

Evaluación de riesgo ecológico en la aplicación de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas a suelos en la región de la Araucanía.

Carolina Soto Vidal

Programa Magister en Ciencias mención en Recursos Hídricos, Universidad Austral de Chile.

Email: biologagestion@gmail.com

Resumen

Los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas contienen materiales orgánicos ricos en nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), además de metales y pequeñas cantidades de otros elementos tales como celulosa, ácidos orgánicos. Los lodos pueden ser considerados como residuos o reciclados mediante la incorporación a suelos. Frente a esta situación de disposición de lodos primarios en suelos, se determinó el efecto de dos muestras de lodos (una ya incorporada en suelo y otra fresca) mediante la evaluación de bioensayos de toxicidad en *Eisenia foetida* durante 14 días, en donde se determinó que las muestras de lodos no presentaban toxicidad y que además existe una independencia entre la concentración y sus efectos en la mortalidad y crecimiento. Sumado a lo anterior, se evaluó las muestras de lodos en base a su contenidos de metales mediante el análisis de riesgo ecológico, en el cual obtenidos los antecedentes referidos a efectos y exposición, se integró la información para estimar el riesgo ecológico para metales pesados, en donde los factores de riesgo para el suelo son como cobre, cadmio, mercurio, níquel y zinc, la estimación del riesgo ecológico en el lodo incluye a todos los metales pesados y finalmente los factores de riesgo para el lodo aplicado en el suelo son todos los metales a excepción de arsénico.

Palabras Clave: Lodos primario, Bioensayos, metales pesados, riesgo ecológico.

Abstract

The sludge generated at treatment plants wastewater containing organic materials rich in nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), along with small amounts of metals and

other elements such as cellulose, organic acids. The sludge can be considered as waste or recycled by incorporating soil. Faced with this situation provision of primary sludge on soils, the effect of two sludge samples (one already incorporated in soil and other cool) was determined by evaluating toxicity bioassays in *Eisenia foetida* for 14 days, where it was determined that the sludge samples showed no toxicity and that there is independence between the concentration and its effects on mortality and growth. Added to this, the sludge samples based on their metal content was assessed by ecological risk analysis, which obtained background information regarding effects and exposure information is integrated to estimate the ecological risk for heavy metals, where the risk factors for the ground are as copper, cadmium, mercury, nickel and zinc, the ecological risk assessment in the sludge includes all heavy metals and finally the risk factors for the applied floor mud are all metals except for arsenic.

Keywords: primary sludges, bioassays, heavy metals, ecological risk

Introducción

Se estima que la depuración de las aguas servidas en las ciudades irá en aumento considerable, tanto por las exigencias de calidad ambiental como por el derecho de disfrute de bienestar físico y psíquico. El tratamiento de aguas servidas a nivel nacional surgió como respuesta a la aparición del cólera entre los años 1992 y 1996 (RADA 2005). Hacia el 2005 el promedio nacional de cobertura de tratamiento ascendía al 81% de las aguas servidas, mientras que en la Región de la Araucanía alcanzaba sólo al 15%, quedando ésta como una de las regiones más atrasadas del país. El restante 85% se vierte directamente en lagos y ríos de la región. El tratamiento de aguas servidas tiene por objetivo el cumplimiento del D.S. N° 90 de 2001, que regula la calidad de las aguas superficiales. Para el cumplimiento, se debe eliminar la materia orgánica y los sólidos suspendidos en el caudal, además de los organismos patógenos de origen entérico-

En el proceso de las plantas depuradoras de aguas residuales, se generan biosólidos también conocidos como lodos, que corresponden a una acumulación de sólidos orgánicos sedimentables, originados de los diferentes procesos de tratamiento de aguas (Cuevas *et al* 2006). Los constituyentes del agua residual eliminados, incluyen basuras, arena, espumas y fango. El lodo suele presentar contenidos de sólidos variable entre 0,25 % y 12 %, dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento (Aravena *et al*, 1996). Los biosólidos se obtienen por un complejo sistema, que incluye tres fases de tratamientos, cada uno con un objetivo en específico y con un

nivel de depuración diferente. Estos procesos, puede ser de tipo primario, secundario o terciario, en donde los más utilizados corresponden a los dos primeros. En Chile los efluentes deben cumplir con valores límites para el vertimiento en ambientes naturales con el propósito de preservar la calidad de los distintos cuerpos hídrico, según el DS 90.

La legislación chilena en el reglamento para el manejo de lodos generados por plantas de tratamiento de aguas servidas en su Título II, hace referencia a la clasificación sanitaria o en otras palabras a la reducción del potencial de atracción de vectores y presencia de patógenos, como también la distinción de lodos clase A y clase B, en base al cumplimiento de lo anterior. Además, señala los parámetros a seguir, para la aplicación de lodos al suelo (Título IV), como tasa máxima de aplicación en base al tipo de suelo receptor, aquel con limitaciones para uso agrícola o forestal o suelos degradados, A su vez indica las concentraciones máximas de metales en lodos para la aplicación al suelo receptor, las cuales se detallan en la Tabla I, como también en su artículo 23 establece las tasas máximas de aplicación a suelos, considerando en primer lugar 30 ton/há año base materia seca (b.m.s) y 90 ton/há año b.m.s .de acuerdo a la cantidad de metales pesados del suelo receptor. El seguimiento ambiental del manejo de lodo según decreto, está regulado por El Servicio Agrícola Ganadero (SAG) entidad encargado de supervisar, fiscalizar y ejecutar las autorizaciones de disposición de lodos mediante planes de manejo debidamente desarrollados de acuerdo al reglamento que lo amerite, habiendo por tanto disposiciones legales que permiten la aplicación de lodos en suelos. Según EPA (2000), posee variadas ventajas como ser una forma excelente de reciclaje ya que retornan valiosos nutrientes al terreno y mejoran las condiciones para el crecimiento de la vegetación, es una opción relativamente económica y más ecológica comparada con otros métodos como la incineración o el vertido al mar. Por tales motivos la aplicación al suelo de lodos no solo de plantas de tratamiento sino además de salmonicultura y celulosa es uno de los enfoques más investigados ya que autores han encontrado lo benéfico de esta alternativa. Es así como Celis *et al* (2006) señala que la incorporación de biosólidos de aguas servidas en un suelo patagónico incrementaron los niveles de nutrientes y el lodo de salmonicultura presenta una mejor respuesta en la germinación de *Lactuca sativa*. Para Cuevas *et al* (2006) la adición de lodos tiene efectos en las propiedades físicas del suelo, como un aumento de la materia orgánica y de metales. A su vez Acosta *et al* (1995), concluye que el lodo aplicado en suelo de tipo franco-arenoso favorece las condiciones óptimas de materia orgánica, pH, y garantiza también el buen funcionamiento de la acción bacteriológica del suelo, observado a través de la disponibilidad de nutrientes accesibles a las plantas. Estas investigaciones permiten el cuestionamiento de que tan benéfico o riesgoso es el uso de biosólidos en suelos. Por ello es preciso considerar las tasas

máximas de aplicación, las concentraciones de metales y el tipo de suelo receptor. A raíz de lo mencionado anteriormente, se hace necesario evaluar los efectos que posee el lodo en el medio ambiente y una manera de saberlo y normarlo comprende el estudio de riesgo ecológico

Tabla 1. Concentración máxima de metales en mg/kg sólidos totales (b.m.s) según la legislación chilena.

Metal	Suelos con Severas Limitaciones para Uso Agrícola y Suelos Forestal (mg/kg)	Suelos Degradados (mg/kg)
Arsénico	20	40
Cadmio	8	40
Cobre	1000	1200
Mercurio	10	20
Níquel	80	420
Plomo	300	400
selenio	50	100
zinc	2000	2800

La definición de riesgo ecológico se entiende como la probabilidad de que ocurran efectos adversos en la salud humana, en la integridad del ambiente y de los ecosistemas, no sólo por aumento de la mortandad de la población afectada, sino por la disminución de la calidad de la vida y alteración del equilibrio natural existente. Los elementos de la evaluación de riesgos ecológicos son las estimaciones del peligro en función de la exposición a una o varias sustancias identificadas y la probabilidad de que esa exposición ocurra (PNUMA/IPCS 1999). Para la evaluación de riesgos en lodos, Jensen & Folker-Hansen, (1995), Jensen *et al* (1997), Scott-Fordsmann *et al* (1995) consideró, la comparación genérica de criterios de calidad de los lodos con sus concentraciones ambientales y pruebas de toxicidad, para lo cual son necesarios los datos químicos sobre el nivel de contaminantes del lodo generado como también la estimación de la carga, para la realización de un balance de masa que permita determinar las concentraciones de los contaminantes. De esta

manera se puede establecer la relación PEC/PNEC que nos entrega la información de riesgo ecológico, según el valor del cociente resultante.

Dentro de las pruebas de toxicidad, la ejecución de bioensayos con lombrices específicamente, *Eisenia foetida* constituye una de las principales especies para la evaluación de suelos debido a que estos microorganismos que juega un papel importante por su sensibilidad a contaminación metales por ejemplo con Zn, Cd y Pb (Conder *et al* 2001), en donde su biodisponibilidad depende de la solubilidad de estos metales y de su capacidad de absorción en la fracción coloidal del suelo, la que puede verse favorecida cuando existe un cambio de pH, una cantidad de materia orgánica fuera de la ya establecida en el suelo receptor, que hace a los metales más solubles y por lo cual más intercambiable (Acevedo *et al* 2005)

Finalmente, en la región de la Araucanía existen aproximadamente 15 plantas de tratamiento de aguas servidas, en donde, algunas plantas disponen los lodos generados, en predios de sectores rurales en el marco de la reglamentación vigente para el manejo de lodos. En el predio El Capricho en la localidad de Los Sauces se aplican lodos estabilizados y primarios, si bien se hace una caracterización física química y biológica, tanto de los lodos como del suelo donde se aplica, no se ha evaluados los efectos ecotoxicológicos y no se ha realizado una evaluación de riesgo asociado a la composición de metales. De este modo, el estudio pretende determinar la respuesta ecotoxicológica de *Eisenia foetida* ante la presencia de lodos primarios de plantas de tratamiento de aguas servidas incorporadas en suelo en la localidad de Los Sauces, región de la Araucanía y a su vez realizar la estimación de riesgo ecológico potencial de lodos primarios aplicados en estos suelos

Materiales y Métodos

Descripción área de estudio: el experimento se desarrolló en El predio El Capricho ubicado en el Km. 10 del camino Lumaco- Los Sauces, entre los W 72°52'57'' y S 38° 05'33'', en la localidad Los Sauces perteneciente a la región de la Araucanía. El tipo de suelo presente en el área de estudio, corresponde al orden Inceptisol. Son suelos profundos, en posición de terraza aluvial, formado por sedimentos finos ricos en cuarzo. De textura superficial franco arcillosa. Suelo de topografía plana o de plano inclinado con 1% a 3% de pendiente, de permeabilidad muy lenta y de drenaje imperfecto. En invierno presenta inundaciones ocasionales por lo cerrado de los valles en

que se ubica este suelo (CIREN 2000). El predio recibe lodos provenientes de la planta de tratamiento de Angol, Collipulli y Lumaco, las cantidades de lodos que son aplicadas en este predio se detallan en la Tabla 2

Descripción del Lodo de la Planta de Tratamiento: el lodo utilizado en el experimento fue obtenido de la planta de tratamiento de aguas servidas de la localidad de Angol, basado en un sistema de tratamiento primario y desinfección con cloro gas. La línea de lodos contempla un sistema basado en la estabilización de los lodos mediante adición de cal, para una posterior deshidratación mediante centrifuga. De acuerdo a la calidad final de los lodos tratados, cumplen con la clasificación sanitaria tipo B en relación al contenido de coliformes fecales y disminución de la atracción de vectores, (media geométrica de coliformes fecales de 4.1 NMP/g base materia seca (b.m.s.) y una media aritmética de un 56% de humedad) obteniéndose lodos con una humedad no superior al 7 %.

Tabla 2. Aplicación de lodos y manejo del predio

Resumen aplicación	Cantidad
cultivo actual	trébol y ballica
cultivo futuro	trébol y ballica
dosis de aplicación (ton/háb.m.s)	30
superficie total (há)	43
área de protección (há)	3
superficie de aplicación (há)	40
Cantidad total de lodos a aplicar (ton m.s.)	1200

Obtención de Muestras de lodo: la recolección de muestras de lodo se realizó mediante el establecimiento de parcelas en el predio de estudio, mediante la construcción de una calicata mayor a medio metro, ya que permite la recolección de la muestra de lodo en su estado natural, obteniéndose una muestra fresca de lodo y otro muestra de lodo que había sido incorporada en el suelo con una diferencia de 5 días.

Selección de especie para bioensayo: los oligoquetos lumbrícidos como *Eisenia foetida* (Savigny, 1826) y *Eisenia andrei* (Bouché, 1972) han sido empleadas en bioensayos ecotoxicológicos (Calow, 1993; Robidoux *et al.*,1999; Fisher *et al.*, 2001) , debido a que son fáciles

de cultivar en el laboratorio, presentan tiempos generacionales relativamente más cortos que otros oligoquetos, utilizan menores volúmenes de suelo en la cría y en el laboratorio y son ecológicamente más representativos en el ambiente terrestre (Van Gestel *et al.*, 1988; Keddy *et al.*, 1995; OECD, 2000; Robidoux *et al.*, 2001) . *Eisenia foetida* es un oligoqueto que ha demostrado ser adecuado para la evaluación de la toxicidad de plaguicidas empleando los criterios de la OECD (1984, 2000) y las recomendaciones de Calow (1993). *Eisenia foetida* es una especie clave en el ecosistema terrestre, esta es una de las razones por las que estas lombrices de tierra han sido propuestas extensivamente en estudios ecotoxicológicos (Scott-Fordsmand & Weeks, 2000)

Bioensayo *Eisenia foetida*

Prueba Suelo-Lodo-Lombriz 14 días: se utilizó la metodología propuesta por INE & UAM (2005), Los organismos utilizados corresponden a lombrices adultas al menos de 2 meses (cliteladas) de un cultivo mantenido en condiciones de laboratorio , teniendo como fuente de alimento restos de alimentos vegetales, bajo un sustrato de tierra y diario , con aireación e hidratación controlada.

La realización del bioensayo consiste en la determinación de toxicidad de las dos muestras de suelo recolectadas, para lo cual se procedió a determinar la humedad de las muestras como primer paso, necesaria para la mantención de las organismos de pruebas en las concentraciones de suelo-lodo-lombriz, la determinación de las humedad de las muestras a evaluar se realizó de acuerdo a la fórmula:

$$HS = (A-B)/[C-(A-B)]*100 \quad HS = \text{humedad de la muestra en \%}$$

A = peso inicial de la muestra + cápsula (g)

B = peso seco final de la muestra + cápsula (g)

C = peso de la alícuota inicial (g)

La que posteriormente de obtenidos los datos, se procede a la hidratación de la muestra de suelo, en donde se pueden hidratar de 35 a 45% correspondiente al peso del suelo utilizado en la prueba, según :

$$HA = T - HS \quad HA = \text{hidratación necesaria (\%)} \quad T = \text{humedad blanco (\%)} \quad HS = \text{humedad del suelo (\%)}$$

Finalmente, para determinar la cantidad de agua a adicionar:

$$V = (W*HA/100) F$$

V = cantidad de agua a adicionar (ml)

W = peso de la muestra (g) HA = hidratación necesaria (%)

F = factor de conversión (1 ml/1g)

Con respecto a la implementación del bioensayo consiste en la preparación de seis diferentes concentraciones expresadas en relación a la cantidad de lodo g por Kg. de suelo, más un control, es decir, 80 g lodo/kg suelo, 160 g lodo/kg suelo 240 g lodo/kg suelo y 600 g lodo/kg suelo todo esto con sus respectivas 3 réplicas, en conjunto con la introducción de 10 lombrices por concentración. Los envases utilizados en la prueba, corresponden a frascos de vidrio de 1000ml, los cuales contienen una cantidad total de 250 grs de concentración. Estos envases fueron tapados con parafilm y en ellos se construyeron orificios de aireación. Las condiciones generales de la realización del bioensayo se detallan en la Tabla 3.

La exposición es durante 14 días, realizando un registro de pH, conductividad y algunos parámetros como carbono orgánico, nitrógeno y fósforo, además de contabilizar el número de individuos muertos por concentración a los 7 días y luego finalizado el bioensayo.

Estimación del Riesgo ecológico: el Riesgo ecológico se determina cualitativamente en términos de la razón entre la concentración ambiental esperada (PEC) y la concentración sin efecto ecológico (PNEC). La PEC es la concentración más alta medida o estimada en el lugar de estudio, considerándose una mínima y máxima para el lodo y la especie con la cual se trabaja (*eisenia foetida*). La PNEC, por su parte, se basa en los efectos producidos en las especies seleccionadas con relevancia ecológica y se aplica un factor de seguridad a los valores de LC₅₀, encontrados Una vez aplicado el factor de seguridad, se considera que existe riesgo potencial, si el valor del cuociente es mayor que 1 (PEC < PNEC). En la estimación de riesgo para el lodo, los cálculos son basados en la determinación del escenario del exposición, utilizando datos como tasa de aplicación, profundidad de incorporación de los lodos (Aguas Araucanía, 2005), la densidad del suelo estimada mediante investigaciones de autores como Castillo *et al* (2008), muestreos en terreno y procedimiento de laboratorio. Permitiendo estimar la concentración de la cantidades de lodo ton/há en el área del suelo, de manera de obtener la proporción de la disolución del lodo aplicado y por tanto la cantidad de los metales pesados contenidos en esa relación. Definido el escenario de exposición (PEC) se procede a cuantificarlo con la PNEC de los metales pesados

según los criterios The Danish ecotoxicological soil de National Environmental Research Institute (Jensen & Folker-Hansen, 1995; Scott-Fordsmand et al 1995; Jensen *et al* 1997).

Tabla 3. Resumen de las condiciones bioensayo con lombrices 14 días

Ítem	Descripción
Tipo de test	estático
Especies	>2 meses clitelada
Variable respuesta	Mortalidad, alteraciones morfológicas
Fotoperiodo	24 hrs. luz
Duración bioensayo	14 días
N ° de concentraciones	5 más un control
N ° de organismo por réplicas	5
N ° de réplicas	4
Cantidad muestra suelo requerida por réplica	250 g
pH del suelo	pH 5-pH 9
Humedad del suelo	35-45%
Aceptabilidad del test	90% sobrevivencia control

Análisis de datos: los resultados de los bioensayos con *Eisenia foetida*, son analizados mediante el programa EPA PROBIT. Los datos correspondientes a la medición de parámetros químicos a los 7 días y luego a los 14 días por cada concentración fueron analizados mediante pruebas paramétricas como test de tukey. Para el análisis de riesgo ecológico se determinó el escenario de exposición (PEC) de la aplicación de lodos por hectárea (há) y de la definición de la PNEC, a partir de esta información en conjunto con las concentraciones de metales pesados del lodo y del suelo receptor, es posible estimar la concentración de metales aplicados al suelo.

Resultados.

Aplicación de lodos en el área de estudio: el sector de disposición de los lodos cuenta con una superficie total de 43 há aproximadamente, pero la superficie de aplicación del mismo, es de 40 há, descontando un área de protección. En el sector de aplicación, la napa freática, se encuentra ubicada a más de 2.5 m de profundidad, con una pendiente no superior al 1% y con valores de profundidad alrededor de los 90cm. La disposición del lodo una vez en terreno, se esparcen con una tolva estercolera procurando esparcir capas homogéneas de lodos para luego proceder a rastrear alrededor de 15 cm de profundidad para incorporar el lodo. La caracterización del suelo y del lodo (metales, pH, conductividad) se describe en la Tabla 4.

Evaluación toxicidad bioensayos: los resultados obtenidos en el bioensayo de exposición a los 14 días, muestra la no toxicidad de las concentraciones expuestas, no obteniéndose por tanto un valor de LC50. Respecto a los datos de crecimiento y mortalidad (Tabla 5), se aprecia que no existe una relación directa entre aumento de concentración y el porcentaje de mortalidad, la misma situación se visualiza para los datos de crecimiento. Al comparar los resultados obtenidos a los 7 días con los 14 días, se observa que no existe una proporcionalidad de los datos producto de la variabilidad presentada en cada tratamiento.

Al aplicar un test de Tukey a las concentraciones para la variable de crecimiento a los 7 y 14 días, la Tabla 6 señala que solo la concentración correspondiente a 480 g lodo/ kg suelo a los 7 días, presenta diferencias significativas.

Evaluación parámetros fisicoquímicos 7 y 14 días: los registros promedio de pH y conductividad obtenidos para cada concentración en cada tiempo de evaluación, se muestran en la Tabla 7, los resultados de la evaluación a los 7 días indican que el pH es muy similar para cada concentración, no así los valores de conductividad donde el promedio para la mayor concentración del ensayo (600g lodo/kg suelo con CE 8,6 uscm) es muy inferior a lo encontrado para la mínima concentración en estudio (80 g lodo/kg suelo con CE de 29,5 uscm).

Tabla 4. Contenido de metales pesados en lodos primarios y en suelo de área de estudio

Parámetros	Lodo (mg/kg)	Suelo(mg/kg)
PH	10,9	5,8
Conductividad (Us)	1,289	40
Humedad (%)	63,15	27,9
Arsénico	8.98	<0.50
Cadmio	0.44	<0.01
Cobre	170.6	32
Mercurio	1.1	<0.005
Níquel	9.8	12
Plomo	29	20
Selenio	<0.63	<0.50
Zinc	624	83
Fósforo	6,25
Nitrógeno	20263,1

Tabla 5 Valores promedio crecimiento y mortalidad a los 7 y 14 días.

Concentraciones	crecimiento 7 días (%)	Mortalidad 7 días (%)	crecimiento 14 días(%)	mortalidad 14 días (%)
control	-29,4	22,7	-40,0	26,7
80 g lodo/kg suelo	54,0	33,3	-58,3	40,0
160 g lodo/kg suelo	-80,0	13,3	-33,3	40,0
240 g lodo/ kg suelo	-16,6	20,0	85,0	13,33
480 g lodo/ kg suelo	-430,0	6,6	520	6,6
600 g lodo/ g suelo	-470,0	6,6	45,0	26,6

Tabla 6. Test de Tukey, análisis de las diferencias entre las categorías, con un intervalo del 95% de confianza.

Contraste	Crecimiento 7 días		Crecimiento 14 días	
	Pr > Dif	Significativo	Pr>Dif	Significativo
c80 vs control	0,084	No	0,999	No
c160 vs control	0,086	No	0,771	No
c240 vs control	0,111	No	0,974	No
c480 vs control	0,043	Si	0,450	No
c600 vs control	0,303	No	0,864	No

Tabla 7. Valores promedio de pH y conductividad eléctrica (C.E) evaluación bioensayos 7 y 14 días

Concentraciones (g lodo/kg suelo)	Evaluación 7 días		Evaluación 14 días	
	Promedio pH	Promedio C.E	Promedio pH	Promedio C.E
control	6,6	10,3	6,6	0,1
80	6,7	29,5	5,9	40
160	6,7	9,6	6,1	80,1
240	7,0	22,2	6,5	120,0
480	7,0	14,9	6,8	240,0
600	7,2	8,6	7,1	300,0

Finalizado el ensayo a los 14 días, los registros muestran que el pH no presenta mayores variaciones respecto a las primeras realizadas, en cambio los valores de conductividad eléctrica se visualizan claramente muy superiores y con una tendencia al aumento en relación con el aumento de las concentraciones.

Los resultados encontrados para las mediciones de los parámetros como carbono orgánico, fósforo y nitrógeno a los 7 y 14 días se muestran en la Tabla 8, en ella se visualiza de manera general que existe una concordancia entre el aumento de las concentraciones con los valores de los parámetros de carbono orgánico y nitrógeno.

Al observar la evaluación de todos los parámetros a los 7 días con respecto a los 14 días, se aprecia como en el carbono orgánico existe un aumento de ellos para todas las concentraciones, en relación al fósforo disminuye a los 14 días y finalmente el nitrógeno posee alzas y bajas en sus mediciones.

Resultados Riesgo Ecológico: los lodos aplicados pueden ser estudiados desde el punto de vista de los metales que lo componen. Por tanto al emplear para los lodos los datos de toxicidad de los metales que lo componen (PEC) y aplicando los datos (PNEC) The Danish Ecotoxicological Soil de National Environmental Research Institute (Jensen & Folker-Hansen, 1995, Scott-Fordsmand *et al* 1995, Jensen *et al* 1997), es posible obtener el riesgo ecológico.

Tabla 8. Valores promedio (mg/kg) de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en la evaluación a los 7 y 14 días de exposición del bioensayo lodo-suelo-*Eisenia foetida*.

Concentraciones (g lodo/kg suelo)	Parámetros Químicos					
	Carbono Orgánico 7 días (mg/kg)	Carbono Orgánico 14 días (mg/kg)	Nitrógeno 7 días (mg/kg)	Nitrógeno 14 días (mg/kg)	Fósforo 7 días (mg/kg)	Fósforo 14 días (mg/kg)
Control	3973,11	46342,40	25157,75	1941,06	386,72	160,51
80	3700,06	47293,53	25496,79	1756,37	961,67	189,13
160	3235,25	49142,72	26188,98	2152,59	392,67	188,13
240	3884,59	49805,86	26845,22	2031,07	233,25	207,92
480	5682,28	70641,88	38162,08	2363,20	174,25	152,74
600	8898,32	70813,17	39855,74	2824,42	100,13	212,51*

* diferencia estadística

Determinación escenario de exposición: la información obtenida del plan de manejo de lodos aplicados en el área de estudio, indica que se incorporan 30 ton / há de lodos, los cuales poseen una densidad de 1,3 ton/m³ que nos permite obtener un volumen de suelo de 1500 m³

considerando una profundidad de aplicación de 0,15 m por há que corresponde a un peso del suelo de 1950 ton, el cual transformado a concentración de lodo mediante la división de la tasa de aplicación de lodo (30 ton/há) por el peso del suelo (1950 ton) se obtiene la cantidad de 0,015 ton lodo /ha suelo o en su defecto 15,4 kg lodo / ton suelo (Tabla 9). Esta cantidad es la concentración de lodos por tonelada de suelo y con ello se determinó las concentraciones de cada metal pesado. Los valores estimados se obtuvieron al dividir la cantidad total de metales pesados, es decir, la sumatoria de metales del suelo y el lodo, con el peso del suelo (volumen por la densidad). Lo que entrega la concentración de metales por dosis aplicada, los cuales son expresados en la Tabla 10, suponiendo que todo el metal que se aplica no es lixiviado y arrastrado por escorrentía.

Tabla 9. Escenario de exposición

Variables	Cálculos
Aplicación de lodos	30 ton/há
Profundidad de aplicación	0,15 m
Volumen suelo	1500m ³
Densidad suelo	1,3 ton/ m ³
Peso del suelo	1950 ton
Concentración lodo	15,4 kg lodo/ ton suelo

Evaluación de los Efectos (PNEC): se obtuvo mediante la relación entre los valores de LC50 reportados para cada metal Arsénico (As), Cadmio (Cd) Cobre (Cu) Mercurio (Hg) Níquel (Ni) Plomo (Pb) Selenio (Se) y Zinc (Zn) que compone el lodo según lo reportado por el trabajo de Jensen, (2002) en el estudio de la identificación de riesgos de los contaminantes de los lodos de depuradora más el factor de seguridad aplicado que para este caso es de 10, considerando el peor escenario de exposición. De este modo los valores de efectos (PNEC) se detallan en la Tabla 11. Los cuales son utilizados para la determinación del riesgo ecológico de los metales contenidos en el lodo y el riesgo ecológico de los metales contenidos en el suelo.

Tabla 10 Concentración estimada de metales pesados escenario de exposición

Metales Pesados	Concentración Estimada en Suelo (kg/ton)
As	0,628
Cd	0,055
Cu	31,515
Hg	0,012
Ni	11,818
Pb	19,706
Se	0,492
Zn	81,742

Tabla 11 Valores de PNEC de metales pesados en lodo.

Metales pesados	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
*LC ₅₀	10	0,3	30	0,1	10	50	1.0	100
FS	10	10	10	10	10	10	10	10
PNEC	1,0	0,03	3,0	0,01	1,0	5,0	0,1	10

*Fuente; Jensen, 2002

Estimación del Riesgo ecológico: los resultados obtenidos de riesgo ecológico considerando el escenario de exposición (metales) de acuerdo a los datos provenientes del manejo de los lodos en el área de estudio, nos arrojó que para el suelo del área de estudio, son 5 de 8 los factores de riesgo, representados por cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se) y zinc (Zn). De los cuales el de mayor riesgo corresponde a Cobre (Cu) con un RQ de 10,7 (Tabla 12)

Respecto a la estimación de riesgo ecológico asociado al lodo, los resultados para el lodo muestran que todos los metales son causantes de riesgo, se muestran en la Tabla 13, en donde por orden de mayor a menor riesgo se tiene Hg (RQ 110), Zn (RQ 62,4), Cu (RQ 56,9), Cd (RQ 14,9), Ni (RQ 9,8), As (RQ 9,0), Se (RQ 6,3) y Pb (RQ 5,8).

Tabla 12 Riesgo ecológico asociado a los metales pesados del suelo.

Metales pesados								
	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
PEC	0,5	0,01	32,0	0,005	12,0	20,0	0,5	83,0
suelo(mg/kg)								
PNEC	1	0,03	3	0,01	1	5	0,1	10
(mg/kg)								
RQ	0,5	0,33	10,7*	0,5	12,0*	4,0*	5,0*	8,3*

* Los valores en negrita son causantes de riesgo

Tabla 13 Riesgo ecológico asociado a los metales en el lodo.

Metales pesados								
	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
PEC	8,98	0,44	170,6	11,0	9,8	29,0	0,63	624,0
Lodo(mg/kg)								
PNEC	1	0,03	3	0,01	1	5	0,1	10
(mg/kg)								
RQ	9,0*	14,7*	56,9*	110*	9,8*	5,8*	6,3*	62,4*

* Los valores en negrita son causantes de riesgo

La determinación de riesgo en la aplicación de lodos al suelo la Tabla 14 señala que prácticamente la totalidad de los metales son causantes de riesgo ecológico, exceptuando a Arsénico (As) quien posee un valor de RQ (0,6) inferior a 1. Los metales causantes de mayor riesgo a la aplicación de lodos al suelo corresponden a Níquel (Ni) con un RQ 11,8 seguido muy cerca de Cobre (Cu) con un RQ 10,5. De acuerdo a lo anterior, es posible destacar como el metal cobre es siempre un factor de riesgo con valores bastante superiores respecto de los restantes metales en evaluación y coincide con ser la segunda mayor concentración de metal (kg/Ton) estimada en el suelo.

Tabla 14 Riesgo ecológico asociado a metales en la aplicación de lodos al suelo (mg/kg).

Metales pesados	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
PEC	0,54	0,02	31,8	0,007	11,9	19,9	0,49	82,5
Concentración aplicación de lodo (mg/kg)								
PNEC (mg/kg)	1	0,03	3	0,01	1	5	0,1	10
RQ	0,6	1,8*	10,5*	1,2*	11,8*	3,9*	4,9*	8,2*

* Los valores en negrita son causantes de riesgo

Discusión

La evaluación de la respuesta ecotoxicológica del lodo mediante *Eisenia foetida* muestra la variabilidad en los resultados. El ensayo suelo-lodo-*Eisenia foetida*, no presento diferencias significativas ($P > 0,05$) según el análisis de test Tukey para la variable crecimiento, aun cuando existen concentraciones donde se aprecia un aumento en el porcentaje de crecimiento a los siete días, que luego disminuye bruscamente y que no posee relación con la evaluación a los 14 días. Con respecto a la mortalidad en *Eisenia* no se registró una evidente tendencia al aumento de las concentraciones, sólo en las concentraciones de 80 y 160 g lodo/ kg suelo se produjo un aumento en la mortalidad que luego varió, mostrando la independencia de las variables, por lo cual no se logró detectar efectos, lo que se traduce en que las lombrices no poseen la sensibilidad necesaria para estimar los cambios en el medio a las que fueron sometidas, ya que no se vio afectada por factores que pudiesen alterarlas, pues el pH registrado para todas las concentraciones se mantenía dentro del rango aceptable para la sobrevivencia de la especie entre pH 6 y pH 7 y las muestras contenían humedad(35%-45%) de acuerdo a lo establecido por INE & UAM (2005), por lo cual estas variables no pudiesen interferir en la detección de la toxicidad del lodo.

En esta misma prueba los resultados medidos para carbono orgánico, fósforo y nitrógeno, muestran que aumentan los valores de los 7 días a los 14 días, lo que da cuenta que la incorporación de lodo, aporta los nutrientes y que las lombrices de alguna manera van mezclando y

procesando las diferentes proporciones de suelo y lodo, por su papel como mejoradores de la calidad del suelo, ya sea en las condiciones físicas, descomposición de materia orgánica o incrementando la disponibilidad de nutrientes (USDA 1999). Sólo el fósforo disminuye a la concentración de 600 g lodo/ kg suelo. La cantidad de nitrógeno se mantiene dentro de un rango, lo que daría a entender que favorece la sobrevivencia de las lombrices, pues Burges & Raw (1971) han demostrado que las lombrices que se alimentan de dietas ricas en nitrógeno, crecen más y producen más capullos, aun así no hay relación directa con la concentración ni con disminución de la mortalidad.

De cierta manera los resultados de toxicidad nos indican que los lodos dispuestos no poseen efectos perjudiciales, pues no se aprecia la letalidad total en los organismos, solo se observa que concentraciones menores a 80 g lodo/ kg suelo, no presentarían un riesgo agudo.

La caracterización del riesgo en el lodo se analizó en base a la concentración de metales pesados que contiene, existiendo notorias diferencias cuando se compara con un suelo libre de lodo a partir de esto , el escenario de exposición calculado, constituye un valor que se encuentra dentro de los márgenes de aplicación. Sin embargo la estimación del riesgo ecológico para estas concentraciones (PEC) con respecto a los valores de la (PNEC) obtenidos de Jensen (2002), se determina que $(PEC/PNEC > 1)$ níquel (Ni) cobre (Cu), selenio (Se) y zinc (Zn) presentan riesgos los que coincidentemente son los mismos obtenidos en la estimación de riesgo del suelo, sumado a que todos los metales pesados asociados al lodo presentan riesgo. De acuerdo a lo anterior, se puede inferir que la cantidad de lodo aplicadas al suelo, es decir, 30 ton/ha, implica por una parte la cantidad de 15,4 kg lodo/ ton de suelo y las concentraciones de Zn (81,7 kg/ton) Cu (31,5 kg/ton) Pb (19,7 kg/ton) y Ni (11,8 kg/ton), siendo mayores respecto a los restantes metales que fluctúan entre los 0,01 kg/ ton a 0.06 kg/ton. Estas diferencias también pueden hacerse notar cuando se observa como varían los aportes de cada metal y microelementos respecto al suelo libre de lodo con el suelo que posee aplicación por un tiempo determinado (198 días).

La cantidad de lodos aplicados al suelo considerando el peor escenario de exposición que implica que todos los metales están disponibles, señala que existiría riesgo de efectos agudos, como se aprecia en los factores de RQ obtenidos, pudiendo inferir que la aplicación de lodos en suelos es causa de riesgo potencial debido a que las concentraciones estimadas en base a la tasa de aplicación de lodos, indicaron que los metales pesados contenidos son causantes de potenciales efectos tóxicos. Sin embargo el desarrollo de bioensayos en organismos indicadores no se obtuvo una relación directa de mortalidad de los organismos con el aumento de las dosis de lodo. Siendo

pertinente la realización de nuevas pruebas de toxicidad, con variados tipo de lodos para obtener una cantidad de datos que permitan establecer los diferentes niveles de efectos.

A manera de conclusiones se puede mencionar que: la respuesta ecotoxicológica con bioensayos en *Eisenia foetida*, no presento toxicidad para los lodos evaluados provenientes de la planta de tratamiento. La toxicidad a través del bioensayo suelo-lodo-*Eisenia foetida*, indica que no existe una relación entre concentración de lodo y efectos de crecimiento o mortalidad. Se determinó que en suelo del área de estudio, los factores de riesgo ecológico corresponde mayormente a cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se) y zinc (Zn). La estimación de riesgo ecológico asociado lodo señala que todos los metales son causantes de riesgo representados principalmente por mercurio (Hg) con un valor de RQ 110, seguido por zinc (Zn) con un RQ 62,4 y finalmente cobre (Cu) con un RQ 56,9. La evaluación de riesgo ecológico del lodo aplicado en el suelo del área de estudio analizado desde la concentración de metales, indica que solo arsénico (As) con un RQ 0,6 no presenta riesgo de toxicidad para el suelo.

Bibliografía

Acevedo, E., 2005 Valorización de Lodos Provenientes de Tratamiento de Aguas Servidas como Mejorador de Suelos Degradados. Universidad de Chile- SAG

Acosta G, E. Ramirez, & E. Gutierrez, 1995, Efecto de la Aplicación del Lodo Residual Municipal sobre Suelos y Plantas. Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela

Aguas Araucanía 2005 Plan De Aplicación De Lodos. Predio El Capricho, Los Sauces, Región De La Araucanía

Aravena, C.R., C. Valentín, M.C. Diez, M.C. De la Luz Mora & F. Gallardo, 1996; Aplicación de Lodos de Planta de Tratamiento de Celulosa: Efecto en Algunas Propiedades Físicas y Químicas de Suelos Volcánicos. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 7: 1-14

Burges A, & F. Raw, 1971. Biología del Suelo. Editorial Omega. Barcelona. 596 p.

Calow P. 1993. Handbook of Ecotoxicology. Blackwell Science Ltd. Sheffield, UK Vol. I. 478 P.

CIREN 2000, Estudio Agrológico, Descripción, Material y Método, Chile

CONAMA 2000 Reglamento para el Manejo de Lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Chile.

Conder J.M, R.P. Lanno & N.T. Basta 2001. Assessment of Metal Availability in Smelter Soil Using Earthworms and Chemical Extractions. *Journal of Environmental Quality*.30

Cuevas B., S. Seguel, Sch. Ellies, & F. Dörner, 2006 Efectos de las Enmiendas Orgánicas sobre las Propiedades Físicas del Suelo con especial referencias a la adición de Lodos Urbanos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 6: 1-12

EPA 1998 ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY Evaluation of Dredged Material III-III Proposed For Discharge in Waters of the U.S. – Testing Manual, Department of the Army US Army Corps of Engineers

EPA 2000 ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Proposed guidance on Cumulative risk assessment of pesticides chemicals that have a common mechanism of toxicity. Office of Programs. U.S: Environmental Protection Agency. Washington. D.C.

Fisher. E. A., F.T. Toth & S. Farkes. 2001. Diltamethin effects on volumen control, and water balance (Annelida. Lumbricidae). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 66: 269-276.

INE & UAM 2005 “Pruebas Biológicas para la Evaluación Ecotoxicológica de Sustancias Químicas”

Jensen J, & P. Folker-Hansen, 1995. Soil Quality Criteria for Selected Organic Compounds. *Arbejdsrapport nr. 47*, pp 1-156. Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet.

Jensen J, H.L. Kristensen, M.B. Pedersen, & J.J. Scott-Fordsmand, 1997. Soil Quality Criteria for Selected Compounds. *Arbejdsrapport nr. 83*, pp 134. Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet.

Janssen, R. L. Posthuma, R. Baerselman, H. Den Hollander, R. Van Veen, & A. Kabata-Pendías, 2005 Agricultural problems related to extensive trace metal contents of soil. in: Salomons, W. U. Forstner, & P. Maden, P. (Eds.). *Heavy metals, problems and solutions*. Berlin: Springer-Verlag,

Keddy C.J., J.C. M.A. Greene & Bonnell 1995. Review of Whole-Organism Bioassay: Soil, Freshwater Sediment, and Freshwater Assessment in Canada. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 30: 221-251.

Medina M & F. Encina, 2003 Incorporación de la Evaluación de Riesgo Ecológico en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental para ecosistemas acuáticos en Chile *Revista Ambiente y Desarrollo* de CIPMA .VOL. XIX / N° 3 y 4.

OECD. 2000. Guideline for Testing Chemicals. New Guideline. Earthworm Reproduction Test (*Eisenia Foetida/ Andrei*).

PNUMA/IPCS 1999 Evaluación de Riesgos Químicos. Producido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente, La Organización Internacional del Trabajo y la Organización Mundial de la Salud

RADA 2005 Mesa Técnica Sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas Región de la Araucanía

Robidoux P.Y., J. Hawari, S. Thiboutot, G. Ampleman & G.I. Sunahara, 2001. Chronic Toxicity of Octanohydro- 1,3,5, 7-Tetranitro- |1, 3, 5, 7- Tetrazocine (HMX) In Soil determined using the earthworm (*Eisenia andrei*). Environmental Pollution. 111

Scott-Fordsmand J.J., J. Jensen, M.B. Pedersen, & P. Folker-Hansen, 1995. Økotoksikologiske jordkvalitetskriterier. Projekt om jord og grundvand nr. 13, pp 46. Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet.

USDA 1999 Soils Quality Test Kit Guide .United State Department G Agricultura.

Van Gestel C.A.M., W.A. Van Dis, E.M. Breemen, & P.M. Sparenburg, 1988. Comparison of two methods for determining the viability of cocoons produced in earthworm toxicity experiments. Pedobiology. 32: 367-371.