

U N I V E R S I D A D D E C O N C E P C I O N

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Departamento Silvicultura

"RIEGO CON AGUAS SERVIDAS EN PLANTACIONES DE ESPECIES
FORESTALES DE RAPIDO CRECIMIENTO"



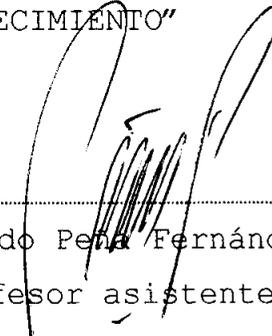
MEMORIA PARA OPTAR
AL TITULO DE
INGENIERO FORESTAL

CONCEPCION - CHILE

1998

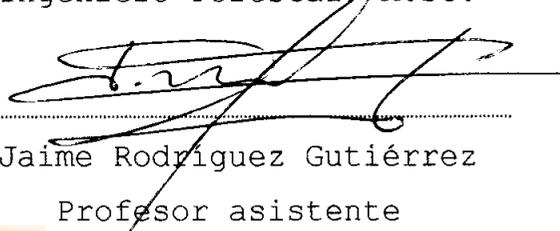
"RIEGO CON AGUAS SERVIDAS EN PLANTACIONES DE ESPECIES
FORESTALES DE RÁPIDO CRECIMIENTO"

Profesor Asesor



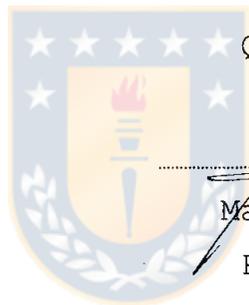
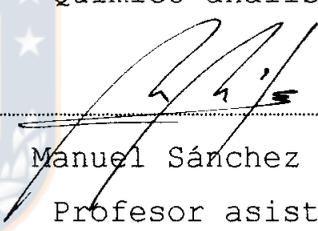
.....
Eduardo Peña Fernández
Profesor asistente;
Ingeniero Forestal; M.Sc.

Profesor Asesor



.....
Jaime Rodríguez Gutiérrez
Profesor asistente
Químico analista; Dr.

Director Departamento
Silvicultura



.....
Manuel Sánchez Olate
Profesor asistente
Ingeniero Forestal; Dr.

Decano Facultad de Ciencias
Forestales



.....
Fernando Drake Aranda
Profesor asociado
Ingeniero Forestal.

Calificación de la memoria de título:

Eduardo Peña Fernández: noventa y siete puntos.

Jaime Rodríguez Gutiérrez: noventa y siete puntos.



"Porque una profesión es la mejor herencia
que se puede recibir de la familia,
por ello entrego a ustedes este logro
como muestra de mi reconocimiento y cariño"

A MIS PADRES Y HERMANAS.

INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS	PAGINA
I	INTRODUCCION..... 1
	1.1 Antecedentes generales..... 1
II	RESULTADOS Y DISCUSION..... 3
	2.1 Situación actual de las aguas servidas en el mundo y en Chile..... 3
	2.2 Regiones donde se ha aplicado: especies consideradas..... 10
	2.3 Objetivo del riego con aguas servidas..... 14
	2.4 Estatus nutricional y elementos tóxicos de las aguas servidas..... 15
	2.4.1 Macronutrientes..... 17
	2.4.2 Materia orgánica 20
	2.4.3 Micronutrientes..... 20
	2.4.4 Salinidad..... 20
	2.4.5 pH..... 21
	2.4.6 Elementos tóxicos..... 21
	2.4.7 Características biológicas..... 22
	2.5 Requerimientos previos de tratamiento antes del riego..... 23
	2.6 Regulación consumo de agua y métodos de riego. 24
	2.7 Efectos sobre el árbol..... 28
	2.7.1 Crecimiento y calidad..... 28
	2.7.2 Sistema radicular..... 30
	2.7.3 Estatus nutricional..... 31

2.8 Efectos sobre el suelo.....	32
2.8.1 Nutrientes.....	32
2.8.2 Propiedades físicas y químicas.....	33
2.8.3 Descomposición de la materia orgánica.....	34
2.8.4 Presencia de patógenos humanos.....	35
2.9 Efectos sobre la fauna del suelo.....	36
2.10 Efectos sobre la biomasa del bosque.....	38
2.11 Aporte de nutrientes a los cursos y fuentes de agua.....	38
2.12 Efecto acumulativo de nutrimento y otros compuestos en las napas subterráneas.....	40
2.13 Beneficios sociales, ambientales y económicos.....	41
2.14 Costos involucrados en el riego.....	44
2.15 Situación de Chile y específicamente en la octava región para el desarrollo de esta iniciativa.....	44
III CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES.....	48
IV RESUMEN.....	51
SUMMARY.....	52
V BIBLIOGRAFIA.....	53

INDICE DE TABLAS

TABLA N°	PAGINA
----------	--------

En el texto

1	Productividad de algunas especies de <i>Eucaliptus</i>	13
2	Composición de las aguas residuales domésticas.....	17



I INTRODUCCION

1.1 Antecedentes generales

Los asentamientos urbanos en su funcionamiento producen desechos de diferentes tipos, que normalmente traen como consecuencia la contaminación del ambiente. Es el caso de residuos sólidos que se acumulan en vertederos, aguas servidas conducidas a través del alcantarillado y gases en conjunto con material particulado que constituye el smog.

El camino regular que siguen las aguas servidas de una población comienza con la recolección en el sistema de alcantarillado, para luego recibir en el mejor de los casos un tratamiento de purificación antes de ser incorporadas a los cuerpos de agua naturales. La consecuencia de esta práctica es un enriquecimiento de las aguas con nutrientes, lo que finaliza con el proceso de eutroficación.

El tratamiento que necesitan las aguas servidas para no provocar cambios en el sistema acuífero que se incorporan, dista mucho de las prácticas actuales en los países del 3° mundo y en vías de desarrollo.

Por otra parte las formaciones boscosas requieren como elementos básicos para su desarrollo agua, nutrientes y energía solar, los cuales son transformados por el proceso de fotosíntesis en compuestos orgánicos útiles para la planta. Además se debe considerar que los suelos sobre los

cuales se desarrolla la actividad forestal son regularmente deficitarios en agua o nutrientes o en ambos a la vez. Por lo tanto se puede plantear una complementariedad entre el desarrollo forestal y la problemática que involucran las aguas residuales.

Desde hace algún tiempo en algunos países (Ej: Australia) se ha implantado la práctica de riego de plantaciones con aguas servidas de origen doméstico, aprovechando los nutrientes que estas contienen para incrementar el rendimiento de los cultivos forestales y solucionar el problema de polución de los cuerpos de agua en función de la obtención de un beneficio.

Respecto a la situación regional de las aguas residuales el centro de investigación EULA en el año 1993 realizó un estudio sobre el saneamiento de la cuenca hidrográfica del Biobío, donde se pudo establecer la independencia de las aguas servidas en relación con las aguas industriales dentro del sistema de alcantarillado. Lo que nos aporta una condición básica para la aplicación de esta práctica de riego.

El presente trabajo de investigación bibliográfica estará dirigido a revisar la experiencia de años acumulada en el extranjero sobre el riego de plantaciones forestales con aguas servidas, para luego analizar la posibilidad de su aplicación en la realidad chilena y en particular la VIII región.

II RESULTADOS Y DISCUSION

2.1 Situación actual de las aguas servidas en el mundo y en Chile

Una definición de aguas servidas es entregada por Moreno y Lucke (1991): "Como consecuencia del uso del agua potable en las casas, se incorporan a esta una serie de sustancias y se genera lo que llamamos aguas residuales urbanas o domésticas. Estas sustancias provocan una contaminación de tipo físico, químico y biológico".

La composición de este tipo de agua en su estado crudo, cuando tiene un origen doméstico, es de carácter estándar y comparable entre los países (detalles de la composición en el punto 4). Pero existe una excepción respecto al contenido de coliformes fecales, siendo mayor en las aguas servidas de países en vías de desarrollo (Yáñez, 1993).

Como todo residuo generado por la actividad humana debe ser depositado en algún lugar, tomando en cuenta para ello las normativas ambientales del estado para hacer valer el derecho de vivir en un ambiente libre de contaminación. En consecuencia de esta necesidad, surgen los tratamientos de aguas servidas con el fin de reducir el impacto de las descargas de las mismas en los cursos de aguas naturales.

El sistema de tratamiento de agua servida lineal se caracteriza por recolectar esta agua para someterla a algún tipo de tratamiento (3 grados) y luego vertir el efluente

tratado a los cursos de agua (Hecke y Blanco, 1997). Es importante señalar que el alto costo de construcción y mantención del sistema completo sólo es posible de implementar en países industrializados. A continuación se detallan las etapas del tratamiento (Kresse y Birrer, 1997):

a) Tratamiento primario. Su función es retener y remover materias gruesas, arenas, grasas y aceites, y en general partículas sólidas más pesadas suspendidas en el agua.

b) Tratamiento secundario o biológico. Este proceso se basa en una población mixta de microorganismos que utiliza como nutrientes sustancias que contaminan el agua, siendo el principal objetivo el abatimiento de la carga orgánica, microbiológica y fomentar el proceso de nitrificación.

c) Tratamiento terciario. En este se incluyen todos los métodos de tratamiento adicionales a la etapa biológica, como son: eliminación de nitrógeno, filtración, desinfección, entre otros. Al finalizar la etapa se encuentra un efluente con un reducido riesgo potencial de ser causante de eutroficación (Myers et al., 1995b). La desventaja de este tratamiento es el incremento en el costo por la salida de sólidos y sales como resultado de los procesos químicos, además la reducción de su valor como una fuente de crecimiento para cultivos de árboles o agrícolas (Myers et al., 1995b).

Revisando la situación continental León (1995, citado por Barba y Cárcamo, 1997) afirma que en América latina y el Caribe el 49% de la región cuenta con servicio de alcantarillado y menos del 10% del volumen colectado recibe algún tipo de tratamiento antes de ser descargadas en cuerpos de aguas superficiales. Cabe destacar que el sistema de tratamiento imperante en la región son las lagunas de estabilización, que no se caracterizan por su eficiencia en la extracción de nutrientes desde el efluente.

Dentro de tal contexto Chile posee una red de alcantarillado que conecta al 89% de la población urbana y la depuración de aguas residuales alcanza a un 14% del volumen recolectado. Sin embargo el tratamiento de aguas servidas se encuentra en un estado incipiente de desarrollo, teniendo una proyección de 68% para el año 2000 y un 100% para el 2005 (CEPIS/OPS, 1997 citado por Barba y Cárcamo, 1997).

A pesar de los tratamientos recibidos, el efluente todavía contiene niveles de sustancias contaminantes que provocarán un desequilibrio en la capacidad de autopurificación de los sistemas acuáticos receptores (mayor detalle punto 11). Así, las aguas residuales no han sido usualmente reutilizadas para recuperar recursos escasos como son el agua y los nutrientes.

Ante tal problema, se plantea la necesidad de buscar un sistema de tratamiento más eficiente que las lagunas de

estabilización actualmente usadas en América latina y que sus costos de construcción sean acordes con el nivel de desarrollo económico de los países.

Como alternativa de tratamiento que satisfaga tales exigencias está el sistema de tratamiento circular, ellos tienen un enfoque de recuperación y reutilización de las aguas servidas. Los sistemas circulares parten del principio ecológico que todo tiene que estar en algún lugar y que los contaminantes son recursos que se encuentran fuera de lugar (Hecke y Blanco, 1997), en consecuencia sólo existe el concepto de lugares de reutilización donde el efluente recuperado libre de patógenos y rico en fitonutrientes básicos (nitrógeno, fósforo y potasio) es usado para el riego y la fertilización de plantas, y el agua purificada queda disponible para recargar las napas.

Bajo el principio recién expuesto se plantean los siguientes sistemas de tratamientos alternativos en orden de magnitud decreciente:

a) Sistema Sheaffer (Hecke y Blanco, 1997). Consiste básicamente en una aeración prolongada en celdas profundas y reutilización del efluente en agricultura o áreas verdes, bajo condiciones controladas.

Por lo tanto el riego constituye un método alternativo de purificación de los efluentes que minimiza la posibilidad de contaminación, como los efluentes percolan a través de varias capas del suelo los

patógenos se ven destruidos por reacciones químicas del suelo o por los organismos del mismo, mientras que los nutrientes son removidos por reacciones químicas o biológicas (Barton and Dyck, 1983).

En un sistema Sheaffer las aguas crudas son sometidas a un pretratamiento e incorporadas a tranques. De esta manera se dispone de las aguas pretratadas para el riego de un cultivo en forma controlada, entregando agua y nutrientes de acuerdo a la capacidad de absorción de nutrientes del sistema planta/suelo.

Este tipo de sistema de tratamiento de aguas servidas presenta una alta compatibilidad para el riego de plantaciones, aquí no se presenta el conflicto de la propiedad del agua tratada para su reutilización. En el caso de Chile las empresas sanitarias tienen la propiedad de las aguas servidas desde su recolección hasta que son descargadas en un cuerpo de agua natural¹, así ante un eventual reuso de efluentes la empresa sanitaria se debe hacer parte.

El sistema completo posee 6 componentes básicos:

- Recolección y transporte (alcantarillado).
- Pretratamiento con estabilización de lodos, disminuyendo también el nivel de DBO y coliformes fecales.

¹ Arévalo, Sergio. 1998. Comunicación personal con el Director del Departamento De Ingeniería. ESSBIO. Concepción.

- Almacenamiento de aguas pretratadas hasta su aplicación en terreno, una desinfección opcional a la salida de las aguas dependerá del cultivo a regar.
- Riego tecnificado y controlado.
- El cultivo que provee el filtro verde para el reciclaje de nutrientes.
- Drenaje de las aguas y realimentación de acuíferos.

Las principales ventajas del sistema son: bajo costo de construcción y mantención, no depende de equipos electromecánicos sofisticados, mantención sencilla, seguridad y estabilidad del proceso, excelente seguridad sanitaria y ambiental, manejo de sólidos y residuos al mínimo, reutilización de aguas, aplicable a proyectos de tamaños variables (probado con éxito entre 100 y 500.000 eq hab).

El interés de presentar y discutir este sistema radica en los excelentes resultados que se han obtenidos con estos sistemas, sencillos y económicos, bajo condiciones climáticas con menor necesidad de riego que las predominantes en la mayor parte del país (excepto localidades de las regiones XI XII y en la alta cordillera, lo que permite pronosticar un gran potencial de aplicación en Chile (Hecke y Blanco, 1997).

- b) Filtros de suelo con vegetación palustre. Este proceso se basa en la capacidad del suelo de filtrar agua y sustentar procesos naturales de degradación biológica en

él, sin necesidad de usar equipos mecanizados, energía o mayores controles de proceso.

El tratamiento con biofiltro como mecanismo de purificación está orientado a la eliminación de sólidos no sedimentables y los compuestos orgánicos disueltos, además de una reducción de los coliformes, es decir, es una combinación de tratamiento secundario y terciario. Respecto al componente vegetal del sistema, se ha comprobado que la actividad bacteriana en el filtro depende significativamente de la vegetación presente (Vogdt et al., 1997).

Debido a la capacidad de la planta de tratamiento, entre 10 a 1.000 habitantes equivalentes, representa una alternativa apropiada y eficiente de depuración de aguas servidas en el caso de casas individuales, escuelas o poblaciones rurales que no cuentan con sistema de alcantarillado (Vogdt et al., 1997).

- c) Reuso de aguas servidas a escala doméstica. Smith and Bond, 1995 en Canberra, Australia desarrollaron un proyecto de investigación que apuntó a un tratamiento de aguas servidas de carácter residencial. El sistema consistía en la recolección de las aguas servidas de un condominio para ser tratadas, luego el efluente se desinfecta y almacena en estanques para su posterior utilización como agua para riego de jardines y descargas de inodoro.

2.2 Regiones donde se ha aplicado: especies consideradas

En EE.UU. y Europa desde el siglo XIX se conocen las aplicaciones de riego con agua servida a diferentes cultivos, pero poseían muchos inconvenientes debido que no recibían ningún tipo de tratamiento entre los que se cuentan: flujo permanente de agua servida de acuerdo a la oferta de la alcantarilla, no existía la tecnología para oxigenar el agua y descomponer la materia orgánica eliminando los olores desagradables (Hecke y Blanco, 1997).

En la década de 1960 en EE.UU. se comienza a buscar soluciones integrales al problema de disposición de las aguas servidas por la necesidad de proteger el ambiente, entonces se procedió a aplicar el concepto de riego con aguas servidas pero se incorporó un pretratamiento al efluente antes de ser distribuido y se construyeron tranques, para almacenamiento en los períodos que no era necesario regar. De esta forma se solucionaron los antiguos problemas y se incrementó considerablemente la productividad de los cultivos principalmente agrícolas (cereales y forraje).

Un punto importante de resolver en la aplicación de riego con aguas servidas es la elección del tipo de cultivo, sobre el cual recaerá la responsabilidad de extraer los nutrientes presentes en el efluente y que no contaminen los ríos y aguas subterráneas.

Entre las características de mayor relevancia que llevan a elegir un cultivo de tipo forestal sobre uno agrícola están las siguientes:

- a) El tamaño de las plantaciones forestales de rápido crecimiento es mayor, tanto en superficie como en los individuos, y por esto tienen tasas de consumo de agua y nutrientes más altas (Myers et al., 1995b).
- b) Los períodos de crecimiento de los árboles durante el año son mayores, además son sistemas que se establecen a largo plazo (15-20 años) (Myers et al., 1995b). Además los porcentajes de crecimiento son mayores en plantaciones forestales que en cultivos agrícolas (Comer et al., 1983, Stewart and Flinn 1984, Stewart 1988 citado por Myers et al., 1995a).
- c) Se reduce el riesgo que agentes contaminantes (patógenos) puedan llegar a la población por el consumo de productos no comestibles. Además el acceso del público dentro del área regada puede ser controlado, resguardo que no es posible de realizar cuando los efluentes son descargados a los cuerpos de agua (Barton and Dyck, 1983).

Nueva Zelandia ha desarrollado riego de plantaciones forestales de *Pinus radiata* desde la década de 1980, basándose en que el 80% de las aguas servidas de la nación son tratadas y la especie considerada es de rápido crecimiento. El propósito de tales tratamientos es acelerar el proceso natural de purificación del agua removiendo

sólidos y reduciendo la carga de polución; a pesar de esto, los efluentes tratados todavía contienen nitrógeno y fósforo que pueden estimular el crecimiento de algas (Barton and Dyck, 1983).

En una experiencia de terreno en Australia se comprobó que plantaciones de *Eucaliptus grandis* y *Eucaliptus saligna* bajo condiciones ideales de sitio y precipitación, tendrían un rendimiento muy similar a aquellas desarrolladas bajo riego con aguas servidas (Stewart, 1988 citado por Manning and Kirkman, 1993). Lo anterior justifica la aplicación del riego en busca de aumentar el crecimiento de la plantación.

En las regiones áridas del oeste de EE.UU, existe un ejemplo donde el efluente municipal ha sido usado para regar plantaciones forestales, el agua subterránea de este sistema proporciona una porción del suministro de agua potable del área (Barton and Dyck, 1983).

En Australia se ha elaborado un registro de la productividad de diferentes especies de *Eucaliptus sp* referido a tratamientos aplicados como riego y fertilización, en la tabla 1 encontramos una recolección de ellos, donde se pueden apreciar diferencias de productividad para algunas especies y la conveniencia de la aplicación de ciertos tratamientos.

Tabla 1. Productividad de algunas especies de *Eucaliptus*.

Especie	Tratamiento	Productividad (m ³ /ha/año)	Referencia
<i>E. globulus</i>	Sin riego	20-30	Shea & Bartle (1988)
<i>E. globulus</i>	Fertilizado	20-30	Turnbull et al. (1988)
<i>E. camandulensis</i>	Regado	8-32	Stewart (1988)
<i>E. gomphocephala</i>	Regado	21-44	Stewart (1988)
<i>E. grandis</i>	Regado	21-48	Stewart (1988)
<i>E. grandis</i>	Precipitaciones	8,4-10	Borough et al. (1978)
<i>E. saligna</i>	Regado	34	Stewart (1988)
<i>E. nitens</i>	fertilizado	45	Anon (1990)

Fuente: Manning and Kirkman, 1993.

En el último tiempo el centro de investigación australiano CSIRO ha llevado a cabo un proyecto en el área de Wagga-Wagga, desde 1991 a 1996. El objetivo principal de este estudio fue desarrollar una guía de consulta para el diseño y manejo de las plantaciones forestales regadas con efluentes, en respuesta a la creciente práctica de este sistema por los particulares que en los últimos 5-10 años han triplicado la superficie bajo riego (1500 ha).

Un punto del proyecto se enfocó en una prueba de especies de rápido crecimiento nativas y exóticas, buenos desempeños fueron alcanzados por *Eucaliptus grandis* y *Pinus radiata*. Pero aunque eucaliptus a los 2 años es 4 veces más grandes que los pinos, estos últimos eventualmente absorben más nutrientes que los eucaliptus (Myers, 1993).

El director del proyecto, Myers en 1994, plantea lo siguiente: "las plantaciones no son por ningún motivo la respuesta universal a la interrogante de tratamiento de terreno de recuperación de aguas, aunque en ciertas circunstancias ellas son muy útiles". Así una planificación errada de la opción terrestre puede causar un problema enorme de contaminación de las aguas subterráneas por la lixiviación de nitrato, esto se refleja de manera precisa en la siguiente afirmación " Las algas en los ríos es un problema con una duración de meses. Pero si usted satura los niveles de agua en el suelo se habla de centenares de años, así el riesgo potencial es a largo plazo" (Myers, 1994).

2.3 Objetivo del riego con aguas servidas

En consideración al problema ambiental que plantean las descargas de aguas servidas y la necesidad de contar con sistemas de tratamientos eficientes, sin que dejen de ser viables económicamente se presenta como una alternativa el riego con aguas servidas.

Esta alternativa contempla el reciclamiento de aguas contaminadas a través de su aplicación a sistemas suelo/planta para aumentar la calidad del efluente minimizando el riesgo de romper el equilibrio de auto - depuración de los cuerpos de agua.

Manning and Kirkman (1993) establecen las siguientes razones para utilizar las aguas residuales en el riego:

- a) La mayor parte de los efluentes residuales sólo poseen aguas de uso doméstico.
- b) Los altos niveles de extracción de fósforo que pueden realizar las plantas no pueden ser igualados con las técnicas actuales bacteriológicas ni fisicoquímicas.
- c) Los productos del bosque no son comestibles, esto reduce la severidad de los criterios de salud pública para la evaluación del agua residual usada en agricultura, disminuyendo así el tratamiento del agua servida a un grado secundario.
- d) Los suelos bien drenados que son apropiados para el cultivo forestal, tienen con frecuencia deficiencia nutricional.

Pero el objetivo principal del riego es "el aprovechamiento económico del uso de agua y de nutrientes produciendo productos agrícolas y forestales de interés comercial" (Hecke y Blanco, 1997).

2.4 Estatus nutricional y elementos tóxicos de las aguas servidas

En general las aguas residuales domésticas se caracterizan por tener una variación en los caudales y una uniformidad relativamente alta (Vogdt et al., 1997), salvo ciertas diferencias en el contenido de coliformes según el nivel de desarrollo económico del país.

Algunas características importantes de evaluar son (Moreno y Lucke, 1991):

- Demanda química de oxígeno(DQO). Mide el oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica contenida en el agua.
- Demanda bioquímica de oxígeno(DBO₅). Representa la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar biológicamente la materia orgánica contenida en una muestra de agua durante 5 días a 20°C.
- Coliformes totales, fecales y parásitos. Son especies no patógenas usadas como índice de la presencia de bacterias patógenas.
- Nutrientes. Son medidos el nitrógeno y el fósforo por ser los más abundantes en el agua y por su alto grado de contaminación a los cuerpos de agua.

En general cuanto mayor es el consumo de agua por habitante menor es la carga del agua residual, así será posible encontrar un DQO menor a 400mg/l y un DBO₅ menor a 200mg/l.

En la tabla 2 se entrega una composición típica de las aguas residuales urbanas.

Tabla 2. Composición de las aguas residuales domésticas.

COMPONENTE (MG/L)	INTERVALO TÍPICO
Sólidos totales	350 - 1.200
Sólidos en suspensión	100 - 350
Nitrógeno total	20 - 85
Fósforo total	4 - 15
Oxígeno disuelto	1,0 - 3,0
pH	6 - 9
Coliformes totales(colonias/100ml)	10^6 - 10^9

Fuente: Moreno y Lucke (1991).

Pero el diseño de plantaciones forestales regadas con efluentes de aguas servidas requiere tomar en consideración el carácter particular de los efluentes y por lo tanto su monitoreo se vuelve esencial.

2.4.1 Macronutrientes. En esta categoría existen 2 elementos que son importantes de estudiar debido a su aporte en el crecimiento de los árboles y la contaminación de las fuentes agua.

Nitrógeno: Para un efluente con tratamiento secundario el contenido de nitrógeno varía de 10 a 30 mg/l (Myers et al., 1997). La demanda de este elemento variará según los estados de desarrollo de la plantación y el manejo, esto queda demostrado con los resultados obtenidos por Myers et al., 1995b en Wagga Wagga donde "una plantación en etapa de rápida expansión extrae de 120 a 150 kg/ha/año, para después del cierre de dosel bajar a 50 kg/ha/año".

El nitrógeno se presentará en una variedad de formas químicas, como por ejemplo nitrógeno orgánico, amonio, nitrato y nitrito, las proporciones dependerán de los tratamientos y pH del efluente. Generalmente un 40% corresponde a la forma orgánica, del remanente, la mayor proporción se divide equitativamente entre amonio y nitrato, mientras la forma de nitrito aparece en concentraciones traza.

Las distintas formas del nitrógeno pueden sufrir transformaciones y estar afectas a pérdidas durante los procesos. Una vez que el efluente se puso en contacto con el suelo comienza la mineralización, la cual convierte algo de nitrógeno orgánico y amonio a nitrato, su cuantía depende de la temperatura y humedad del suelo (Myers et al., 1995b); por lo tanto el riego produce un importante incremento en la tasa de mineralización del nitrógeno orgánico presente en el suelo.

La volatilización del amonio es otra de las vías de pérdida del nitrógeno (paso de amonio a nitrógeno atmosférico) que puede ser de consideración en el caso que el pH del efluente sea relativamente alto. La denitrificación (conversión de nitrato a nitrógeno atmosférico u óxido de nitrógeno) puede ser una fuente de liberación importante desde suelo mojado, pero cuando las condiciones de humedad son altas la probabilidad de lixiviar nitrato en un suelo muy permeable son importantes.

Fósforo: Su contenido en aguas servidas está normalmente entre 4 y 15 mg/l, presentando sólo 2 formas una orgánica y otra inorgánica (Moreno y Lucke, 1991). El fosfato inorgánico que es la forma disponible para las plantas puede ser absorbido por estas o retenido por el suelo químicamente, en espera que procesos edáficos conviertan el fosfato orgánico a la forma disponible.

Los árboles extraen mucho menos fósforo en relación con el nitrógeno, Myers et al., 1995b encontró un valor promedio de extracción de 12 kg/ha/año.

A pesar de que la concentración de fósforo en el efluente también es baja la cantidad agregada por riego excederá la demanda. Normalmente esto no causará lixiviación, excepto en suelos arenosos que tienen bajo poder de retención de fósforo. En suelos con cantidades moderadas de arcilla tienen una gran capacidad de retener el fósforo agregado, pero también existe la posibilidad de saturación seguida de lixiviación del fósforo a aguas subterráneas (Myers et al., 1995b).

Un riesgo mucho más inmediato puede venir desde la erosión superficial por un sobre-riego con efluentes ricos en fósforos, el nutriente será lavado hacia cursos de agua (Myers et al., 1995b). También debe ser considerada la posibilidad de provocar deficiencias de otros elementos debido a elevados niveles fósforo.

2.4.2 Materia orgánica. Se encuentra en el efluente en forma disuelta, suspendida y en coloides. Los niveles pueden ser determinados en forma indirecta por parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) (Yáñez, 1993), valores usuales para efluentes con tratamiento secundario son 10 - 80 mg/l en DBO₅ y 30 - 160 mg/l para DQO.

2.4.3 Micronutrientes. Sus concentraciones normalmente son bajas, pero un problema potencial en las plantaciones regadas con efluente es que estos no se encuentren disponibles en los balances adecuados para estimular el crecimiento de los árboles en conjunto con la abundancia de agua, nitrógeno y fósforo.

2.4.4 Salinidad. El uso doméstico de las aguas produce un incremento del contenido de sales el que suele estar entre 150 - 400 mg/l (Ramos, 1997). Este aumento no se altera con la depuración y esto hace que las aguas residuales puedan presentar problemas de salinidad.

La salinidad del suelo viene dada entonces por el contenido de sales del efluente y deben ser almacenados donde ellos sean menos nocivos para el árbol, suelo y agua subterránea; además la acumulación de sales en la zona radicular debe ser prevenida porque a altos niveles de sal, los árboles reducen el crecimiento e incluso pueden llegar a morir. Es de suma importancia considerar que el suelo no es un almacén infinito para las sales (Myers et al., 1995b).

2.4.5 pH. Efluentes domésticos con tratamientos secundarios son usualmente algo alcalinos, con un pH aproximado de 8. Un rango óptimo de pH para prevenir efectos adversos en la disponibilidad de nutrientes es de 6,5 a 8,5 (Myers et al., 1995b).

2.4.6 Elementos tóxicos. Según una definición de Winkler, 1998 "Los venenos verdaderos son aquellos que no pierden su toxicidad, y se incluyen en este grupo los metales pesados (ej: plomo, arsénico) y compuestos orgánicos persistentes", los organismos vivos pueden sobrevivir en su presencia a bajas concentraciones, a pesar de que su crecimiento se puede ver disminuido o inhibido.

Sodio: es un elemento fitotóxico que puede afectar a las plantas y el suelo, pero en suelos con altos niveles de calcio más el agua del riego se contrarresta el efecto perjudicial del sodio (Ramos, 1997).

Cloruro: altas concentraciones de este elemento en el agua de riego pueden traer problemas de toxicidad. En general aguas con un contenido de 140 mg/l no presentan problema, valores superiores pueden ocasionar graves problemas de toxicidad (Ramos, 1997). Este problema se puede solucionar manteniendo una adecuada lixiviación desde la zona radicular.

Metales pesados: en las aguas servidas estos son mayormente removidos en los procesos de tratamiento (hasta un nivel secundario), por lo que su contenido en las aguas

de riego es muy bajo y no causa problema (Myers et al., 1995b). En el caso que los efluentes recojan aguas industriales con altos contenidos de metales como boro, cobre, hierro, zinc el riego es preocupante (Moreno y Lucke, 1991).

2.4.7 Características biológicas. En el agua servida están presentes microorganismos tales como bacterias, virus y protozoos; la característica de patogenicidad de algunos de estos elementos es la principal restricción a su uso en la agricultura (Moreno y Lucke, 1991).

Al analizar la patogenicidad de los microorganismos es normal encontrar que entre la población de bacterias estén las responsables del cólera, tifus y disentería, de la misma manera los virus causantes de poliomielitis y hepatitis (Moreno y Lucke, 1991).

En el riego de plantaciones forestales el punto de cuidado esta en el personal que opera la faena de riego que toma contacto con el agua servida y se expone a virus y bacterias(Myers et al., 1995b). La práctica de retener el efluente tratado en piscinas de desinfección es común por un período de 10 o más días que reduce enormemente el riesgo, una vez en el suelo la mayoría de los virus y parásitos muere (Myers et al., 1995b); pero esta retención puede provocar el crecimiento de algas que acarrearán más de un problema en el riego (Ramos, 1997).

2.5 Requerimientos previos de tratamiento antes del riego

El grado de tratamiento de purificación que sea necesario de aplicar a un efluente de aguas servidas antes de ser utilizada para riego depende principalmente del estado en que esta sea recolectada, es decir, si viene cruda, con tratamiento primario y/o secundario. En esto además influye el grado de tecnología que la empresa sanitaria tenga en operaciones en sus plantas de tratamiento.

El nivel de purificación del punto de vista sanitario que debe tener el agua depende principalmente del tipo de área a regar, para lo cual existe una clasificación en tres categorías de uso citada por Yáñez (1993) y que se detalla a continuación:

Categoría A. Corresponde a riego de cultivos de: hortalizas que comúnmente se consumen crudas, campos deportivos y parques públicos. El grupo expuesto esta compuesto por trabajadores, consumidores y público. Para este caso se recomienda un tratamiento de lagunas de estabilización o equivalente que mantenga los nemátodos intestinales menor o igual a 1 huevo por litro y los coliformes fecales menor o igual a 1000/100ml.

Categoría B. Corresponde a riego de cultivos de cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles. El grupo expuesto lo constituyen los trabajadores y para este caso se recomienda un tratamiento de lagunas de estabilización con una retención de 8 a 10 días. No se establece ninguna

norma para coliformes fecales y en el caso de los nemátodos intestinales se conserva el límite anterior.

Categoría C. Corresponde a riego localizado de los cultivos de la categoría B, cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos. En este caso no son aplicables las limitaciones en las concentraciones de nemátodos y coliformes fecales y el tratamiento previo es dependiente de las exigencias de la tecnología de riego, requiriéndose por lo menos sedimentación primaria.

Como fue indicado en párrafos anteriores la práctica de retención de efluentes puede causar la proliferación de algas, esto provoca problemas en los dispositivos de riego obstruyendo filtros entre otros y además son responsables del desagradable olor a veces asociado al riego con efluentes (Myers et al., 1995b). Un procedimiento que entrega una solución satisfactoria a ambos problemas es la cloración y filtración del efluente a la salida del almacenaje, Ravina et al (1992 y 1995) citado por Ramos (1997) encontraron que con una cloración diaria, o cada 3 días, con 1 mg/l de cloro residual en combinación con un filtrado pudo mantener la operación adecuada de la mayoría de los emisores.

2.6 Regulación del consumo de agua y métodos de riego.

La primera etapa en el diseño de las plantaciones regadas es definir el área necesaria de regar para cubrir el constante flujo de efluente desde las plantas de tratamiento de aguas servidas. Esto depende de la

estimación de la capacidad de extracción de agua y nutrientes desde el efluente, cálculo que se basa en los balances periódicos entre evaporación y precipitación, área foliar de la especie en diversos estados de desarrollo y la proporción de precipitación que es perdida por intercepción y evaporación (Myers et al., 1995b).

Por lo tanto es importante tomar en cuenta los estados de desarrollo de la plantación para realizar una adecuada estimación del uso de agua de la misma. En la etapa de establecimiento la maleza que acompaña a la plantación realiza un gran aporte en la extracción de agua y nutrientes, al mismo tiempo la evaporación se ve favorecida por estar la mayor parte del terreno descubierto, mientras que a la edad del cierre de dosel la evaporación desde el suelo representa sólo el 5% del uso del agua.

En forma similar la intercepción se ve influenciada por el desarrollo de los árboles, particularmente del área foliar y la evaporación desde estas. Cuando la plantación logra la etapa de cierre de dosel la pérdida por intercepción será aproximadamente 20-30% en pino y 10-20% para eucaliptus (Myers et al., 1995b).

Al descuidar la carga de riego (proporción) puede ocurrir un sobre-riego o un riego deficitario. En el primer caso el excedente del efluente puede lixiviar a aguas subterráneas, causar erosión, reducir la productividad del suelo, traer problemas sanitarios al árbol al anegar las raíces y

aumenta el riesgo de desarraigamiento por fuertes vientos como resultado de un crecimiento superficial de raíces.

En el caso contrario también se reducen las tasas de crecimiento de los árboles, ocurren situaciones de estrés de agua y de sales lo que generalmente se acompaña de incremento en la susceptibilidad al ataque de insectos y enfermedades. Pero ante la necesidad de tener que elegir entre ambos la decisión se inclina por un riego deficitario, ya que la sobrevivencia, calidad de la madera y del punto de vista ambiental es mejor siempre que la salinidad se pueda mantener bajo control (Myers et al., 1995b).

Las plantaciones de rápido crecimiento pueden usar agua a tasas mayores de 8-10 mm/día en los períodos máximos de verano y en invierno puede ser tan bajo como 0,5-1,0 mm/día (Myers et al., 1995b). Esto delata el fuerte carácter estacional que tiene el consumo de agua, fenómeno que se da tanto al nivel de estaciones como también a lo largo del día.

Los principales sistemas de métodos usados son inundación por surcos, aspersión y goteo (Myers et al., 1995b). Cada sistema posee diferentes bondades ya sea en su costo o eficiencia, como también deficiencias que atentan contra la sustentabilidad del reuso de efluentes.

Surcos: es el método de aplicación más económico, pero la preparación del sitio que incluye nivelación elevan

abruptamente los costos del sistema. La distribución del efluente es desuniforme lo que tiene como consecuencia un serio riesgo de lixiviación que lo convierte en la mayor desventaja.

Aspersión: el riego puede ser proporcionado por aspersores de diferente capacidad, con ello se puede variar el volumen y presión. Este sistema aumenta la pérdida por evaporación, lo que obliga a incrementar la carga hidráulica y reduce la eficiencia de conversión del efluente en crecimiento productivo.

Dentro de las desventajas del riego por aspersión encontramos la probabilidad de dañar el follaje de árboles jóvenes debido a la acumulación de sales y el riesgo en la salud de las personas que habitan en las proximidades de la plantación, por la deriva que produce el viento del agua en suspensión que puede contener organismos patógenos.

Referido a los costos el sistema de aspersión es intensivo en el uso de mano de obra, instalación y por ende son de mayor inversión. Inspecciones visuales bastan para detectar cualquier problema de bloqueo.

Según sea la altura de instalación de los emisores se puede hacer necesario un estricto control de maleza para mantener la uniformidad en la distribución del agua, esto incrementa los gastos de operación. Además este sistema no es muy compatible con las actividades silviculturales, ya que es probable que resulte dañado.

Goteo: el objetivo de este sistema es minimizar las pérdidas por evaporación e incrementar la utilidad del efluente. En la parte monetaria es un sistema que esta muy próximo a los silvicultores debido a que sus equipos son simples y baratos, además presentan una alta compatibilidad con las actividades silvícolas y no es necesario un control de maleza para su operación.

La principal desventaja del riego por goteo es que necesitan una filtración y cloración más acuciosa, ya que problemas en las líneas de goteo son difíciles de detectar y localizar.

Existe una variante del sistema con goteo, son líneas enterradas con aberturas en la zona radicular, pero no ha sido probada en árboles sólo en cultivos agrícolas. Se presume que tal sistema provocaría una distribución desigual de las raíces, las que se encaminarían hacia la línea emisora.

2.7 Efectos sobre el árbol

2.7.1 Crecimiento y calidad. Estos parámetros son de suma importancia cuando el objetivo de la plantación es producir productos comerciales en volumen y cantidad. Myers et al. (1998), en sus ensayos de campo encontró que la tasa de crecimiento para *Pinus radiata* bajo todos los tratamientos fue mayor que aquellas reportadas para los mejores sitios en Nueva Zelandia y Australia. El IMA en el tratamiento que estuvo en balance con la demanda de la plantación en pino a los 5 años fue $24,8\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ y el ICA fue de $45,2\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$.

Cuando *Pinus radiata* y *Eucaliptus grandis* son regados con efluente o agua de pozo crecen rápidamente, así en los primeros años eucaliptus es más rápido y logra el cierre de dosel 2,5 años antes que pino. Sin embargo en el 4°-5° año el crecimiento de pino excedió al de eucaliptus y en la 5° temporada el volumen del fuste de pino fue mayor y la masa del follaje duplica al eucaliptus (Myers et al., 1998).

Stewart et al. (1990), estudiaron la respuesta del crecimiento de las plantaciones al ser regadas, trataron parcelas de clones de *Populus pobusta* y *Salix alba* donde el tratamiento se efectuó con agua pura y agua servida. El riego con agua residual produjo incrementos de 16 a 139% más de madera respecto al otro riego.

Pero se debe considerar que aunque el rápido crecimiento es altamente deseable porque maximiza la producción de volumen, puede reducir la calidad de la madera. Por ejemplo la madera para la industria del pulpaje puede reducir la longitud de su fibra, deformidades estructurales reducen severamente el valor para madera para fines estructurales (Myers et al., 1995b).

La carga de riego como factor del rápido crecimiento puede provocar perjuicios en la calidad del fuste y en la salud de la plantación. Es así que la plantación experimental de Wagga Wagga se encontró que el *Pinus radiata* fue más susceptible al daño de caída de árboles por viento, mientras *Eucaliptus grandis* sufrió deformaciones de fuste a causa de fracturas por el viento, cuando se produjo un

sobre-riego en la plantación los árboles se tornaron más propensos al daño que aquellos sub-regados. Una evaluación de la forma fustal en *Eucalyptus grandis* al 3° año mostró diferencias significativas en las deformaciones entre los tratamientos: alto 22%, medio 19% y bajo 15%; esto sugiere que el sub-riego es una estrategia de manejo preferible del punto de vista de estabilidad y calidad de los árboles (Myers et al., 1998).

2.7.2 Sistema radicular. Para que este sistema pueda desarrollar sin problemas sus funciones de anclaje y extracción de agua y nutrientes debe existir un espacio adecuado. Una profundidad de suelo al menos de 1,5 m a través del sitio es deseable, ya que así existe espacio saludable para la raíz ayude a alcanzar el desarrollo potencial del árbol y la resistencia al volteo por viento (Myers et al., 1995b).

El descuidar el balance entre la tasa de riego y la tasa de uso de agua de los árboles durante el riego puede ser causa de ciertos problemas. Al sobre regar la plantación llegando a saturar la zona radicular la hacen propensa a daño por hongos, además de un crecimiento superficial que hará a los árboles más inestables ante los vientos (Myers et al., 1995b).

Respecto al problema de acumulación de sodio en el suelo causado por el riego, Stewart (1985) determinó en uno de sus trabajos que las raíces actuaron como receptoras de

sodio acumulando entre el 32 y 45% del total retenido por el árbol.

2.7.3 Estatus nutricional. La acumulación de nitrógeno en el árbol, ya sea en la madera o follaje, es un factor importante al momento de calcular el aporte de este elemento al suelo por medio del riego. En los resultados de la plantación experimental de Wagga Wagga, Australia, no se presentó diferencia en la cantidad de nitrógeno almacenado en los árboles entre riego con agua pura y riego con efluente, lo que demostró que el abastecimiento de nitrógeno nativo desde las reservas del suelo fue suficiente para soportar el crecimiento de los árboles (Myers et al., 1998).

La cantidad de nutrientes acumulados por los árboles depende del estado de desarrollo y las prácticas silvícolas que se realicen, con el fin de favorecer los estados que tienen mayores tasas de uso de nutrientes. Prácticas como raleo, cortas parciales a intervalos regulares(3-5 años)ayudan a equiparar la tasa de carga de nutrientes con la tasa de acumulación de los árboles(Myers et al., 1995b).

En la relación de los micronutrientes con la absorción por parte de los árboles se presentan problemas graves en la condición sanitaria, debido exclusivamente a un desbalance en el suelo. La deficiencia de nutrientes es el desbalance más común, en el estudio Myers et al.(1995b) en Wagga, Australia, se reveló dos instancias de daño que tienen su origen en desordenes de los micronutrientes. En *Eucaliptus*

maculata una deficiencia de cobre se presume como responsable de la mala forma del fuste y del quiebre de ramas, mientras en *Pino radiata* el amarillamiento superior de la copa y la muerte inclinada se debe a deficiencias de magnesio asociadas con altas proporciones de potasio:magnesio.

La solución a este tipo de problemas de balance de los micronutrientes se puede solucionar con fertilizaciones adicionales, pero en casos como el de magnesio no es viable. Seleccionar aquellos individuos que presenten una mayor tolerancia a diferentes micronutrientes en concentraciones mayores a las normales es otra solución al problema, ya que esta característica es un fenómeno ligado fuertemente al control genético (Myers et al., 1998).

2.8 Efectos sobre el suelo

2.8.1 Nutrientes. Ellos presentan una dinámica entre suelo y planta que hace variar su concentración en la solución del suelo de acuerdo a las necesidades de la planta durante su desarrollo y la incorporación de cantidades adicionales de nutrientes por el efluente. Según resultados obtenidos por Myers et al. (1998) en su investigación más reciente, existe un incremento en la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la solución del suelo que es alcanzado luego del cierre de dosel, esto coincide con la desaparición de maleza bajo dosel y el incremento en la carga hidráulica del efluente. Sin embargo, en este mismo tiempo la cantidad de nitrógeno lixiviado como proporción de aquel agregado por el efluente a una plantación de *Pinus*

radiata fue un 50% en condiciones de sobre-riego y menor al 25% bajo riego equilibrado.

En contraste *Eucaliptus grandis* tuvo una lixiviación mayor por el estado más avanzado de la plantación, en ese mismo tiempo se repitió el método para medir lixiviación en pino, el tratamiento sobre-regado lixivio un 100% y en el riego equilibrado un 67% del nitrógeno total agregado por el efluente al suelo (Myers et al., 1998).

El siguiente nutriente de importancia agregado por el efluente es el fósforo, su dinámica en el suelo es descrita por Myers et al. (1998), quien indica que el incremento de fósforo disponible para la planta fue confinado principalmente a una profundidad de 0,5m, mientras la capacidad de retención de fósforo decreció en respuesta al fósforo adicionado. El 98% del fósforo total agregado en el efluente fue recuperado a 0,7m del suelo y en los árboles.

Una plantación operacional puede tener una combinación de edades para equiparar las diferentes capacidades de uso en cada nivel, ya que la demanda de agua y nutrientes es influida fuertemente por el estado de desarrollo. Para lograr esto se puede variar las tasas de aplicación y remover la biomasa total o parcial evitando que los nutrientes reingresen al suelo (Myers et al., 1995b).

2.8.2 Propiedades físicas y químicas. Entre estas características del suelo se da cierta dependencia debido a que variaciones en las propiedades químicas del suelo

pueden ocasionar cambios en las propiedades físicas. Esto se demuestra en el siguiente caso, un alto pH es el factor principal en el problema de acumulación de sodio, que causa el deterioro de la porosidad y permeabilidad del suelo, por lo que se vuelve más propenso a daños por erosión. También tiene influencia en la disponibilidad de nutrientes (Myers et al., 1995b).

Aunque los problemas con la acumulación de sodio en el suelo pueden ocurrir a una tasa de absorción de sodio de 6 (medida de la acumulación: tasa de absorción) el rango de 5-8 que se encuentra en las aguas servidas se considera seguro (Myers et al., 1995b).

Un alto nivel de salinidad en el suelo producto de una contaminación por la concentración de sales del efluente, puede ser eliminado de la zona radicular con una apropiada fracción de lavado. Pero en contraparte, puede ocurrir una lixiviación de nitrato si esta fracción no es bien dosificada (Myers et al., 1995b).

El aporte de materia orgánica que viene en el efluente ayuda a mantener la estructura del suelo, mejora la capacidad de retención del agua y previene la lixiviación de nutrientes (Myers et al., 1995b).

2.8.3 Descomposición de la materia orgánica. Se ha encontrado que bajo ciertas condiciones tales como reducido contenido de fósforo y nitrógeno (Berg y Staaf, 1987 citado por Yeates 1995) y bajos niveles de humedad son

responsables de la limitada descomposición de litera de bosque de coníferas; de esta forma la aplicación de efluentes puede ayudar a eliminar las limitaciones que enfrenta el proceso de descomposición (Yeates, 1995).

Myers et al. (1998), comprobaron que en *Eucaliptus grandis* la litera fue establecida al cierre de dosel, retornando al suelo una proporción significativa del nitrógeno extraído por la planta. Por ejemplo en 1994-95, la cantidad de nitrógeno retornado a la litera en el tratamiento con sobre-riego y riego balanceado fue de 124 kg/ha/año mucho mayor que en los tratamientos con riego bajo y riego con agua pura, el cual llega a un valor de 77 kg/ha/año.

2.8.4 Presencia de patógenos humanos. Cualquier programa de reuso debe ser muy cuidadoso en minimizar los riesgos de salud y ambiente. Se ha observado que el paso del agua servida a través del suelo reduce considerablemente el número de microorganismos transportado desde el exterior por el agua tratada (Campos et al., 1998).

Los factores que controlan la supervivencia y transporte de patógenos en el suelo y acuífero son el clima (temperatura, precipitación), tipo de suelo (textura, pH) y tipo de patógeno (Bales et al., 1991 citado por Campos et al., 1998). Pero los factores principales en la supervivencia son temperatura y humedad (Campos et al., 1998).

En una investigación de la Campos et al. (1998), se encontró que el suelo es capaz de remover coliformes

fecales, colifages F+ y CN13 y huevos de gusanos intestinales. Lo anterior se puede considerar como el último proceso de desinfección que tiene el agua servida antes de incorporarse a las napas, de esta forma el riesgo de contaminación es mínimo.

Este riesgo de contaminación ambiental y de las plantas puede ser eliminado al aplicar un determinado tipo de sistema de riego, es el caso del riego por goteo subterráneo probado en cultivos agrícolas que reduce el contacto de operarios, follaje y frutos con el agua (Oron, 1995 citado por Campos et al., 1998).

2.9 Efectos sobre la fauna del suelo

Es Particularmente importante estudiar la evolución de la fauna del suelo y la litera bajo aplicaciones de efluentes debido a que muchos microorganismos de la biota edáfica son responsables en alguna parte del proceso de descomposición y mineralización de compuestos orgánicos que se incorporen al suelo.

Lombriz de tierra: su número y masa es significativamente incrementado en áreas regadas con efluente, en este caso el incremento de humedad del suelo es el responsable de la respuesta positiva de la población de lombriz de tierra (Yeates, 1995).

Nemátodos: su población promedio en sitios tratados con efluentes es de 1,2-2,6 millones/m² hasta una profundidad

de 10 cm de suelo, hubo un significativo efecto en menos de un año sobre las 21 taxas presentes (Ycates, 1995).

Analizando las poblaciones de nemátodos según su hábito alimenticio tenemos que aquellos de tipo bacteriofagos vieron incrementar sus niveles mientras los nemátodos que tienen como sustrato a los hongos disminuyeron considerablemente (Ycates, 1995). Tal desenlace puede ser explicado por la variación que sufre el pH del suelo como efecto del riego, los hongos se desarrollan entre valores de pH 3-7 y las bacterias entre 7-11², ya que el efluente tiene un valor de pH entre un rango de 6,5-8,5.

El incremento de la humedad del suelo también es un factor de gran incidencia en el incremento de la población de nemátodos.

Artrópodos: varios de ellos están relacionados con procesos de mineralización de material desde la litera, Persson (1989) citado por Yeates (1995) concluyó de sus trabajos experimentales que los artrópodos de suelo son importantes en la mantención de la mineralización neta de nitrógeno bajo condiciones de sequía cuando la microflora del suelo esta fuertemente activa. Así con la aplicación de efluentes la importancia de estos organismos en los procesos de descomposición se ve reducida.

² Espósito, E. 1998. Curso de Bioremediación, Escuela de Verano. Laboratorio de Recursos Renovables. Universidad de Concepción.

2.10 Efectos sobre la biomasa del bosque

La reducida información que existe acerca de este tema es entregada por Stewart (1985) en un estudio de los efectos sobre la biomasa de una plantación regada con agua servida y fertilizada.

El investigador encontró que la fertilización con fósforo no afecta la biomasa total sobre el suelo en un período de 2 años, además el riego con agua servida (tasa de aplicación: 2286 mm en 29 meses) duplicó el incremento de la biomasa total. El componente más influenciado por el riego fue el follaje, incremento su peso a más de 50%, esto produjo un sustancial aumento en la fotosíntesis reflejado en el marcado incremento de la productividad del estado.

En cuanto a los porcentajes de participación el follaje aporta un 18-22% y las raíces, a una profundidad de 140 cm, contribuye con un 16-18% de la biomasa total.

El riego fue responsable de un incremento substancial de la biomasa, sin provocar efectos dañinos sobre los árboles. Este resultado reafirma la propuesta de regar las plantaciones de *Pinus radiata* con aguas servidas, con los beneficios de producción del bosque y la recuperación del agua servida (Stewart, 1985).

2.11 Aporte de nutrientes a los cursos y fuentes de agua

La capacidad que poseen los cuerpos de agua para mantener en forma natural su estado nativo se conoce como autopurificación y se debe a cantidades pequeñas de

microorganismos presentes en el agua, los que utilizan como alimento gran parte de la materia orgánica contaminante que llega al agua (Winkler, 1998).

El aumento de los nutrientes disueltos satura el ambiente acuático y reduce la cantidad de oxígeno disuelto, lo que paraliza los rápidos procesos aeróbicos de descomposición de materia orgánica. Luego ante la carencia de oxígeno disuelto sólo pueden continuar la degradación los procesos anaeróbicos, lentos y malolientes (Winkler, 1998). Entonces la disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua es el factor clave que limita la capacidad de autopurificación de una corriente de agua.

La consecuencia de la situación ya relatada es el proceso de eutroficación, que según Winkler (1998) es "la contaminación de un curso de agua por un fuerte crecimiento orgánico, estimulado por nutrientes inorgánicos". Los entes responsables son principalmente las algas, los cuales requieren para desarrollarse algunos elementos básicos que son anhídrido carbónico (CO_2), luz, agua y nutrientes (nitrógeno y fósforo son los más significativos). Como en la mayoría de los casos agua, luz y CO_2 están disponibles en grandes cantidades, Winkler (1998) afirma que "el crecimiento de las algas tiende a estar controlado entonces por la disponibilidad de nitrógeno y fósforo".

Tomando como referencia el panorama ya expuesto, es evidente que en el diseño de la plantación regada con efluente se deben tomar todas las medidas que apunten a

minimizar el flujo de nutrientes hacia los cuerpos de agua, como por ejemplo ajustar al máximo la tasa de riego con el uso de agua y nutrientes por parte de los árboles.

2.12 Efecto acumulativo de nutrientes y otros compuestos en las napas subterráneas

El incrementar la recarga de agua subterránea es una consecuencia inevitable de todo riego. Por otra parte que una fracción del agua de riego drene más allá de la zona radicular es esencial para evitar el riesgo de la salinidad (Myers et al., 1998).

En el estudio de Wagga Wagga, Australia, se midió la profundidad del drenaje desde la zona radicular. Cuando el riego fue ajustado al balance hídrico de la plantación durante los primeros 4 años, se encontró que el 25% del riego más la precipitación drenó más profundo que la zona radicular. Esto es superior 10 veces a la condición de un sitio no regado usado de control (Myers et al., 1998).

Ahora si analizamos una zona que fue saturada con riego por sobre su capacidad de extracción, el drenaje medido aumenta a 165% (Myers et al., 1998).

Los contaminantes más probables del agua subterránea son las sales y nitrato que provienen del efluente residual. Pero durante 4 años de riego balanceado con la demanda hídrica de la plantación no se detectó incremento en la salinidad del agua subterránea (Myers et al., 1998).

La información presentada muestra que existe un incremento potencial de la recarga de agua de las aguas subterráneas bajo plantaciones, aun cuando el riego fue administrado a la tasa de uso de agua de la plantación. El efecto contaminante (sales y nitrato) de esta recarga aún no se ha reflejado sobre el agua subterránea. Esto no indica que no exista, por ello se necesita más investigación.

2.13 Beneficios sociales, ambientales y económicos.

Para poder desarrollar un adecuado reuso del riego la plantación debe estar bastante lejos de zonas residenciales y áreas públicas para eliminar cualquier posibilidad de infección (Myers et al., 1995b).

Luego de consultas públicas, en Australia, sobre los distintos métodos alternativos de reutilización de efluentes de agua servida, la alternativa que presenta una mayor aceptación en lo inmediato es la instalación de sistemas de red separados para el abastecimiento de agua potable y el efluente tratado, que será usado a escala doméstica e industrial, jardines y agua para descarga de baños (Myers et al., 1995b). Esto queda reflejado en su puesta en marcha ya no en forma experimental sino que operativa en condominios de Sydney.

Durante la aplicación del riego con agua servida en Australia, se ha podido constatar la aceptación social que existe hacia esta práctica, ya que es considerada amigable con el ambiente. Pero se deben desarrollar actividades informativas dirigidas a la comunidad antes de la ejecución

del proyecto para poner en conocimiento de la construcción de tendidos de cañería que pueden afectar a parte de la comunidad (Manning and Kirkman, 1993).

Un efecto indirecto sobre el costo por agua potable y servicios sanitarios se puede producir al utilizar tratamientos de agua residuales que involucren un reuso productivo de los efluentes, ya que los gastos que realiza la empresa sanitaria en la depuración de las aguas residuales pueden provocar un alza aproximada de 50% en la tarifa de agua potable y servicios sanitarios³. De esta manera el gasto que realiza la empresa sanitaria para tratar las aguas se transforma en una inversión al reutilizar el agua servida en riego (Hecke y Blanco, 1997) y con ello reducir el alza de las tarifas.

Desde el punto de vista ambiental los sistemas de reutilización de aguas servidas son muy aconsejables en ecosistemas frágiles y pequeños, donde la disponibilidad de agua potable es limitada y la disposición de aguas servidas es un grave problema. También tiene gran potencial en las zonas áridas o semiáridas donde los recursos hídricos son limitados (Hecke y Blanco, 1997).

En lo económico la plantación forestal provee de una línea clásica de productos basados en la madera, en este caso el rápido crecimiento es esencial, dentro de los cuales se pueden encontrar madera aserrable, chapas, pulpa, chips, leña, etc. (Myers et al., 1995b).

Debido a que los nutrientes se concentran en las hojas, cuando los árboles son volcados estos se exportan al suelo y se filtran al agua subterránea (Myers, 1993). Esto hace posible innovar en la utilización de otras partes del árbol (follaje, corteza) ya que se dispone de toda la biomasa sobre la superficie del suelo, evitando la recirculación de nutrientes porque su abastecimiento está asegurado por el efluente (Myers et al., 1995b).

Una plantación bajo riego puede aportar productos no tradicionales, como por ejemplo:

- a) Uso de residuos de cosecha para la fabricación de briquetas (Allender, 1988 citado por Manning and Kirkman, 1993). Debido a que el riego mantiene constante los niveles de nutrientes, no se hace necesario incorporar los residuos al suelo.
- b) Obtención de extraíbles desde las hojas por procesos de destilación (Hillis, 1978 citado por Manning and Kirkman, 1993).
- c) Cultivos *Macrophomina* acuática en piletas de decantación para reducir las concentraciones de nitrógeno presente en el agua servida, la planta puede ser usada en: forraje, biomasa para celulosa - gas natural y enmiendas de suelo (Anderson citado por Manning and Kirkman, 1993).

³ Arévalo, Sergio. 1998. Comunicación personal con el Director del Departamento De Ingeniería. ESSBIO. Concepción.

2.14 Costos involucrados en el riego

Otro requerimiento que involucra un costo para el riego con aguas servidas es contar con un área destinada a la construcción de un tranque para almacenar el efluente durante los períodos húmedos donde es imposible regar (Myers et al., 1995b).

El construir y manejar el almacén del efluente asociado al sistema de riego frecuentemente hace de esta operación más cara que otros sistemas de tratamiento en centros urbanos grandes y en áreas con alta precipitación (Jayawardane, 1997)

La distancia desde el sitio propuesto para la plantación y la planta de tratamiento de aguas servidas que proveerá el efluente, y la elevación influyen la viabilidad económica del riego con efluente. El costo de cañerías y bombas pueden ser considerables (Myers et al., 1995b).

También es necesario considerar las zonas urbanas que se verán afectadas en el tendido de las tuberías para transportar el agua a los sitios de riego (Manning and Kirkman, 1993).

2.15 Situación de Chile y específicamente en la octava región para el desarrollo de esta iniciativa

La factibilidad que existe para desarrollar la alternativa de reutilizar aguas servidas pasa por una variedad de condiciones técnicas, económicas y sociales que es de importancia revisar más en detalle.

Agua servida. Una de las exigencias básicas que debe cumplir el agua para ser reusada en el riego de cultivos es ser exclusivamente doméstica, es decir que existan sistemas de recolección separados. El objetivo de la medida anterior es evitar la contaminación excesiva de metales pesados y otros productos tóxicos que son usados en grandes cantidades en las industrias. Esta condición se cumple dentro de la normativa sanitaria nacional⁴, como es corroborado por la investigación del centro EULA (1993) sobre el saneamiento de la cuenca hidrográfica del Bío-Bío.

En segundo lugar los actuales sistemas de tratamiento de aguas servidas en funcionamiento en el país son ineficientes y reducidos como lo indica Barba y Cárcamo (1997). Por lo que nuestros cuerpos de agua están recibiendo grandes aportes de nutrientes y coliformes fecales⁵, lo que reducirá su calidad como fuente de agua potable y ambientalmente se deteriora por la eutroficación.

En respuesta al problema de tratamiento y purificación de las aguas residuales domésticas la empresa sanitaria ha puesto en marcha un proyecto nacional, el cual deberá cubrir el 100% de las aguas recolectadas. Las inversiones del sector para el período 1998-2002, dentro del cual 693.3 millones US\$ (aprox 38%) están destinadas a obras de tratamiento de aguas servidas⁶. Tanto es así que en abril de 1998 se presentó el proyecto Chillán 2000, que pretende

⁴ Arévalo, Sergio. 1998. Comunicación personal con el Director del Departamento De Ingeniería. ESSBIO. Concepción.

⁵ Proyecto Chillán 2000, 1998. Antecedentes Del Proyecto. ESSBIO.

cubrir el 100% de las aguas recolectadas (90% de la población total) con un tratamiento secundario⁷.

Como resultado de la iniciativa anterior Chile tendrá una abundante oferta de efluentes con potencial productivo para ser reutilizados, pero si esto no es aprovechado la problemática ambiental y de salud tendrá una solución de forma más que de fondo.

Clima. En la mayor parte del país existen largos períodos sin precipitación y con altas tasas de evaporación que varían de 6-8 meses (primavera/verano), donde el límite sur sería marcado por el clima mediterráneo con estación seca prolongado (VIII región) (Donoso, 1993). Por lo que sería posible suplir las necesidades de agua y nutrientes durante estos períodos con riego de efluentes.

Suelos. Hay vastas extensiones de territorio, en el área factible de ser regada, en que su vegetación es dominada por especies indicadoras de suelos pobres, por ejemplo el abundante desarrollo de *Acacia caven*⁸. Por las características de la topografía las áreas más adecuadas para el riego serían aquellas planas y de lomajes suaves. Una situación representativa son las inmediaciones entre Chillán y Bulnes.

⁶ Diario "El Mercurio", cuerpo de economía y negocios del 19 de abril de 1998.

⁷ Proyecto Chillán 2000, 1998. Antecedentes Del Proyecto. ESBBIO.

⁸ Consulta cartografía de uso de suelo y cobertura vegetal.

Oportunidad. Esto se refiere a la época en que se desarrolla la investigación en relación con un problema determinado y parte de una solución que muy pronto comienza a implementarse. Desde este punto de vista el riego, de plantaciones forestales de rápido crecimiento, es un complemento a los tratamientos sanitarios que recibe el agua servida para dar una solución integral al problema de calidad de agua y eutroficación que enfrentan los cuerpos de agua en la actualidad.

Sociedad. La presión de la opinión social respecto a proyectos o actividades que involucren un impacto ambiental-social es fuerte y organizado. Por esto se hace necesario establecer un programa de difusión dentro de la alternativa de riego con aguas servidas que se oriente a difundir la problemática de contaminación, los beneficios e impactos del sistema.

A través del trabajo de difusión se pueden elaborar encuestas para conocer las preferencias de la población y tenerlas como referencia en la operación de la alternativa de riego con aguas servidas.

III CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES

1. El reuso de las aguas servidas domésticas en Chile es posible, ya que existe una creciente oferta de agua tratada para riego en los centros urbanos (proyección empresas sanitarias 1998-2008).
2. En localidades apartadas con niveles poblacionales medianos y bajos, se pueden implementar sistemas alternativos de purificación de aguas servidas complementados con el riego de cultivos, como por ejemplo el sistema Sheaffer y Biofiltro.
3. La elección de las especies forestales de rápido crecimiento por sobre los cultivos agrícolas, está fundada en la eficiencia que alcanza en la conversión de efluentes de aguas servidas tratadas (longevidad, capacidad de uso de agua y nutrientes).
4. No hay dificultades basadas en la presencia de metales pesados en las aguas servidas, debido a su origen doméstico están presentes en concentraciones muy bajas y son removidos en los primeros procesos de tratamiento de las aguas residuales.
5. Un elemento indispensable en el sistema de riego de plantaciones es contar con un sitio (tranque) de almacenamiento de agua, ya que el flujo de efluente

desde la planta de tratamiento se debe acomodar a las necesidades de la plantación.

6. El riego que se aplique a la plantación debe ser balanceado considerando todos los factores que determinen ingresos y pérdidas de agua, como por ejemplo la capacidad de extracción de agua del árbol, evaporación, estado de desarrollo de la plantación.
7. La modalidad más adecuada de riego en la actividad forestal es el sistema de goteo, debido a que presenta ventajas en la reducción de pérdidas de agua por evaporación, mínimo contacto del personal con el agua servida, los implementos son de menor costo y fácil mantención.
8. El riego tiene un efecto positivo sobre el crecimiento del árbol, ya sea en suelos deficitarios solamente de agua o en aquellos que necesitan aportes de agua y nutrientes, permitiendo alcanzar los niveles de crecimiento de los mejores sitios.
9. *Pinus radiata* es una especie de alta compatibilidad con la aplicación del sistema de riego a plantaciones, debido a sus respuestas en crecimiento, calidad acumulación de nutrientes y estado sanitario.
10. La producción de biomasa sobre el suelo se ve fuertemente aumentada por el riego con efluente, esto abre la posibilidad de usar la totalidad de esta biomasa

en la elaboración de productos comerciales. De esta manera elimina el reciclamiento de nutrientes en la plantación, ya que el riego asegura el abastecimiento de nutrientes.

11. En cuanto al problema de contaminación ambiental de las aguas servidas, el aporte de nutrientes desde los efluentes usados en el riego a cuerpos de agua puede ser minimizado evitando la eutroficación. El área de aguas subterráneas se puede afirmar que el riego incrementa la cantidad de agua, pero se desconoce el efecto contaminante del efluente por falta de investigación.
12. La sociedad puede obtener un mejor servicio sanitario, agua potable menos contaminada y mejores plantas de tratamiento de aguas servidas, al reutilizar los efluentes por un reducido aumento de las tarifas que deben pagar. Por otra parte, el hecho que el problema de contaminación involucre bienes comunes como son los cuerpos de agua hace indispensable incluir la opinión pública en el sistema de reutilización de efluentes.
13. Las condiciones para poner en práctica el riego con aguas servidas en plantaciones forestales de rápido crecimiento existen dentro del país. Esta práctica hará ganar productividad al cultivo forestal y la empresa sanitaria no deberá aumentar los niveles de tratamiento de las aguas servidas mas allá de un grado secundario.

IV RESUMEN

Esta tesis es una revisión de los antecedentes que permitan establecer las condiciones básicas para aplicar el riego de plantaciones con aguas servidas en Chile.

En el aspecto silvícola se encontró que el riego con aguas servidas puede tener una contribución importante en el desarrollo de los árboles para aquellos sitios deficientes en nutrientes y agua, claro que su aplicación debe estar bajo un adecuado diseño y manejo para evitar riegos potenciales que involucra esta práctica, tal como la contaminación de cuerpos de agua por la lixiviación de nitrato. Además, *Pinus radiata* resultó ser después de varias pruebas una de las especies más aptas para el establecimiento de plantaciones bajo riego con aguas servidas. Por otra parte, el riego con aguas residuales es beneficioso para la sociedad y el ambiente, ya que se mejora la calidad de vida de las personas y se reduce el peligro de causar eutroficación en los ríos por efluentes con tratamientos deficientes. Finalmente se puede afirmar que en Chile existen las condiciones para reutilizar el agua servida en el riego de plantaciones forestales.

SUMMARY

This thesis is a bibliographical review of the precedents that permit to establish the basic conditions to apply the plantation irrigation with wastewater in Chile.

In the aspect forestry was found that the irrigation with wastewater can have an important contribution in the development of the trees for those lacking sites in nutrients and water, clear that their application must be under an adequate design and managing to avoid potential irrigation's that involves this practice, such as the pollution of water bodies by the leaching of nitrate. Furthermore, *Pinus radiata* turned out to be after several tests one of most suitable specie for the plantations establishment under irrigation with wastewater. On the other side, the irrigation with residual waters is beneficial for the society and the environment, since is improved the quality of life of the persons and is reduced the risk of causing eutrofication in the rivers by effluents with lacking treatments. Finally it can be asserted that in Chile exist the conditions for re-use the wastewater in the irrigation of forest plantations.

V BIBLIOGRAFIA.

1. Barba, L., y Cárcamo, M. 1997. "Diagnostico y perspectivas de los sistemas de tratamiento y depuración de aguas servidas en la zona central de Chile". XII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental. Copiapó, Chile.
2. Barton, P. and Dyck, W. 1983. "Irrigating forests with sewage effluent". What's New in Forest Research. Forest Research Institute. Rotorua, New Zealand.
3. Campos, C., Gillerman, L., Oron, G. and Salgot, M. 1998. "The fate microorganisms in a soil-plant system irrigated with secondary wastewater under sub-surface and on-surface systems". Advanced wastewater treatment, recycling and reuse. Milano, Italia.
4. Donoso, C. 1993. "Bosques templados de Chile y Argentina". Segunda edición. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
5. EULA, 1993. "Saneamiento de la cuenca hidrográfica del río Bio-Bío y del área adyacente: estudio de prefactibilidad". Editado por Francesco Faranda, Oscar Parra. Concepción, Chile.

6. Hecke, F. y Blanco, S. 1997. "Tratamiento y reciclaje de aguas servidas orgánicas con células aeradas y aplicación al suelo (sistema Sheaffer)". XII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental. Copiapó, Chile.
7. Jayawardane, N. 1997. "Sewage effluent treatment and re-use for nutrient management, through the filter - technique". <http://www.clw.csiro.au/research/urban/sewage.htm>.
8. Kresse, J. y Birrer, S. 1997. "Bases para el desarrollo de un sistema experto en la simulación de plantas de tratamientos de aguas servidas". XII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental. Copiapó, Chile.
9. Manning, C. and Kirkman, H. 1993. "Irrigation of Eucalyptus plantations on deep sands using sewage effluent: a proposed alternative to ocean disposal near Perth, Western Australia". Australian Forestry 56: (1) 80-89.
10. Moreno, M. Y Lucke, J. 1991. "Monografía de la secretaría de estado para las políticas del agua y el medio ambiente: Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual del operador". Ministerio de obras públicas y transporte, secretaría general técnica, centro de publicaciones. Madrid, España.

11. Myers, B. 1993. "From toilet bowls to tinsel".
<http://www.its.csiro.au/news/mediarel/mr1993/index.htm>
12. Myers, B. 1994. "Effluent irrigation - pluses and pitfalls".<http://www.crb.for.csiro.au/publicat/onwood/onwood5.htm>
13. Myers, B., Theiveyanathan, N., O'Brien and Bond, W. 1995a. "Growth and Water use of effluent-irrigated *Eucalyptus grandis* and *Pinus radiata* plantations". *Tree Physiology* 16: 211-219.
14. Myers, B., Bond, W., Falkiner, R., O'Brien, N., Polgase, P., Smith, C and Theiveyanathan, S. 1995b. "Effluent irrigated plantations: design and management". CSIRO. Australia.
15. Myers, B., Benyon, R., Bond, W., Falkiner, R., O'Brien, N., Polgase, P., Smith, C., Snow, V. and Theiveyanathan, S. 1998. "Water, salt, nutrients and growth in effluent-irrigated plantations". WaterTECH Conference Australian Water and Wastewater Association. Brisbane, Australia.
16. Ramos, C. 1997. "El uso de aguas residuales en riegos localizados y en cultivos hidropónicos".

<http://www.ediho.es/horticom/fitech3/ponencia/text/cramos.html>.

17. Smith, C. and Bond, W.1995. "Domestic scale wastewater re-use". <http://www.crb.soils.csiro.au/research/urban/urban.htm>.
18. Stewart, H. 1985. "the effects of fertilisation and wastewater irrigation on the biomass and nutrient content of *Pinus radiata* D.Don. Australian Forestry 52: (3) 233-234.
19. Stewart, H., Hopmans, P. And Flinn, D. 1990."Acumulation on the tree and soil nutrients an irrigation-effluent municipal in Australia". Environmental Pollution 63: (2) 155-177.
20. Vogdt, J., Elmenhorst, A. y Cartstensen, A. 1997. "Filtros de suelo plantados con vegetación palustre - una alternativa económica para el tratamiento de aguas servidas domésticas en zonas rurales". XII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental. Copiapó, Chile.
21. Winkler, M. 1998. "Tratamiento biológico de aguas de desecho". Editorial Limusa S.A., Grupo Noriega editores. Ciudad de México, México.

22. Yáñez, F. 1993. "Lagunas de estabilización: teoría - diseño - evaluación y mantenimiento". Dirección de planificación empresa pública municipal de teléfonos, agua potable y alcantarillado de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
23. Yeates, G. 1995. "Effect of sewage effluent on soil fauna in a *Pinus radiata* plantation". Australian Journal Soils Research 33: 555-564.

