fuertemente al aplicar lodo en forma reiterada por dos años. Se aprecia cierta tendencia a subir levemente el nivel de materia orgánica del suelo, mientras que el valor pH no se altera significativamente, salvo un leve descenso que se aprecia al incluir sobrenadantes (cuadro 5.4).

## CONCLUSIONES

La aplicación de lodos sobre praderas naturalizadas tuvo efectos notables sobre la producción de biomasa, especialmente al utilizarse aplicaciones de primavera (durante la temporada de crecimiento). Aplicaciones de otoño no tuvieron el mismo resultado, aunque igualmente se observan ciertos incrementos productivos. La aplicación combinada de lodo y posteriormente de sobrenadantes seriados en la temporada tuvo un efecto de potenciar el crecimiento vegetal, lográndose con ello los mayores rendimientos de materia seca en la pradera. La aplicación de lodo y la incorporación de eventos posteriores de agua de riego también tuvieron efectos positivos, aunque no de la misma magnitud que el uso de sobrenadantes. Junto al aumento de biomasa, se observa una disminución en los contenidos de leguminosas y hierbas de hoja ancha en la composición botánica de la pradera, con un consiguiente aumento sustancial en la proporción de gramíneas. El uso de lodos incrementa el nitrógeno total del suelo y la concentración de nitrato y de amonio en éste, como también los niveles de fósforo total.

Nivel	Tratamiento	pH	P-total	P-Olsen	%MO
			%	Ppm	%
L0	sin lodo	5,89	2,11	26,6	19,3
L1	sólo lodo	6,1		33	20,7
L3	sólo lodo	6,1	3,33	57,4	20,6
L5	sólo lodo	6,15	7,08	94	22,1
L0	+sobrenad	6,19	2,33	29,2	17,2
L1	+sobrenad	6,27		32	16,2
L3	+sobrenad	6,17	3,03	62,2	21,1
L5	+sobrenad	6,03	6,14	91	18

CUADRO 5.4. Análisis de suelo en otoño 2010 (final primera temporada de crecimiento).  
Emperador Guillermo, Aysén.

## CAPITULO 6

### EFFECTOS DEL USO DE LODOS DE PISCICULTURA SOBRE PRADERAS ARTIFICIALES Y CULTIVOS EN AYSÉN

Christian Hepp y Felipe Vidal

Los lodos de piscicultura, al tener elevados contenidos de nitrógeno y fósforo, parcialmente disponible y soluble, tienen también un potencial de uso en praderas de mayor nivel productivo, como también con algunos cultivos intensivos. En Aysén existen zonas con praderas establecidas y cultivos, especialmente de uso forrajero (alfalfa, cereales, brásicas, etc.), donde la respuesta a nitrógeno y/o fósforo es fundamental, a la hora de alcanzar niveles elevados de rendimiento. En este capítulo se resumen algunos resultados obtenidos con aplicaciones experimentales de lodos de piscicultura sobre praderas artificiales y algunos cultivos en la zona.

#### APLICACIÓN DE LODOS SOBRE PRADERAS ARTIFICIALES

En praderas mixtas artificiales (ej. pasto ovillo y trébol blanco x trébol rosado), con aplicaciones de lodo de primavera-verano, ya en marzo (inicio de otoño) se observa un efecto sobre la producción de materia seca.

En términos de nitrógeno y fósforo aplicados, el cuadro 6.1 muestra que el aporte fue de entre 3-48 kg de N disponible/ha y de 8-134 kg de  $P_2O_5$ /ha, según tratamiento. Una pradera de esta zona, para lograr adecuados niveles de producción recibe aplicaciones de fósforo, habitualmente en forma de superfosfatos, que fluctúan entre 40 y 80 kg de  $P_2O_5$ /ha al año y que puede ser potenciada además con 30-50 kg de N/ha en primavera, en general como urea. En este sentido, la aplicación de lodos puede transformarse en un reemplazo parcial o inclusive total de estos fertilizantes comerciales.

El cuadro 6.2 muestra que en el primer año, producto de la aplicación de lodo de inicios de verano, ya en marzo hay un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) sobre la producción de materia seca de la pradera. Si bien la tendencia es clara y ascendente, aplicaciones de hasta 100 m<sup>3</sup>/ha no tienen diferencias significativas respecto del testigo, aunque se registra hasta 48% mayor producción en T3 respecto a T0. Los tratamientos T4 a T6 por su parte, se distinguen significativamente ( $p < 0,05$ ) del resto, con mayores producciones que van desde 88% a 130% más que T0. Lo anterior se logra en menos de cuatro meses desde la aplicación del lodo. Las producciones de materia seca del año 1 son menores a los años siguientes por abarcar un período de crecimiento más corto (diciembre a marzo), además de haber existido un verano seco en esa oportunidad. El primer año, la respuesta es prácticamente lineal hasta los 150-200 m<sup>3</sup>/ha, que significan un aporte de entre 17-25 kg/ha de N disponible y entre 48-69 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Tratamiento	Lodo						equivalencia	
	m <sup>3</sup> /ha	% MS	t MS/ha	kg P/ha	kg N/ha	kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg SFT*/ha	kg urea/ha
Control	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
T1	25,4	7,4	2,1	3,6	3,0	8,3	18,0	6,6
T2	51,2	7,4	4,3	7,2	6,0	16,6	36,1	13,3
T3	101,7	7,4	8,5	14,4	11,9	33,1	71,9	26,4
T4	144,3	7,4	12,4	21,1	17,4	48,3	104,9	38,6
T5	203,5	7,6	17,7	30,2	24,8	69,1	150,1	55,2
T6	383,7	7,6	34,5	58,6	48,3	134,2	291,8	107,3

\*SFT superfosfato triple

CUADRO 6.1. Volúmenes reales aplicados, contenido de materia seca del lodo y sólidos totales aportados según tratamientos experimentales. Nivel de nutrientes equivalentes aportados.

El segundo año, con una evaluación de enero, se aprecia que los tratamientos con aplicación de lodos se diferencian significativamente ( $p < 0,05$ ) del testigo (T0) desde aplicaciones de 50 m<sup>3</sup>/ha (T2), que presentan 37% más producción que T0. Sobre este volumen no hay diferencias significativas, aunque se aprecia hasta 62% más rendimiento al aplicar alrededor de 100 m<sup>3</sup> lodo/ha (T3). Aplicaciones mayores no provocaron en promedio aumentos significativos de producción. En cuanto a los efectos que tuvo la re-aplicación de lodo, se aprecia que hubo efectos significativos ( $p < 0,05$ ). Aquellas parcelas que recibieron lodo el segundo año, produjeron en promedio casi 22% más, respecto a las que no tuvieron aplicación. Al tercer año, en el primer corte de diciembre (donde se ha producido la fracción principal del crecimiento de la temporada) se aprecia aún un efecto residual, sobre todo en las dosis más altas (T6;

$p < 0,05$ ). Este efecto se pierde, en promedio, hacia el final de la temporada. Aquellas parcelas que tuvieron re-aplicación de lodo el segundo año, en la tercera temporada tuvieron más producción solamente en el segundo corte.

Tratamiento	Lodo (m <sup>3</sup> /ha)	kg MS/ha			
		Año 1	Año 2	Año 3	
		17-03-2009	06-ene-10	02-dic-10	15-mar-11
T0	0	2.553 c	7.730 c	5.619 b	2.833 a
T1	25,4	2.713 c	9.089 bc	6.316 ab	2.867 a
T2	51,2	3.219 c	10.626 ab	5.990 ab	2.904 a
T3	101,7	3.781 bc	12.553 a	6.517 ab	2.567 a
T4	144,3	4.794 ab	10.595 ab	7.145 ab	2.860 a
T5	203,5	5.440 a	9.975 ab	7.688 ab	3.154 a
T6	383,7	5.883 a	9.797 ab	8.479 a	3.968 a
	Reaplicación*:				
	NO		9.073 b	7.252 a	2.563 b
	SI		11.031 a	6.392.a	3.481 a
* parcelas subdivididas con repetición de dosis en 2009 Promedios con letras diferentes dentro de columnas presentan diferencias significativas ( $p < 0,05$ )					

CUADRO 6.2 Producción de materia seca promedio de una pradera sometida a diferentes niveles de lodo de piscicultura, con y sin reaplicación (año 2) y sus efectos residuales (año2 y año 3).

En la figura 6.1 se aprecia que la aplicación repetida de lodos el segundo año tiene efectos importantes hasta los 100 m<sup>3</sup>/ha, mientras que la curva de re-aplicación supera en todo momento a aquella de praderas sin re-aplicación (sólo efecto residual del año anterior). Por otra parte, los efectos residuales de uno o dos años tienen respuesta similar, en términos de que se observa aumento sostenido de producción, el que no siempre es estadísticamente significativo ( $p > 0,05$ ).

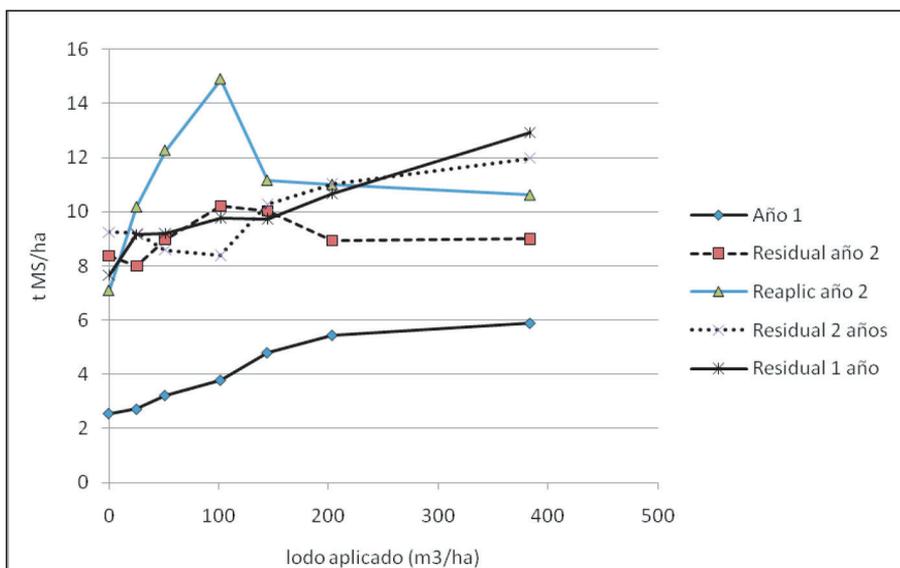


FIGURA 6.1 Respuesta productiva de la pradera en función del nivel de lodo aplicado y efectos residuales observados.

En el cuadro 6.3 se observa que en la medida que se aumenta la dosis de lodo, la concentración de nitrato y amonio aumenta sustancialmente en el suelo, especialmente la de nitrato, que prácticamente se sextuplica entre T0 y T6, mientras que la de amonio aumenta en un 56%. Todo ello al final de la primera temporada de crecimiento. El fósforo total del suelo también aumenta en un 12% en dosis bajas de lodo hasta un 36% en T6, respecto a T0, respectivamente. En cuanto al fósforo disponible (Olsen) se verifican aumentos al subir la dosis de lodo, desde 21 mg/kg en T0 hasta 40 mg/kg en T6 (lodo alto). No se observan variaciones en el contenido de materia orgánica del suelo ni en la capacidad de intercambio catiónico. El valor pH mantiene niveles similares entre los tratamientos.

Nivel	pH	N-nitrato	N-amonio	P-total	P-Olsen	%MO	CIC
		mg/kg		%	mg/kg	%	cmol(+)/kg
Control (T0)	5,73	3,07	83,1	3,15	21,2	18,1	14,33
T2	5,76	4,58	90,8	3,53	26,2	17,3	14,59
T4	5,77	10,57	119,9	3,4	35,8	17,8	14,37
T6	5,66	17,91	130,3	4,29	40	19,5	14,84

CUADRO 6.3 Análisis de suelo al finalizar primera temporada de crecimiento. Valle Simpson.

En una segunda temporada se observa un efecto residual del lodo, con mayor concentración de nitrato, fósforo total y P disponible en el suelo. El fósforo total y disponible aumenta fuertemente al aplicarse en forma repetida el lodo en las parcelas y probablemente puede sustentar el crecimiento vegetal sin aplicaciones de fertilizantes fosfatados adicionales. No hay efectos sobre el contenido de materia orgánica del suelo ni en la CIC medida. En las parcelas con aplicación repetida de lodo pareciera observarse alguna tendencia a disminución del valor de pH del suelo.

En otro sector de la pradera se realizó una aplicación de otoño con 114 m<sup>3</sup>/ha. Ello significó un aporte de alrededor de 20 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha y 8 kg de N disponible/ha. Con esta aplicación de otoño se observó un inicio más temprano del crecimiento de la pradera en la primavera siguiente, lo cual se notaba a simple vista (mayor cantidad de biomasa y color verde intenso) al compararla con la pradera vecina sin aplicación. En el mes de noviembre, la pradera con aplicación de otoño produjo casi 65% más que la testigo, llegando a casi 4.000 kg de MS/ha. Posteriormente, en febrero se aplicó una cantidad adicional de 100 m<sup>3</sup>/ha. En su conjunto, sin aplicación de lodo, la pradera produjo 6.150 kg/ha, con aplicación de verano solamente fue de 6.733 kg/ha (casi 10% diferencia); con aplicación de otoño solamente produjo 8.759 kg/ha (42 % más) y con doble aplicación 9.116 kg/ha (48% más). A pesar de posibles pérdidas de nutrientes por aplicación de otoño, en esta oportunidad se demostró una buena respuesta productiva.

En resumen, la utilización de lodo de piscicultura aplicado en cobertera (figura 6.2) sobre praderas artificiales de la zona Intermedia de Aysén permitió incrementar la producción de materia seca en forma rápida (dentro del mismo año), llegando a más que duplicar en algunos casos. Los niveles de lodo requeridos para obtener respuestas significativas en general fluctuaron entre 100-150 m<sup>3</sup>/ha, con lodos de alrededor de 7% de materia seca.

Se observan efectos residuales, especialmente con dosis más altas. Dosis crecientes de lodo producen aumentos sostenidos en los contenidos de nitrógeno y fósforo del suelo, lo que produce diferencias detectables en una segunda temporada (efecto residual). La reaplicación de lodo en una segunda temporada sobre el mismo suelo aumenta sostenidamente la concentración de fósforo total y disponible, mientras que los niveles de nitrato son significativamente mayores. Es necesario observar posibles efectos sobre el pH del suelo con aplicaciones elevadas de lodo.

Otro aspecto a considerar es la eventual parcialización de la aplicación de dosis de lodo. En los casos analizados, implicó bajar la producción de biomasa de las praderas en una proporción menor, aunque debe evaluarse el efecto residual en una segunda temporada, sobre todo para ver los efectos de aplicaciones tardías sobre el inicio del crecimiento en la primavera siguiente. Hay un efecto importante de la parcialización de las dosis de lodo sobre la composición de la pradera, en el sentido de que aplicaciones graduales afectan menos la población de leguminosas de la pradera mixta, probablemente al no saturar de nitrógeno el suelo.



FIGURA 6.2 Aplicación de lodo de piscicultura en cobertera sobre praderas de Aysén

También se realizaron pruebas para evaluar efectos sobre la germinación de algunas plantas forrajeras. De acuerdo a los resultados obtenidos, en la aplicación de lodo en suelos de la zona intermedia se esperaría una menor germinación, tanto en ballica perenne, como en alfalfa. Sin embargo, las plantas establecidas tienden a compensar la menor población inicial. De esta forma, el desarrollo posterior compensa con creces esta situación y finalmente se expresa en mayor biomasa total presente. En la ballica perenne, el proceso de macollaje compensa la población de plantas y en alfalfa se aprecian plantas con mayor crecimiento y altura, en tratamientos con lodo de piscicultura. Se observan aumentos significativos de nitrógeno total y nitratos en los tejidos de ballica y alfalfa, especialmente a nivel de fracción aérea, lo que sin embargo no ofrece riesgos para la salud animal en los niveles utilizados.

### **APLICACIÓN DE LODO EN TERRENOS DE CULTIVO**

Además del uso de lodos de piscicultura en praderas, es interesante evaluar su potencial uso en suelos de mayor intensidad de uso, con cultivos y praderas especializadas, como la alfalfa.

En terreno se estudiaron franjas con aplicación sucesiva de sobrenadantes de una laguna de sedimentación, los que fueron aplicados mediante aspersión (Figura 6.3), comparando con situaciones sin aplicación.

Por ejemplo, en el caso de alfalfa, la aplicación repetida de sobrenadante significó un 50% de mayor rendimiento (pasar de 5,6 t MS/ha a 8,4 t/ha), observándose el efecto en ambos cortes (febrero y mayo). En brassicas forrajeras (nabo forrajero variedad Green Globe, ruta-

baga variedad Dominion y raps), la respuesta fue positiva y fluctuó entre 54% hasta 120% de mayor rendimiento. En nabo forrajero se aumentó desde 8,1 a 12,5 t MS/ha; en rutabaga de 6,7 a 14,8 t MS/ha; y en raps forrajero varió desde 6,3 a 11,7 t MS/ha, entre aquellas franjas con y sin aplicación de aspersión de sobrenadantes, respectivamente. Estos sobrenadantes procedían de una laguna de estabilización de lodo de piscicultura y correspondían a la fracción líquida.

También se realizaron experimentos controlados, con aplicación de lodos en macetas. Allí se determinó que la aplicación de lodos de piscicultura aumentó significativamente la producción de biomasa en plantas de lechuga, hasta niveles de aplicación equivalentes a 100 m<sup>3</sup>/ha (L100) y que niveles más altos o excesivos producían disminución de la producción. Con los niveles más extremos incluso se vio afectado el desarrollo de la planta, lo que provocó su muerte. Ello ocurrió especialmente con las aplicaciones en cobertera, las que siempre presentaron menos respuesta que aquella con incorporación en el suelo. Se observaron mejores resultados en suelos de las zonas Intermedia y esteparia.



FIGURA 6.3. Riego de sobrenadantes de laguna de sedimentación mediante sistemas de aspersión.

Para plantas de remolacha, se observaron respuestas positivas en producción de biomasa hasta las dosis más altas aplicadas, mientras que también se vio mejor resultado con aplicaciones incorporadas en el suelo. También se verificó mejor respuesta en suelos de la zona intermedia y la de estepa, comparado con el suelo de la zona húmeda. La mayor acidez de este último suelo puede ser una de las causas de la menor respuesta vegetal observada. En una determinación de suelo se observó cierta tendencia a la acidificación con dosis más altas de lodo, lo que requiere ser monitoreado y puede tener relación con los procesos de nitrificación aumentados.



## **CAPITULO 7**

### **EVALUACIÓN DE LIXIVIADOS PRODUCTO DE LA APLICACIÓN DE LODOS DE PISCICULTURA EN SUELOS AGROPECUARIOS DE AYSÉN**

Christian Hepp, Felipe Vidal, Adriana Carvajal, Marta Alfaro,  
María Paz Martínez, Pier Barattini y Viola Saldivia

Como se ha visto en capítulos anteriores, el lodo de piscicultura, además de tener un alto contenido de humedad, aporta nutrientes como fósforo y nitrógeno. Parte de estos nutrientes se encuentran en forma soluble y algunos de ellos tienen bastante movilidad en el perfil de suelo. Es el caso, por ejemplo, del nitrógeno nítrico (nitrato). Este compuesto se señala habitualmente como uno de los posibles contaminantes de napas de agua subterránea, por lo que es importante estudiar su comportamiento en los suelos regionales, frente a aplicaciones eventuales de lodos al suelo. Ello para evaluar a futuro la cantidad de lodo que se puede aplicar (dosis) y cómo se comporta éste en el perfil del suelo, afectando por ejemplo la pérdida de nutrientes en profundidad a través del fenómeno de lixiviación.

Igualmente, es importante conocer la respuesta de lixiviación en diferentes suelos y bajo regímenes de precipitación diferenciados. Para ello se determinó el efecto de la aplicación de lodos en diferentes dosis sobre la composición de los lixiviados (agua y solutos que percolan en profundidad); y así definir la interacción con dos niveles pluviométricos y dos suelos diferentes.

## MEDICIONES CON LISÍMETROS

La lixiviación de suelos se puede medir a través de la construcción de lisímetros, que en este caso son cilindros que contienen una columna de suelo inalterado, el que se obtiene directamente del terreno. Para los efectos del estudio se utilizaron dos sitios de colección de suelo: Valle Simpson, correspondiendo a la zona intermedia de Aysén; y el sector de Puerto Chacabuco (zona húmeda). En ambos casos se trata de Andisoles (Hapludand y Fulvudand, respectivamente). Los lisímetros se prepararon en tubos de PVC hidráulico de 20 cm de diámetro (C-6) y de 60 cm de longitud (profundidad). Bajo los lisímetros, montados en una estructura, se tenía un embudo que recibía el lixiviado y conectaba con una botella plástica que acumulaba el líquido. Desde esta botella se colectaban las muestras para análisis.



FIGURA 7.1. Lisímetros instalados en su unidad.

En cada tipo de suelo se usaron tres cargas de lodos: L0 (sin lodo); L1 ( 100 m<sup>3</sup> de lodo fresco/ha); y L2 (200 m<sup>3</sup> lodo fresco/ha). Las cargas de lodo estuvieron sometidas a dos regímenes pluviométricos simulados (normal: pp1= pp normal promedio entre dic-marzo para cada zona) o excesivo (pp2= el doble del anterior).



FIGURA 7.2. Dosificación del lodo para ser aplicado en lisímetros, según tratamiento.



FIGURA 7.3. Aplicación de lodos en los lisímetros.

Los experimentos tuvieron una duración de tres meses, en que se realizó la fase de obtención de lixiviados. Una vez concluida dicha fase experimental, los lisímetros fueron mantenidos por una temporada de crecimiento, en la que se realizaron cortes periódicos. Finalmente, en el otoño siguiente se procedió al desarme de los lisímetros para análisis de suelos.

El lodo aplicado en los experimentos (en las dosis indicadas) fue extraído del decantador de una piscicultura de paso de la zona y tenía un contenido promedio de sólidos totales de 84,8 mg/l, un 8,6% de materia seca (105°C), un pH de 6,19 y una DQO de 24.450 mg O<sub>2</sub>/l. El lodo, previamente homogenizado mediante agitación (Figura 7.2), se midió en probetas y se aplicó uniformemente sobre la superficie de cada lisímetro (Figura 7.3 y 7.4).

Tipo suelo	pp (mm) aplicado	Lodo	evaporación compensada (mm)	Lixiviación (mm)	Balance aprovechable (mm)
Zona Húmeda	665	Lo	236	670	231
		L1	236	602	299
		L2	236	650	251
	1330	Lo	236	1.324	242
		L1	236	1.222	344
		L2	236	1.184	382
Zona Intermedia	275	Lo	236	291	220
		L1	236	213	298
		L2	236	178	332
	550	Lo	236	542	243
		L1	236	473	312
		L2	236	405	380

CUADRO 7.1 Nivel de precipitación aplicado (pp), evaporación, lixiviación y balance aprovechable de agua en dos suelos volcánicos de Aysén, con tres niveles de lodos de piscicultura aplicados y dos regímenes pluviométricos (normal y excesivo).

Las tasas de riego semanal (según nivel pluviométrico) se aplicaron en tres parcialidades, mediante probetas. El nivel de pluviometría “normal (pp1)” un total de 240 mm de precipitación, mientras que el “excesivo (pp2)” tuvo 480 mm de precipitación en el período de tres meses indicado. Durante el período experimental (12 semanas), en queda un balance de agua aprovechable entre 220-332 mm en el caso del régimen pluviométrico bajo y de

243-380 mm, para el régimen pluviométrico alto. El balance aprovechable tiende a ser más elevado en regímenes de mayor precipitación y en los tratamientos con lodos, situación que se repite con ambos regímenes de lluvia. La lixiviación también tendió a ser mayor en aquellos lisímetros sin aplicación de lodos (CUADRO 7.1).



FIGURA 7.4. Lisímetro con lodo aplicado en cobertera.

## RESULTADOS DE LIXIVIACIÓN

En los experimentos se muestrearon los lixiviados semanalmente durante 12 semanas y se analizaron para determinar cationes (amonio, calcio, potasio, sodio, magnesio), y aniones (nitrato, nitrito, fosfato, sulfato, cloruro). En cada lisímetro se cortó periódicamente la biomasa para medir el material vegetal acumulado y su composición de especies.

### Suelo zona húmeda:

El cuadro 7.2 muestra las concentraciones de diferentes iones contenidos en los lixiviados del suelo de la zona húmeda. Se aprecia que con la dosis de lodo L1 (más baja, de 100 m<sup>3</sup>/ha) la concentración de nitrato en el lixiviado, con respecto al suelo testigo (L0), es menor en relación a la que se observa con el nivel L2 (200 m<sup>3</sup> lodo/ha). En L2 se producen mayores concentraciones para todos los iones analizados en el lixiviado. En cuanto a las bases del suelo (calcio, magnesio, sodio, potasio), se observa un aumento de más de tres veces en los niveles

de ellas en los lixiviados, y hasta seis veces en la última, al aplicarse niveles elevados de lodos (L2). En la dosis más baja se observa incluso una disminución en las pérdidas vía lixiviación para esas mismas variables. Lo anterior ocurre independiente del nivel de precipitación.

	L0 pp1	L1 pp1	L2 pp1	L0 pp2	L1 pp2	L2 pp2	pp1	pp2	L0	L1	L2	Gral
	mg/l						mg/l		mg/l			mg/l
NO <sub>3</sub> =	0,10	0,15	12,34	0,09	0,17	14,19	4,50	4,83	0,09	0,16	13,27	4,62
SO <sub>4</sub> =	0,46	0,44	1,25	0,84	0,24	0,75	0,73	0,61	0,60	0,34	1,00	0,67
Cl-	1,56	0,20	3,65	0,39	0,38	4,31	1,84	1,69	0,97	0,29	3,98	1,76
Ca <sup>++</sup>	1,59	0,22	3,51	0,45	0,33	3,76	1,81	1,51	1,01	0,27	3,63	1,65
Mg <sup>++</sup>	1,67	0,19	3,62	0,46	0,32	3,57	1,87	1,45	1,06	0,26	3,60	1,65
Na <sup>+</sup>	1,80	0,20	3,69	0,48	0,31	3,58	1,94	1,46	1,13	0,25	3,64	1,69
K <sup>+</sup>	0,99	0,21	4,08	0,34	0,29	3,88	1,81	1,51	0,66	0,25	3,98	1,65

CUADRO 7.2. Concentración de cationes y aniones en lixiviados de un suelo de la zona húmeda de Aysén, sometido a diferentes niveles de de lodo de piscicultura (L0, L1, L2), bajo dos regímenes de precipitación (pp1:normal y pp2:excesivo).

Al duplicarse la dosis de lodo aplicado (de L1 a L2), se produce un aumento de la lixiviación de nitrato, desde valores cercanos a cero hasta sobre 13 mg/l, en promedio. A pesar de este aumento, lo anterior implica superar levemente la norma máxima para agua potable (en términos de nitrato) de 10 mg/l. El aumento de lixiviación de nitrato está asociado a la mayor dosis de lodo y ocurre en ambos regímenes de precipitación en este suelo. No se apreciaron niveles detectables de amonio (<0,49 mg/l) ni nitrito (<0,09 mg/l) en los lixiviados. Las concentraciones de sulfato y cloruro observadas son bajas, alejadas de los valores normados de 250 mg/l en sulfatos y 200 mg/l en cloruros, aunque tienden a aumentar en aplicaciones de lodo más altas.

En la figura 7.5 se aprecia que, habiéndose aplicado la carga de lodo el 2 de febrero, en los tratamientos sin lodo (L0) y con carga media de lodo (L1), prácticamente no hay detección de nitratos y ciertamente no hay diferencias entre ellos. Ya a partir del 9 de febrero se empieza a detectar nitrato en el lixiviado de los suelos con aplicación alta de lodo (L2).

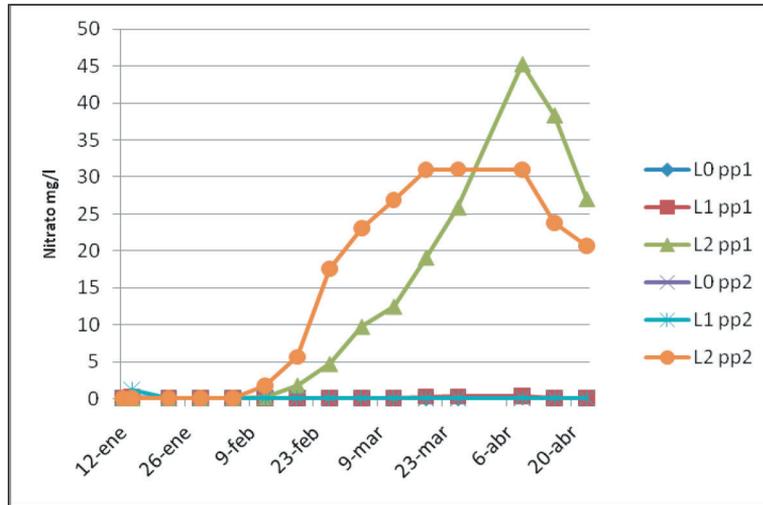


FIGURA 7.5. Variación temporal de la concentración de nitrato en lixiviados de un suelo de la Zona Húmeda de Aysén, sometido a diferentes niveles de aplicación de lodo de piscicultura (L0, L1, L2), bajo dos regímenes de precipitación (pp1:normal y pp2:excesivo).

Esta respuesta se expresa con un aumento de lixiviación que tiende a ocurrir antes con alto régimen de pluviometría y con una respuesta más bien exponencial en su primera fase. Luego va declinando con tasas marginales decrecientes. Con el régimen de precipitación menor, el aumento es algo más retardado, aunque igualmente significativo. La lixiviación de nitrato aumenta sostenidamente en L2 hasta alrededor de un mes post aplicación, en el caso de precipitaciones excesivas y dos meses bajo un régimen de precipitaciones normales. En el caso de L2, con régimen pluviométrico excesivo, se alcanzan más rápidamente concentraciones que superan los 15 mg nitrato/l y se estabiliza luego por alrededor de un mes en niveles levemente superiores a 30 mg/l, para decaer posteriormente. En L2 sometido a precipitación normal, la respuesta es más lenta pero sostenida y alcanza un máximo cercano a 45 mg/l, para luego iniciar una declinación igualmente rápida hacia la fase final del experimento. De esta forma, las aplicaciones de lodo hasta niveles de 100 m<sup>3</sup>/ha no tuvieron efectos en aumentar la concentración de nitratos en lixiviados, incluso con precipitaciones excesivas (doble de lo normal). Duplicar la dosis hasta 200 m<sup>3</sup>/ha aumenta la lixiviación de nitratos en estos suelos de la zona húmeda, con ambos regímenes de precipitación, generando un pulso de nitrato, que tiende a declinar posteriormente. A nivel de 60 cm de profundidad se llegó a colectar cerca de 45 mg de nitrato/l en los lixiviados. En la Unión Europea, se consideran zonas vulnerables para efectos de aplicación de nitrógeno, aquellas que tienen contenidos de sobre 50 mg/l en los cursos de agua.



FIGURA 6. Lisímetros con praderas en crecimiento. Efectos de dosis de lodos.

**Suelo zona intermedia:**

El cuadro 7.3 muestra resultados de concentración de iones en lixiviados analizados en el suelo de la zona intermedia (Valle Simpson). La concentración de nitrato y la mayoría de los demás iones en los lixiviados de este suelo con lodo (L1 y L2) son comparables a aquellos del suelo testigo (L0). En la concentración de las bases del suelo, se observan algunas diferencias en el mismo cuadro. La lixiviación de calcio, magnesio y sodio, tiende a declinar en los suelos con mayor aplicación de lodo, mientras que parece no haber efecto debido a la cantidad de precipitación.

	L0 pp1	L1 pp1	L2 pp1	L0 pp2	L1 pp2	L2 pp2	pp1	pp2	L0	L1	L2	Gral
	mg/l						mg/l		mg/l			mg/l
NO3=	0,14	0,10	0,10	0,10	0,11	0,21	0,11	0,14	0,11	0,10	0,14	0,13
SO4=	0,23	0,14	0,17	0,13	0,18	0,16	0,18	0,16	0,17	0,16	0,15	0,17
Cl-	0,14	0,69	0,12	0,13	0,13	0,22	0,32	0,16	0,12	0,41	0,16	0,24
Ca++	21,55	12,39	13,10	19,99	18,38	14,93	15,96	17,77	20,77	15,39	12,61	16,84
Mg++	5,57	3,80	4,61	5,04	5,62	4,50	4,63	5,05	5,31	4,71	4,06	4,86
Na+	1,50	1,86	1,90	2,01	1,38	1,58	1,77	1,65	1,76	1,62	1,54	1,70
K+	0,35	0,37	0,26	0,31	0,47	0,61	0,35	0,46	0,33	0,42	0,41	0,41

CUADRO 7.3. Concentración de iones en lixiviados de un suelo de la zona Intermedia de Aysén, sometido a diferentes niveles de aplicación de lodo de piscicultura (L0, L1, L2), bajo dos regímenes de precipitación (pp1:normal y pp2:excesivo).

## **EFFECTOS SOBRE LA BIOMASA**

En el total de biomasa producida durante el período de medición (12 semanas), el nivel L1 superó en 131% y L2 en 144% a L0 (sin lodo;  $p < 0,05$ ). En general, se verificó que el nivel de precipitación mayor tendió a favorecer mayores producciones de biomasa, ya que la producción total fue 17% mayor ( $p < 0,05$ ) en éste, respecto del nivel “normal”.

Durante la siguiente temporada de crecimiento (octubre a marzo), se evaluó el crecimiento vegetal en los lisímetros, sin que se haya aplicado nuevas cargas de lodos. En el suelo de la zona húmeda, se observó que en todos los casos los lisímetros que tuvieron mayor carga de lodo en la temporada anterior (L2) tuvieron mayor producción de biomasa, mientras que la dosis menor (L1) no se diferenció significativamente ( $p > 0,05$ ) del testigo (L0). No obstante, en todos los casos se observa la tendencia de  $L2 > L1 > L0$ . En producción total, L1 rindió casi 49% más que L0 ( $p > 0,05$ ), mientras que L2 superó en 195% a L0 ( $p < 0,05$ ) y en 31% a L1 ( $p > 0,05$ ). Es decir, existe efecto residual de la aplicación de lodo, especialmente con la utilización de dosis más elevadas.

En ambas zonas, el componente más significativo de sus praderas eran las gramíneas, que alcanzaron más de 70% del total de composición botánica en el nivel L0. Las gramíneas aumentaron, producto de la aplicación de lodo de piscicultura, y llegaron a dominar sobre el 95% de la composición de la pradera. Lo anterior ocurrió en desmedro de otras especies, como el caso de malezas o hierbas de hoja ancha y de la casi desaparición de las leguminosas (especialmente trébol blanco). Es decir, la aplicación de lodo produce cambios estructurales en las praderas tratadas.

En los lisímetros con suelo y pradera de la zona intermedia, ya en la primera fecha de corte se aprecia efecto significativo ( $p < 0,05$ ) de la aplicación de lodo de piscicultura sobre la biomasa producida. En la producción total de biomasa del período experimental (12 semanas), el nivel L2 superó a L1 en 38%, y a L0 en un 164% ( $p < 0,05$ ). Los niveles de precipitación no tuvieron efectos diferenciados sobre la producción de biomasa parcial o total ( $p > 0,05$ ). Respecto del efecto residual, en el suelo de la zona intermedia también se observa la tendencia a una mayor producción de biomasa en aquellos lisímetros que recibieron la dosis más alta (L2) en la temporada anterior. En términos globales, aunque L1 rindió casi 33% que L0 en biomasa, no alcanzó significancia estadística ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, L2 superó significativamente a L0 en 104% y a L1 en 54%.

De manera similar a lo observado en la zona húmeda, en los lisímetros con suelo de la zona intermedia, la aplicación de lodo de piscicultura incrementó la cantidad proporcional de gramíneas en la composición botánica de la pradera, con descenso relativo en la presencia de leguminosas (que tienden a desaparecer) y de especies de hoja ancha o hierbas (malezas).

## EFFECTOS SOBRE EL SUELO

Luego de dos temporadas, una vez desarmados los lisímetros y analizados los suelos, en el aquel de la zona húmeda, se observa que a nivel superficial (0-10 cm), la concentración de nitrato es notablemente mayor en L2, respecto de L1 y L0. Con altos niveles de lodo aplicado, el suelo superficial presenta, incluso luego de dos años, niveles significativos de nitratos, lo que podría indicar una reserva importante de nitrógeno, que se aporta vía mineralización de formas orgánicas. En el mismo nivel superficial, el fósforo disponible (Olsen) es muy superior en los tratamientos con aporte de lodo, lo que es significativo luego de dos temporadas post aplicación. Ni el valor de pH, ni el contenido de materia orgánica de este suelo ha sufrido cambios significativos (cuadro 7.4).

Lodo	Pp	N-NO <sub>3</sub>	%N	P Olsen	pH	Materia Orgánica
0-10 cm		mg/kg		mg/kg	%	%
L0	pp1	0,46	1,13	6,8	5,44	20,2
L1	pp1	7,82		22	5,57	21,0
L2	pp1	45,7	1,36	44,6	5,45	20,4
L0	pp2	2,30	1,23	9,4	5,49	21,9
L1	pp2	2,39		24,6	5,58	23,0
L2	pp2	63,0	1,09	36,8	5,42	20,3
50-60 cm						
L0	pp1	1,01	0,22	1,2	6,19	4,4
L1	pp1	1,12		0,8	6,02	4,1
L2	pp1	7,61	0,33	1,6	5,95	5,5
L0	pp2	0,49	0,22	2,6	6,07	2,8
L1	pp2	0,89		0,8	6,03	5,4
L2	pp2	6,84	0,23	1,8	6,11	2,7

CUADRO 7.4. Análisis final del suelo en lisímetros, con diferentes tratamientos de lodo y régimen pluviométrico, a dos profundidades: superficial (0-10cm) y profundo (50-60 cm). Suelo zona húmeda.

En el mismo cuadro 7.4, se aprecia que en el nivel más profundo (50-60 cm), el suelo L0 y L1 tienden a ser más parecidos, mientras aún persisten diferencias con L2, en el sentido que éste tiene mayores niveles (6-7 veces y más) de concentración de nitrato que L1 y L0. Las concentraciones de fósforo disponible son bajas en todos los casos, al ser éste un elemento muy poco móvil. El pH es menos ácido y los contenidos de materia orgánica notablemente más bajos, como es de esperar a esta profundidad.

El cuadro 7.5 se refiere a los lisímetros con suelo de la zona intermedia de Aysén. A nivel superficial se observan diferencias en la concentración de nitrato mayor en L2 y L1 respecto a L0. El fósforo disponible a este nivel superficial luego de dos temporadas post aplicación sigue siendo mayor en los tratamientos con lodo, mientras que los valores de pH se han mantenido relativamente inalterados. En este caso, a nivel superficial se parece observar un cierto aumento en contenido de materia orgánica del suelo al aplicar lodo.

Lodo	pp	N-NO3	%N	P Olsen	pH	Materia orgánica
<b>0-10 cm</b>		mg/kg		mg/kg		
L0	pp1	5,37	1,03	31,8	5,97	15
L1	pp1	14,4		42,8	5,96	17,2
L2	pp1	16,2	0,92	53,6	5,98	16,9
L0	pp2	4,19	0,78	50,6	5,94	16,7
L1	pp2	8,94		54,8	6,00	18,1
L2	pp2	10,9	0,95	59,6	5,97	22,1
<b>50-60 cm</b>						
L0	pp1	0,49	0,4	1,4	6,55	7,8
L1	pp1	0,39		1,6	6,51	7,5
L2	pp1	0,57	0,4	1,8	6,51	5,9
L0	pp2	0,39	0,37	1,4	6,57	6,65
L1	pp2	0,30		1,0	6,54	7
L2	pp2	0,54	0,39	1,6	6,46	6,5

CUADRO 7.5 Análisis final del suelo en lisímetros, con diferentes tratamientos de lodo y régimen pluviométrico, a dos profundidades: superficial (0-10cm) y profundo (50-60 cm). Suelo zona intermedia.

A mayor profundidad (50-60 cm), las concentraciones de nitrato es notablemente inferior a las de la superficie. SE observa una tendencia a mayores niveles en L2 respecto a L1 y L0. Los niveles de fósforo disponible son muy bajos y el pH se ha mantenido prácticamente inalterado en valores cercanos a 6,5. No se observan diferencias notorias en cuanto al contenido de materia orgánica del suelo a este nivel.

## CONCLUSIONES

A través del trabajo desarrollado con lisímetros, en dos tipos de suelos de origen volcánico de la región de Aysén, se ha podido determinar que la lixiviación sólo fue un factor significativo en condiciones de precipitación extrema (el doble de lo normal) y solamente en el suelo de la zona húmeda, no así en la zona intermedia. Es decir, aplicaciones de hasta 200 m<sup>3</sup> de lodo de piscicultura sobre suelos de la zona intermedia no provocaron lixiviación de nitratos, nitritos ni amonio, ni tampoco de otros cationes o aniones analizados.

En condiciones de precipitación extrema (el doble de lo considerado “normal”, en la zona húmeda, se midió un aumento significativo de nitratos a nivel de 60 cm del suelo, que alcanzó un máximo aproximadamente luego de un mes de aplicado el lodo, para luego decaer.

Por otra parte, la aplicación de lodo provocó aumentos en la producción de biomasa (hasta entre duplicar y triplicar), efecto que se mantenía hacia la segunda temporada (efecto residual), especialmente con los niveles más altos de aplicación de lodo. Al aplicar lodo, se verifica también una disminución del grupo de leguminosas y un aumento sostenido de las gramíneas en la composición botánica de las praderas.

Luego de dos temporadas (post-aplicación de lodo), en los suelos con niveles mayores de aplicación de lodo se observan aún mayores niveles de nitrato y amonio, es decir de nitrógeno disponible, lo que indica que hay efectos residuales de gran importancia agronómica. También se aprecian mayores niveles de fósforo disponible, lo que constituye una reserva importante para temporadas posteriores.

## CAPITULO 8

### ANTIBIÓTICOS EN ACUICULTURA

Pier Barattini

#### GENERALIDADES

Los antibióticos son compuestos de origen microbiano que matan o inhiben el crecimiento de otros microorganismos. Estos pueden ser sintetizados, creándose una gran variedad de compuestos con distintos métodos de acción, especificidad y toxicidad. En animales, los antimicrobianos son utilizados para el tratamiento o prevención de enfermedades, así como también para promover el crecimiento, en algunos casos. Su elevado uso, sumado a una pobre absorción de estos medicamentos por parte del animal, ha causado que lleguen tanto al medio acuático como al terrestre.

El riesgo ambiental que potencialmente se produce por antibióticos puede tener varios efectos, siendo el más importante la generación de resistencia, en especial en organismos patógenos para el ser humano. El uso de estos químicos favorece la selección de bacterias resistentes y promueve la diseminación de los genes de resistencia, que pudiera eventualmente traspasar nichos ecológicos hasta llegar al ambiente humano. En el caso de este proyecto interesa también particularmente evaluar posibles efectos sobre la biota del suelo. Es por esto que la aplicación de antibióticos tanto en medio acuático como terrestre debe ser regulada, ya que implica un riesgo potencial en la salud humana y ecosistémica, y que debe ser estudiado.

En la industria acuícola, como en cualquier sistema ganadero (sistemas lecheros, de carne bovina, cerdos, aves, etc.), se utilizan comúnmente antibióticos, los que según su naturaleza, pueden eliminarse rápidamente o permanecer activos por tiempos prolongados. Para mu-

chos antibióticos, el lodo producido como desecho puede generar un ambiente más propicio para la permanencia de éstos que el agua. Los lodos además tienen una alta carga bacteriana, lo que facilitaría la eventual selección de organismos resistentes. Es decir, el eventual uso de antibióticos es un tema presente en todos los sistemas productivos que incluyen animales, ya sean terrestres o acuáticos.

## ANTIBIÓTICOS Y ACUICULTURA EN CHILE

Chile es uno de los mayores actores en acuicultura en el mundo. En la industria acuícola existe uso de varios antibióticos, y está ligado a la necesidad de prevenir (uso profiláctico) y controlar la incidencia de patógenos que afectan los sistemas de cultivo, tal como *Piscirickettsia salmonis*.

Según Sernapesca, los antibióticos autorizados para su uso en el país son el ácido oxolínico, amoxicilina, eritromicina, flumequina, florfenicol y oxitetraciclina. De éstos, los más utilizados son el florfenicol y la oxitetraciclina, que corresponden a un 54 y 43%, respectivamente. El uso de fluoroquinolonas se ha ido desincentivando para prevenir la posible selección de resistencia en microorganismos, ya que es un antimicrobiano de última generación y de amplio uso en medicina humana; esto se ve reflejado en el abrupto descenso en el consumo de flumequina y ácido oxolínico a partir del año 2009, con valores que rondan el 1% (figura 8.1). Los datos disponibles no dan cuenta de qué cantidad de estos antibióticos se consumen en la etapa de agua dulce y en la de agua de mar.

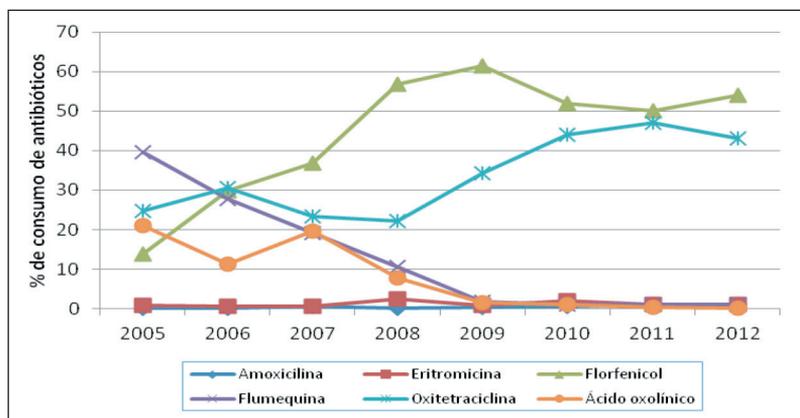


FIGURA 8.1 Porcentaje de antibióticos utilizados en la salmonicultura en Chile para el período 2005-2012 (Fuente: Sernapesca)

## CARACTERÍSTICAS DE LOS ANTIBIÓTICOS

### **Ácido oxolínico y flumequina:**

El ácido oxolínico pertenece al grupo de las quinolonas, actuando sobre bacterias gram-negativas. Posteriormente se les agregó un átomo de flúor, surgiendo las fluoroquinolonas, grupo al que pertenece la *flumequina*. Estas últimas tienen un mayor espectro de acción, ya que afectan tanto gram-negativas como gram-positivas. Además tienen una mayor liposolubilidad, distribuyéndose ampliamente en el organismo. Su vía de administración es oral y parenteral.

### **Amoxicilina:**

Es un antibacteriano sistémico perteneciente al grupo de los  $\beta$ -lactámicos, cuyos blancos son las enzimas que sintetizan la pared celular de las bacterias. La amoxicilina es un derivado semi-sintético de la ampicilina, en el cual se ha introducido un grupo hidroxilo parafenólico en la porción fenil de la cadena lateral. Esto ajusta el punto isoeléctrico del antibiótico a un valor más ácido, lo que mejora su absorción. Como es un ácido orgánico débil hidrosoluble, no atraviesa las membranas biológicas con facilidad, impidiendo su amplia distribución en el organismo.

Su espectro de actividad incluye bacterias gram-positivas y gram-negativas. Pueden ser de primera línea de elección en procesos infecciosos donde la bacteria patógena tiene una localización extracelular, como ocurre en la mayoría de las infecciones. La vía de administración en los salmones es preferentemente oral, pero también se puede administrar vía parenteral, con una biodisponibilidad cercana al 100%.

### **Eritromicina**

Pertenece a la familia de los macrólidos. Inhibe la síntesis proteica al unirse reversiblemente a la unidad 50s del ribosoma bacteriano. Es usualmente bacteriostático, excepto a altas concentraciones, donde puede ser bacteriolítico, siendo más activo contra bacterias gram-positivas. Se absorbe a nivel del intestino, para luego distribuirse rápidamente en el líquido intracelular, alcanzando actividad antibacteriana en casi todo el organismo.

Se utiliza normalmente para controlar la renibacteriosis (BKD) y otras bacterias que sean sensibles a este fármaco. El modo de administración es principalmente por vía oral, aunque esto disminuye su disponibilidad.

### **Florfenicol:**

Es un antibiótico perteneciente a la familia de los fenicoles, derivado del tianfenicol. Es un compuesto neutro, liposoluble, que atraviesa fácilmente las barreras celulares y es capaz de difundirse rápidamente por todo el organismo. Está catalogado como un antibiótico de amplio espectro, usado contra bacterias gram-positivas, gram-negativas y rickettsias.

El mecanismo de acción de la molécula se traduce en el bloqueo de la formación de proteínas por acción directa sobre los ribosomas. La consecuencia para la bacteria sensible es la inhibición de su multiplicación, por lo que el efecto es bacteriostático (no mata a la bacteria).

El florfenicol tiene una alta afinidad por moléculas lipídicas, lo que permite que se almacene con facilidad en los músculos de los salmónidos. Además, es de muy rápida eliminación en los tejidos, teniendo tiempos de eliminación más cortos que otros antibióticos utilizados en acuicultura (Entre 200 y 300 grados día). Su vía de administración en los salmones es preferentemente oral. También se puede administrar vía parenteral (atravesando una o más capas de la piel o de las membranas mucosas mediante una inyección).

### **Oxitetraciclina (OTC):**

Pertenece al grupo de las tetraciclinas. Es moderadamente lipofílica, pero lo suficiente como para atravesar fácilmente las diferentes barreras celulares, distribuyéndose en todo el organismo. Es uno de los grupos de antibióticos de elección en el tratamiento de infecciones causadas por patógenos intracelulares como rickettsias. Debido a su amplio espectro de acción, también pueden utilizarse en otro tipo de infecciones bacterianas como flavobacteriosis.

La vía de administración de OTC en los salmones es preferentemente oral. La presencia de cationes divalentes como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  o  $\text{Fe}^{+2}$  en los alimentos disminuye la absorción de estos fármacos, debido al efecto quelante de estos iones, alterando a la vez la biodisponibilidad. También se pueden administrar por vía parenteral.

## **EFFECTOS DEL USO DE ANTIBIÓTICOS EN EL AMBIENTE**

La principal vía de aplicación de antibióticos es a través del alimento, y la absorción del fármaco por parte del pez varía en gran medida según el tipo de antibiótico utilizado. Antibióticos como los fenicoles tienen un porcentaje de absorción mayor al 90%, siendo una cantidad muy baja la que es excretada a través de las heces. Otros, sin embargo, tienen porcentajes de absorción muy bajos en el intestino del pez, aumentando su presencia en el medio acuático, como es el caso de la oxitetraciclina. Estos valores van a depender de la biodisponibilidad de los antibióticos en el pez, la que puede verse influenciada por el medio donde se encuentre.

Los antibióticos excretados por el pez y en el alimento medicado no consumido, son incorporados al agua y/o al fondo del estanque de cultivo. En los procesos de limpieza, parte de estos antibióticos podrían quedar en los lodos, con una actividad antimicrobiana que es necesario evaluar. En el supuesto caso de existir antibióticos en los lodos de piscicultura y de definirse su uso en agricultura, es necesario estudiar su potencial efecto sobre el suelo. Fenómenos ambientales como lluvias y variaciones de temperatura, al igual que el tipo de suelo, pueden hacer variar enormemente el tiempo de permanencia de eventuales antibióticos en el lodo, pudiendo ser de días, semanas, e incluso meses.

En el caso de determinarse presencia de antibióticos en lodos que se apliquen al suelo, podría haber incidencia en el crecimiento y desarrollo de la vegetación, siendo los efectos variables según la planta. También podrían causarse cambios en la biodiversidad bacteriana, alterando la composición y diversidad de las comunidades del suelo y, lo que es más importante, perjudicar a bacterias que cumplen un rol importante en los ciclos bioquímicos del suelo, como la fijación de nitrógeno, afectando de manera indirecta a las plantas. En el hipotético caso de existir antibióticos en lodos que se vayan a usar en suelos, también estaría el eventual riesgo de que éstos ejerzan presión para la selección de ciertos genes de resistencia, los que eventualmente pudieren ser traspasados a bacterias patógenas.

La presencia o no de antibióticos en los lodos de piscicultura está muy poco estudiado y se hace evidente la necesidad de rastrear estos fármacos con el fin de determinar el potencial impacto que pudieran ocasionar. Factores como las concentraciones que llegarían al suelo, el tiempo de permanencia, el grado de degradación, debieran estudiarse antes de realizar cualquier tipo de aplicación.

## ANÁLISIS DE RESIDUOS DE ANTIBIÓTICOS EN LODOS

El análisis químico de antibióticos desde diferentes matrices es complejo debido a la necesidad de realizar una extracción previa. Los antibióticos consisten normalmente de un centro apolar y uno o más grupos funcionales, los que se disocian o protonan dependiendo del pH del medio. Agentes extractantes apolares o muy polares pueden llevar a una extracción incompleta, por lo que en general se ocupan buffers levemente ácidos en combinación a solventes orgánicos. La limpieza de las muestras se realiza utilizando filtros de 0,45 ó 0,2  $\mu\text{m}$ , o mediante extracción en fase sólida.

Actualmente, la cromatografía líquida de alta eficiencia en combinación con un detector UV (HPLC-UV), o cromatografía líquida con espectrometría de masas (LC-MS/MS) son los métodos de detección más utilizados por su gran sensibilidad. El INIA en Aysén está desarrollando y adaptando metodologías para la detección de antibióticos en diferentes matrices, centrándose en los dos antibióticos más utilizados en la industria, que son oxitetraciclina y florfenicol.

Existen antecedentes que indicarían que el uso de antibióticos es mucho más relevante en la fase marina (engorda de peces) y que su uso en pisciculturas sería menor. Ello debe ser cotejado en base a la analítica propuesta.

A través de estas metodologías, se han estado analizando muestras de lodo procedentes de pisciculturas de la zona y con la aplicación de estos protocolos no se ha detectado la presencia de antibiótico. Para comprobar la efectividad del método, se contaminaron inóculos

de la muestra con distintas concentraciones de florfenicol (entre 6,0 y 0,012 ppm). El nivel de concentración más bajo (0,012 ppm ó 12 ppb-partes por billón) no pudo ser detectado mediante esta técnica.

La metodología que se está desarrollando presenta la ventaja de ser rápida, lo que permite trabajar con una gran cantidad de muestras por día. Además, el consumo de insumos y reactivos es relativamente bajo, lo que permitiría ahorrar en gastos.

Los resultados hasta el momento han mostrado un nivel de sensibilidad bastante alto, lo que en teoría permitiría detectar la presencia de florfenicol hasta niveles muy bajos. Sin embargo, esta misma metodología se probó con lodos de distinto origen, y debe ser depurada, ya que a concentraciones muy bajas se dificulta la lectura del antibiótico.

La metodología podría ser usada en fracciones líquidas y lodos con bajo contenido de materia orgánica. Se hace necesario corregir la metodología para poder analizar muestras con alto nivel de materia orgánica que produzcan interferencias cromatográficas, lo que se lograría modificando el proceso de extracción desde el lodo.

Aunque en apariencia se recuperó todo el antibiótico aplicado (o su mayor parte), este fármaco tuvo un tiempo de estadía corto en el lodo (1 día), por lo que es posible que el florfenicol que lleva más tiempo en esta matriz se encuentre en estado degradado, lo que ha sido mencionado en sedimentos en explotaciones marinas. Sería de gran utilidad ampliar la metodología para incluir los metabolitos, ya que esto entregaría información sobre el destino final del florfenicol.

También se ha avanzado con metodología analítica para oxitetraciclina. Se seleccionaron siete muestras de lodo de distinto origen, las que se analizaron mediante la técnica propuesta, no detectándose la presencia del antibiótico.

Para comprobar la efectividad del método, estas mismas muestras se contaminaron con OTC, a tres niveles de concentración: 10, 1 y 0,1 ppm. Luego se les realizó el protocolo para extracción, y se analizaron por duplicado. El método propuesto para el análisis de OTC tiene la ventaja de ser de fácil manejo y baja variabilidad entre repeticiones. A esto se suman los bajos valores de detección a los que se podría llegar, que serían en última instancia los que definan si el método es útil o no.

Otra cosa a considerar es la alta variabilidad en la recuperación de OTC. Este fármaco se adhiere a las partículas del lodo, lo que hace muy difícil su completa extracción. Por otro lado, también es posible que el antibiótico no detectado se haya degradado en algún metabolito, permaneciendo todavía en el lodo. Poca información existe al respecto, desconociéndose los factores que promuevan esta degradación. Asimismo, queda la incógnita de si estos

metabolitos aún conservan actividad antibiótica o si pueden revertirse en algún momento para formar la molécula original. Ampliar esta metodología para el análisis de metabolitos permitiría saber qué productos de degradación se generan y, a partir de esa base, se podrían realizar estudios sobre su real impacto.

Otro tema que esta metodología permitiría abordar es el tiempo de persistencia que pueda tener el antibiótico en el lodo. Existe abundante información sobre la persistencia de OTC en sedimento, donde se comprobó que ambientes con bajo nivel de oxígeno daban las condiciones ideales para la persistencia de OTC. Estas condiciones hipóxicas

también se presentarían en los lodos. Un estudio enfocado en la posible persistencia permitiría obtener información de esta ocurrencia para las condiciones locales, tanto climáticas como de manejo.

## CONSIDERACIONES FINALES

El estudio de los antibióticos utilizados en la salmonicultura, y su destino final, es de suma importancia al realizar un manejo de los residuos producidos. Al tomar conocimiento del comportamiento de un determinado fármaco en el ambiente, se podrían tomar mejores medidas de manejo fitosanitario, y así disminuir el potencial impacto que éste pudiera causar en el ambiente.

Resulta importante profundizar los estudios en antibióticos, ya que se genera una base sobre la cual se podría estudiar la dinámica de los fármacos, tanto en el lodo, como en el suelo. Por lo mismo, se necesita profundizar el estudio no sólo a los fármacos utilizados, sino también a los metabolitos que se puedan producir, ya que se pueden mantener en el ambiente por tiempo prolongado y no existe información sobre su posible efecto.

Los resultados aquí expuestos aún son basados en pocas muestras de lodo, y hasta el momento no dan cuenta de la presencia de antibióticos. Sin embargo, el reducido número de muestras analizadas, sumado a que la metodología se encuentra aún en desarrollo, no permiten aún afirmar categóricamente que éstos no estén presentes en la fase de agua dulce. Un mayor número de análisis se requerirán para poder afinar la metodología. De mejorar la técnica, se dispondría de una herramienta de medición de lodos generados de manera local, antes de ser aplicados al ambiente. Se continúa trabajando en esa línea, como también en cuanto a los efectos del lodo sobre el suelo.



## CAPITULO 9

### IMPACTO ECONÓMICO DEL USO DE LODOS DE PISCICULTURA COMO POTENCIAL FUENTE DE NUTRIENTES EN AGRICULTURA

Christian Hepp

A través del presente proyecto se ha determinado que el uso de lodos de piscicultura puede aportar cantidades significativas de fósforo y nitrógeno al suelo y a través de éste a las plantas. El lodo tiene cantidades importantes de nitrógeno y fósforo, y desde el punto de vista de producción vegetal son de gran importancia las fracciones más solubles, que están disponibles para las plantas. Es el caso del nitrógeno disponible (específicamente amonio y nitrato) y el fósforo disponible (fósforo determinado por método Olsen).

Las fracciones orgánicas pueden aportar posteriormente nutrientes a través de la mineralización, lo que ocurrirá a mediano plazo, en la medida de que se den las condiciones ambientales adecuadas.

Resulta interesante evaluar también desde una perspectiva económica el uso de lodos de piscicultura y es justamente en relación a estos dos nutrientes, nitrógeno y fósforo, donde se producen los efectos más importantes para el sistema productivo.

Debe indicarse que lo que se indica más adelante se basa en una situación hipotética, en que se reglamente y autorice eventualmente el uso productivo de los lodos de pisciculturas en sistemas agropecuarios. Aunque hay diferentes alternativas, se evalúa aquí la utilización de lodos que llegan a una laguna de sedimentación para su estabilización, la que puede ser operada a costo de la industria acuícola, la que luego los entregaría para aplicación en suelos. De esta forma, desde el punto de vista del usuario del lodo (sector agropecuario), éste puede ser considerado de costo cero en el potrero.

En este análisis se consideran las implicancias económicas directas de reemplazar los fertilizantes comúnmente utilizados en agricultura por lodos de piscicultura. Se analizan diferentes escenarios de praderas y cultivos: pradera mixta (mezcla de pasto ovillo con tréboles); alfalfa de latencia invernal; cultivo de avena o cebada; y cultivo de nabo forrajero o rutabaga. Sólo se evalúa la sustitución de fertilización convencional con lodos de piscicultura.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el proyecto, la composición de los lodos es variable y con ello cambia obviamente el aporte de N y P. En este sentido importará la concentración de los nutrientes en el lodo, pero también, de forma fundamental, el contenido de materia seca del mismo (inverso del contenido de humedad). En el cuadro 9.1 se aprecia cómo varía el aporte de los componentes N y P disponibles, al variar el contenido de materia seca del lodo, en este caso entre 3% y 9%.

Nutriente			%MS lodo							
			3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	
N-disponible	2200	mg/kg	66	88	110	132	154	176	198	g/m3 lodo
P-disponible	3500	mg/kg	105	140	175	210	245	280	315	g/m3 lodo

CUADRO 9.1. Composición promedio del lodo utilizado en cálculos.

Se pueden así construir tablas de composición de nutrientes según los volúmenes aplicados. En el cuadro 9.2 el caso del nitrógeno disponible (nitrato + amonio) se tiene la siguiente tabla, para volúmenes que van desde 25 m<sup>3</sup>/ha hasta 300 m<sup>3</sup>/ha y con valores de materia seca que van de 3 a 9%:

	%MS	m3/ha							
		25	50	75	100	150	200	250	300
N kg/ha	3%	1,65	3,30	4,95	6,60	9,90	13,20	16,50	19,80
	4%	2,20	4,40	6,60	8,80	13,20	17,60	22,00	26,40
	5%	2,75	5,50	8,25	11,00	16,50	22,00	27,50	33,00
	6%	3,30	6,60	9,90	13,20	19,80	26,40	33,00	39,60
	7%	3,85	7,70	11,55	15,40	23,10	30,80	38,50	46,20
	8%	4,40	8,80	13,20	17,60	26,40	35,20	44,00	52,80
	9%	4,95	9,90	14,85	19,80	29,70	39,60	49,50	59,40

CUADRO 9.2. Nitrógeno disponible en lodos según volumen aplicado y contenido de materia seca (base lodo indicado en cuadro 8.1.). Expresado como kg N/ha.

El cuadro 9.3 presenta las cantidades de fósforo disponible para diferentes combinaciones de porcentaje de materia seca del lodo y volumen a aplicar. Asimismo, se evalúan dos condiciones de intensidad de trabajo, es decir uno con niveles “normales” de fertilización de nitrógeno y fósforo y otro de niveles “altos” de aplicación.

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , kg/ha	%MS	m <sup>3</sup> /ha							
		25	50	75	100	150	200	250	300
	3%	6,01	12,02	18,03	24,05	36,07	48,09	60,11	72,14
	4%	8,02	16,03	24,05	32,06	48,09	64,12	80,15	96,18
	5%	10,02	20,04	30,06	40,08	60,11	80,15	100,19	120,23
	6%	12,02	24,05	36,07	48,09	72,14	96,18	120,23	144,27
	7%	14,03	28,05	42,08	56,11	84,16	112,21	140,26	168,32
	8%	16,03	32,06	48,09	64,12	96,18	128,24	160,30	192,36
	9%	18,03	36,07	54,10	72,14	108,20	144,27	180,34	216,41

CUADRO 9.3. Fósforo disponible en lodos según volumen aplicado y contenido de %MS: (base lodo indicado en tabla composición). Expresado como kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha

Para graficar los efectos de la aplicación de lodo en sistemas agropecuarios, se seleccionaron cuatro alternativas de praderas o cultivos, y para ello se consideraron los siguientes parámetros productivos:

FERTILIZACIÓN NORMAL				
Tipo de cultivo	Especie(s)	Rendimiento esperado	Fertilización nitrogenada	Fertilización fosfatada
		kg MS/ha	kg N/ha	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
Pradera mixta	Pasto ovillo x trébol blanco x trébol rosado	6.500	25	40
Alfalfa	alfalfa de latencia invernal	9.000	0	30
Cereal	avena o cebada	8.000	60	40
Brassica forrajera	nabo forrajero o Rutabaga	8.000	70	40
FERTILIZACIÓN ALTA				
Tipo de cultivo	Especie(s)	Rendimiento esperado	Fertilización nitrogenada	Fertilización fosfatada
		kg MS/ha	kg N/ha	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha
Pradera mixta	Pasto ovillo x trébol blanco x trébol rosado	9.000	60	80
Alfalfa	alfalfa de latencia invernal	12.000	0	50
Cereal	avena o cebada	11.000	100	70
Brassica forrajera	nabo forrajero o rutabaga	13.000	100	60

En praderas y cultivos, para aportar nitrógeno y fósforo es común el uso de urea y superfosfato triple, respectivamente, como fuentes fertilizantes. La urea aporta nitrógeno (45% N) y el superfosfato triple (SFT; 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) fósforo. Los precios de mercado (puesto Coyhaique) considerados fueron \$ 358 por kg + IVA para urea y \$ 361 por kg + IVA para el superfosfato.

Se calculó el costo en fertilizante para cada pradera y cultivo que utiliza urea y superfosfato triple. De esta manera, se obtiene el costo total de ambos nutrientes para cada alternativa, que fluctúa entre \$ 23.543/ha en el caso de alfalfa en el sistema “normal” hasta \$ 134.490/ha en el caso del cultivo de cereal en el sistema de fertilización alto (cuadro 9.4).

De esta forma, el costo directo asociado a los nutrientes N y P fluctúa entre \$3 y \$11 por kilogramo de materia seca producida por el cultivo o praderas en el sistema “normal” (rendimientos moderados) y entre \$5 y \$12 en el sistema “alto” (rendimiento alto). En este ejemplo se evalúa solamente la sustitución de fertilizantes por lodo. No se considera factores de aplicación en terreno.

FERTILIZANTE “NORMAL”

Tipo de cultivo	Equivalente urea/ha	Equivalente superfosfato triple/ha	Costo urea	Costo SFT	Costo N+P	costo/kg MS (base N y P)*
	kg/ha	kg/ha	\$/ha	\$/ha	\$/ha	\$/kg MS
Pradera mixta	55,6	87,0	19.889	31.391	51.280	\$ 8
Alfalfa	0,0	65,2	0	23.543	23.543	\$ 2,6
Cereal	133,3	87,0	47.733	31.391	79.125	\$ 10
Brásica	155,6	87,0	55.689	31.391	87.080	\$ 11
FERTILIZANTE ALTO						
Tipo de cultivo	Equivalente urea/ha	Equivalente superfosfato triple/ha	Costo urea	Costo SFT	Costo N+P	costo/kg MS (base N y P)*
	kg/ha	kg/ha	\$/ha	\$/ha	\$/ha	\$/kg MS
Pradera mixta	133,3	173,9	47.733	62.783	110.516	\$ 12
Alfalfa	0,0	108,7	0	39.239	39.239	\$ 3,2
Cereal	222,2	152,2	79.556	54.935	134.490	\$ 12
Brásica	222,2	130,4	79.556	47.087	126.643	\$ 10

\*costo solamente asociado al fertilizante N y P.

CUADRO 9.4. Fertilizante N y P utilizado para cada alternativa de pradera o cultivo (kg/ha) y costo asociado.

Para calcular la influencia que tiene la incorporación de lodo en el sistema de fertilización, se utiliza en este ejemplo un lodo estabilizado, con un 7% de materia seca, obtenido del sedimento de una laguna de decantación, y una aplicación de 100 m<sup>3</sup>/ha. En base a las tablas ini-

ciales, se calcula el aporte que hace este lodo en términos de nitrógeno y fósforo disponible. Este lodo en particular aporta, en nutrientes disponibles, el equivalente a 15,4 kg N/ha y 56,1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Este aporte significa que, en la mayoría de los casos se suple un porcentaje muy alto del fósforo requerido por el cultivo o pradera. En algunos casos aporta incluso más de lo requerido, no haciéndose necesaria la suplementación con fósforo por fertilizantes comerciales. En cuanto a nitrógeno, el aporte fluctúa entre un 22% y 61% en el sistema “normal”; y entre un 15% a 51% en el sistema más intensivo (“alto”), como se indica en el cuadro 9.5.

Consecuentemente, en el primer sistema no se hace necesario aportar fósforo adicional, aunque si es necesario agregar nitrógeno en la mayoría de los casos. En el nivel de fertilización “alto”, el reemplazo de fósforo por lodo es bastante elevado también, aunque se hace necesario suplementar nitrógeno en mayor cantidad (cuadro 8.5).

CON LODO						
“NORMAL”		100 m <sup>3</sup> , 7%				
Tipo de cultivo	aporte N	aporte P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	aporte N	aporte P	saldo N por aplicar	saldo P por aplicar
	kg/ha	kg/ha	%	%	kg/ha	kg/ha
Pradera mixta	15,40	56,11	61,6	140,3	9,6	0,0
Alfalfa	15,40	56,11		187,0	0,0	0,0
Cereal	15,40	56,11	25,7	140,3	44,6	0,0
Brásica	15,40	56,11	22,0	140,3	54,6	0,0

“ALTO”						
Tipo de cultivo	aporte N	aporte P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	aporte N	aporte P	saldo N por aplicar	saldo P por aplicar
	kg/ha	kg/ha	%	%	kg/ha	kg/ha
Pradera mixta	15,40	56,11	25,7	70,1	44,6	23,9
Alfalfa	15,40	56,11		112,2	0	0,0
Cereal	15,40	56,11	15,4	80,2	84,6	13,9
Brásica	15,40	56,11	15,4	93,5	84,6	3,9

CUADRO 9.5. Aportes de nitrógeno (N) y fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) disponible de 100 m<sup>3</sup>/ha de lodo con 7% de materia seca y porcentaje de aporte para diferentes praderas o cultivos.

El ahorro por concepto de fertilización llega a 100% en el caso de pradera mixta y alfalfa, y entre 29-35% en el caso de cultivos en el nivel “normal”. Con el nivel de fertilización “alto”, los montos cubiertos varían de 11% a 58% del costo de fertilizante nitrogenado y fosfatado (cuadro 9.6).

FERTILIZACIÓN “NORMAL”

Tipo de cultivo	Valorización reemplazo urea	Valorización reemplazo SFT	Valorización N+P aplicado con lodo	costo/kg MS (base N y P)	Diferencia de costo (ahorro)	Lodo cubre el % de N y P en:
	\$/ha	\$/ha	\$/ha	\$/kg MS	\$/ha	%
Pradera mixta	12.252	44.030	56.282	0,00	51.280	100,0%
Alfalfa		44.030	44.030	0,00	23.543	100,0%
Cereal	12.252	44.030	56.282	2,86	22.843	28,9%
Brásica	12.252	44.030	56.282	3,85	30.798	35,4%

FERTILIZACIÓN “ALTA”

Tipo de cultivo	Valorización reemplazo urea	Valorización reemplazo SFT Costo SFT ahorrado	Costo N+P ahorrado	costo/kg MS (base N y P)	Diferencia de costo	Lodo cubre el % de N y P en:
	\$/ha	\$/ha	\$/ha	\$/kg MS	\$/ha	%
Pradera mixta	12.252	44.030	56.282	6,25	54.234	49,1%
Alfalfa		44.030	44.030	4,69	39.239	10,8%
Cereal	12.252	44.030	56.282	5,12	78.209	58,2%
Brásica	12.252	44.030	56.282	4,33	70.361	55,6%

CUADRO 9.6. Estimación del ahorro generado por uso de lodo de piscicultura en cuatro alternativas productivas y porcentaje del requerimiento del cultivo que se aporta.

Prácticamente en todas las situaciones, la aplicación de lodo de piscicultura cubre todo el requerimiento de fósforo por parte de praderas y cultivos, mientras que el nitrógeno se reemplaza entre 22-62% en el nivel de fertilización “normal” y 15-51% en el nivel “alto” (cuadro 9.7).

Tipo de cultivo	Fertilización “normal”		Fertilización “alta”	
	Cubre N en %:	Cubre P en %:	Cubre N en %:	Cubre P en %:
	%	%	%	%
Pradera mixta	61,6%	100,0%	25,7%	89,6%
Alfalfa		100,0%		100,0%
Cereal	25,7%	100,0%	15,4%	100,0%
Brásica	22,0%	100,0%	15,4%	100,0%

CUADRO 9.7. Porcentaje de N y P requerido que es reemplazado por la aplicación de lodo.

De esta forma, la aplicación de lodo de piscicultura tiene un impacto económico importante en los sistemas de producción agropecuarios analizados, ya que se logra reducir los costos de fertilización fosfatada y nitrogenada en porcentajes muy importantes. El uso de 100 m<sup>3</sup> de lodo con 7% de materia seca, en este ejemplo permitió ahorrar \$ 12.252/ha en urea (fertilizante nitrogenado) y \$ 56.282/ha en superfosfatos. El aporte es relevante, ya que los fertilizantes son habitualmente un componente importante del costo total de producción en sistemas ganaderos. Otra consideración relevante es que el lodo aplica también fracciones no disponibles, pero que en el mediano plazo pueden mineralizarse parcialmente y ofrecer así un efecto residual en los suelos en que se aplica.

También resulta interesante considerar que para obtener 1 m<sup>3</sup> de lodo de 7% de materia seca, como el que se usa en el ejemplo precedente, es necesario sedimentar al menos 7 m<sup>3</sup> de lodo fresco de 1% de materia seca, como el que proviene habitualmente de las pisciculturas. En muchos casos el contenido de agua puede superar el 99,5%, con lo que se estarían decantando mayores volúmenes aún. De esta forma, el asociar la aplicación de lodos con sistemas de riego de las fracciones líquidas, resulta imprescindible en sistemas de lagunas cerradas (sin efluentes), con vaciado periódico mediante, por ejemplo, aspersión. Por ello la relevancia de los resultados expuestos anteriormente en relación a las fracciones líquidas o sobrenadantes de lagunas.



## CAPITULO 10

### CONSIDERACIONES FINALES

Christian Hepp

Durante el desarrollo del proyecto se buscaron respuestas para lograr el cumplimiento de los objetivos trazados al inicio de éste, que fueron:

- a. Caracterizar los lodos de piscicultura y estudiar efectos sobre suelos y plantas

Junto con establecer una línea base en las localidades donde se utilizaron los lodos, es decir obtener los parámetros básicos y previos de suelos, aguas y vegetación, se realizó una analítica completa a los lodos de piscicultura y los sobrenadantes obtenidos desde las lagunas de sedimentación.

Los lodos de piscicultura son considerados como biosólidos, con un alto contenido de materia orgánica, donde los niveles de nitrógeno y fósforo resultaron de alta relevancia para su uso en sistemas agropecuarios. Su contenido de materia seca es habitualmente muy bajo, es decir los contenidos de humedad son elevados, lo que hace necesario un manejo que permita su posterior aplicación al suelo. Se midieron niveles de nitrato, amonio y fósforo disponible tales, que permitieron respuestas elevadas en praderas y cultivos. Se probaron diferentes dosificaciones y en general niveles de hasta 100 e incluso 150 m<sup>3</sup>/ha resultaron un gran aporte nutricional al suelo, con aumentos sustanciales de producción primaria.

Los lodos de piscicultura, definidos como fecas de peces + restos de alimento no consumido, no presentaron limitaciones en cuanto a aporte de metales pesados al suelo, lo que los hace bastante inocuos, comparado con lodos de plantas de tratamiento de aguas de origen humano.

La mayor producción vegetal estuvo muchas veces contrastada con un cambio en la composición botánica de las praderas, favoreciendo el desarrollo de especies gramíneas, en desmedro de las leguminosas.

Se determinó que la aplicación de lodos podía sustituir en muchos casos totalmente la aplicación de fósforo y aportar significativamente nitrógeno disponible, con disminuciones de costos de fertilización para los sistemas productivos.

Se estudió la parcialización de la aplicación de lodos, la aplicación de otoño, la repetición de dosis en temporadas sucesivas, los efectos residuales, las pérdidas por lixiviación, los efectos sobre la composición N-P en algunas plantas, etc., todos ellos componentes que permiten explicar mejor los efectos de estos lodos en el sistema suelo-planta. Se conoce la composición de los lodos, sus efectos sobre plantas de relevancia económica en la zona, sus posibles dosificaciones, etc.

b. Establecer posibles limitaciones al uso de lodos

Al estudiar los efectos del uso de lodos en sistemas suelo-planta, se conocieron también algunos aspectos en que es necesario profundizar, ya que pueden limitar el uso de lodos en ciertas circunstancias. Por ejemplo, se observó que lodos y sobrenadantes en general presentan niveles elevados de sodio, lo que en suelos salinos puede ser una limitante para su uso. En los suelos volcánicos de Aysén (y en gran parte de los suelos del sur de Chile), la salinidad no representa habitualmente un problema, pero esta situación debe analizarse.

Efectos de mediano y largo plazo sobre los suelos y las relaciones entre sus bases deben ser evaluados. También se ha iniciado el estudio de algunos antibióticos de uso común en acuicultura, y su residualidad en lodos. Este aspecto debe ser analizado en profundidad ya que es uno de los posibles cuestionamientos al uso de estos residuos en suelos.

Los efectos sobre la biomasa del suelo deben ser estudiados para descartar efectos nocivos. También en algunos casos de uso excesivo de lodo se observó descensos en valor pH (acidificación), situación que debe también mirarse en detalle, por la connotación que puede tener en esas circunstancias. La lixiviación de nitrato, aunque en condiciones de dosis excesivas, en suelos de la zona húmeda de Aysén fue otro aspecto que es necesario revisar más en detalle.

En todo caso, los posibles problemas deben ser estudiados y se observaron sólo en algunos casos y siempre ligados a dosis excesivas, que seguramente no serían de uso habitual en sistemas normados.

c. Determinar manejo y aplicaciones

La composición del lodo, con su elevado contenido de humedad, hizo necesario pensar en sistemas prácticos que permitieran concentrar este material previo a su aplicación, permitiendo de paso su estabilización. Para ello se utilizaron lagunas facultativas de sedimentación, con descarga periódica de sobrenadantes sobre praderas y cultivos.

Se observaron efectos positivos sobre la producción de estas praderas y cultivos, al usar un sistema de aspersión, con riego de este sobrenadante. Resultó asimismo un sistema fácil de operar, lo que resultó muy práctico. En otras situaciones, se hizo más práctico el bombeo de lodo desde decantadores de pisciculturas, para ser aplicado mediante carros purineros. Ello permite una aplicación controlada y eficiente sobre el terreno.

d. Difusión y transferencia tecnológica

Junto con la capacitación del personal propio e intercambio de experiencias con otros equipos nacionales e internacionales, en gira tecnológica, congresos y ferias, se generó material informativo con los resultados más relevantes del proyecto. Se logró un acercamiento a la empresa privada, que ve un potencial importante en el reciclaje de estos lodos producidos en las pisciculturas.

Un aspecto central es relevar el tema a nivel de autoridades ambientales, con el fin de trabajar en un esquema borrador de normativa para el manejo y uso benéfico de estos residuos de pisciculturas. Ello se ha avanzado y debiera dirigirse a la obtención de un sistema que reglamente adecuadamente el uso benéfico de estos lodos de piscicultura. Se ha generado información que se ha aportado a las mesas de discusión a niveles gubernamentales.

El desarrollo de la acuicultura en la zona austral del país ha sido explosivo y se observa que la tendencia va en aumento. Ello implicará la instalación de nuevas pisciculturas y con ello la necesidad de contar con un sistema legal de uso de lodos. Los suelos agropecuarios son una de las posibles vías de salida, pero requieren necesariamente de un marco reglamentario.

Las pisciculturas debieran así poder procesar sus lodos localmente y aportarlos a suelos agropecuarios cercanos a su operación, con los aportes nutricionales ya estudiados y las consecuencias en la producción agropecuaria. Sin embargo, debe regularse por ejemplo la dosificación de lodos y su periodicidad de aplicación.

e. Futuro

El proyecto ha concluido y se cierra una primera etapa en el estudio de los lodos de pisciculturas. Sin embargo, han quedado abiertas una serie de interrogantes, las que es necesario dilucidar para lograr afinar una normativa de uso de lodos adecuada y sustentable con el medio ambiente. Es decir, lograr una sintonía entre los requerimientos de la industria, las posibilidades técnicas de uso en sistemas agropecuarios y el manejo sustentable de este recurso, sin afectar el medio ambiente negativamente.

Para ello, se está materializando un proyecto financiado por la industria acuícola, específicamente con las empresas participantes del proyecto, con el fin de continuar los trabajos y profundizar en aquellos aspectos que se ha señalado. Con ello también se cumple el objetivo de dar sustentabilidad a la temática de trabajo, permitiendo que se forme una línea de investigación que es de gran relevancia para la principal industria regional y de gran impacto nacional.

**BIBLIOGRAFÍA**

AQUAETREAT, (2006) Manual on effluent treatment in aquaculture: Science and Practice. Horizontal Research Activities, European Union (Collective research scheme).163 pp. <http://archimer.ifremer.fr/doc/2006/rapport-6496.pdf>

Armstrong, S. M., & Haya, B. T. H. K. (2005). Antibiotic Use in Finfish Aquaculture: Modes of Action, Environmental Fate, and Microbial Resistance. In *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture* (Vol. 5, pp. 341–357).

Bjorklund, H., Bondestam, J., & Bylund, G. (1990). Residues of oxytetracycline in wild fish and sediments from fish farms. *Aquaculture*, 86, 359–367.

Bjorklund, N. V, Rabergh, C. M. I., & Bylund, G. (1991). Residues of oxolinic acid and oxytetracycline in fish and sediments from fish farms. *Aquaculture*, 97, 85–96.

Blasco, M. D., Esteve, C., & Alcaide, E. (2008). Multiresistant waterborne pathogens isolated from water reservoirs and cooling systems. *Journal of Applied Microbiology*, 105(2), 469–75.

Brocklebank, J. R., Evelyn, T. P., Speare, D. J., & Armstrong, R. D. (1993). Rickettsial septicemia in farmed Atlantic and chinook salmon in British Columbia: Clinical presentation and experimental transmission. *The Canadian Veterinary Journal. La Revue Vétérinaire Canadienne*, 34(12), 745–8.

González, S., Tapia, F y Ruiz, R. (2005). Uso benéfico de lodos: valorización d elodos como fertilizantes. Febrero de 2005, Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA La Platina, Santiago de Chile. Serie de Actas N° 27. 208 pp.

Hamscher, G., Sczesny, S., Höper, H., & Nau, H. (2002). Determination of persistent tetracycline residues in soil fertilized with liquid manure by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 74(7), 1509–18.

Hernández, P. (2005). *Responsible use of antibiotics in aquaculture* (p. 97). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Hormazabal, V., Steffenak, I., & Yndestad, M. (1996). Simultaneous extraction and determination of florfenicol and the metabolite florfenicol amine in sediment by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 724, 364–366.

Jacobsen, P. A. L., & Berglund, L. (1988). Persistence of Oxytetracycline Fish Farms. *Aquaculture*, 70, 365–370.

Juhel-Gaugain, M., McEvoy, J. D., & VanGinkel, L. a. (2000). Measurements for certification of chlortetracycline reference materials within the European Union Standards, Measurements and Testing programme. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 368(7), 656–63.

- Kemper, N. (2008). Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecological Indicators*, 8(1), 1–13.
- Kümmerer, K. (2003). Significance of antibiotics in the environment. *The Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 52(1), 5–7.
- Kümmerer, K. (2008). Pharmaceuticals in the environment—a brief summary. *Pharmaceuticals in the Environment*.
- Mojica, E., & Aga, D. S. (2011). Antibiotics Pollution in Soil and Water: Potential Ecological and Human Health Issues.
- Oka, H., Ito, Y., & Matsumoto, H. (2000). Chromatographic analysis of tetracycline antibiotics in foods. *Journal of Chromatography A*, 882(1-2), 109–33.
- Peralta, J.M. (2005). Taller de capacitación en evaluación ambiental de planteles ganaderos: Santiago, Chile, 7 y 8 de septiembre de 2005. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación INIA Carillanca. Serie de Actas INIA N° 29. 227 pp.
- Sengeløv, G., Agersø, Y., Halling-Sørensen, B., Baloda, S. B., Andersen, J. S., & Jensen, L. B. (2003). Bacterial antibiotic resistance levels in Danish farmland as a result of treatment with pig manure slurry. *Environment International*, 28(7), 587–95.
- SERNAPESCA. (2011). *Informe sobre uso de antimicrobianos en la salmonicultura nacional 2005-2009*. (p. 16).
- Sohlberg, S., Ingebrigtsen, K., Hansen, M. K., Hayton, W. L., & Horsberg, T. E. (2002). Flumequine in Atlantic salmon *Salmo salar*: disposition in fish held in sea water versus fresh water. *Diseases of Aquatic Organisms*, 49(1), 39–44.
- Wurmann, C. (2010). *FAO Fisheries and Aquaculture Circular No . 1061/3: Regional review on status and trends in aquaculture development in Latin America and the Caribbean - 2010* (Vol. 3, p. 212).

Un proyecto financiado por Innova Chile (Corfo) y el  
Ministerio de Agricultura.



### Empresas asociadas



PESQUERA  
LOS FIORDOS

PISCICULTURA  
GARO

AQUACHILE

SALMON  
CHILE

Ejecutado por:  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias  
Centro Regional de Investigación Tamel Aike (INIA)  
Casilla 296, Coyhaique. Chile

