

**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES**



**EFFECTO ACUMULATIVO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS
PROVENIENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS
SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO ANDISOL**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera. Como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

CHRISTIAN ALEJANDRO NEUMANN HEISE

**TEMUCO – CHILE
2010**

**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES**



**EFFECTO ACUMULATIVO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS
PROVENIENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS
SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO ANDISOL**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera. Como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

CHRISTIAN ALEJANDRO NEUMANN HEISE

PROFESOR GUIA: JORGE BARAONA VENEGAS

TEMUCO – CHILE
2010

**EFFECTO ACUMULATIVO DE LA APLICACIÓN DE BIOSÓLIDOS PROVENIENTES
DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS SOBRE LAS
PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO ANDISOL**

Profesor guía : Jorge Baraona Venegas
Ingeniero Agrónomo M.Sc.
Departamento de Cs. Agronómicas y Recursos Naturales

Profesor consejero : Itilier Salazar Quintana
Químico M.Sc.
Departamento de Ciencias Químicas

Calificación promedio tesis :

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo incondicional, a mi polola Natalia y a mis amigos que siempre me acompañan, en especial a Marcelo y Carlos por sus valiosos aportes.

Agradezco el apoyo y financiamiento entregado por el proyecto Diufro N°120620.

INDICE

Capítulo		Página
1.0	INTRODUCCIÓN	1
2.0	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Antecedentes generales	3
2.2	Aguas residuales	4
2.2.1	Tratamiento de aguas residuales	5
2.3	Biosólidos	6
2.3.1	Características de los biosólidos	6
2.3.1.1	Composición	6
2.3.1.2	Contenido de nutrientes	7
2.3.2	Tratamiento de biosólidos	8
2.3.3	Disposición final de los biosólidos	9
2.3.3.1	Relleno sanitario	9
2.3.3.2	Incineración	10
2.3.3.3	Reciclaje	10
2.3.4	Impacto del uso de biosólidos en la agricultura	11
2.3.4.1	Beneficios de su utilización	12
2.3.4.2	Desventajas de su aplicación	13
2.3.4.3	Costos asociados	14
2.4	Suelo	15
2.4.1	Los suelos en la región de la Araucanía	16
2.4.1.1	Suelos serie Cunco	16
2.4.2	Estabilidad de agregados	16
2.4.3	Propiedades físicas de los suelos	17
2.4.3.1	Estructura	17

2.4.3.2	Textura	17
2.4.3.3	Densidad	18
2.4.3.4	Porosidad Total	18
2.4.3.5	Infiltración	18
2.4.3.6	Contenido de humedad	19
2.4.3.7	Capacidad de campo	19
2.4.3.8	Punto de marchitez permanente	19
2.4.4	Biosólidos en el suelo	20
3.0	MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1	Materiales	22
3.1.1	Ensayo	22
3.1.2	Suelo	22
3.1.3	Manejo del ensayo	22
3.1.3.1	Preparación del suelo	22
3.1.3.2	Características del biosólido aplicado	22
3.1.3.3	Aplicación del biosólido	23
3.1.3.4	Siembra	23
3.1.3.5	Control de malezas	23
3.1.3.6	Cosecha	23
3.1.4	Tratamiento	24
3.2	Métodos	25
3.2.1	Evaluación de propiedades físicas del suelo	25
3.2.1.1	Contenido de humedad gravimétrica	25
3.2.1.2	Humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente	26
3.2.1.3	Área foliar específica	26
3.2.2	Diseño experimental	27

4.0	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	28
4.1	Infiltración acumulada	28
4.2	Velocidad de infiltración estabilizada	29
4.3	Contenido de humedad a θ_{CC} y θ_{PMP}	31
4.4	Contenido de humedad gravimétrica	35
4.5	Área foliar específica	37
5.0	DISCUSIÓN	39
6.0	CONCLUSIONES	45
7.0	RESUMEN	46
8.0	SUMMARY	48
9.0	LITERATURA CITADA	50
10.0	ANEXOS	55

INTRODUCCIÓN

El escenario en el cual se enmarcan las tendencias ambientalistas en la actualidad es un espacio muy complejo en el cual convergen las contradicciones. Por un lado se encuentra un creciente desarrollo de las tecnologías, que junto al crecimiento de las sociedades industrializadas generan exitosos productos e insumos dignos de una evolución humana tan acelerada. Sin embargo, por otro lado, expelen gran cantidad de agentes nocivos que a la vez coartan este mismo desarrollo, produciéndose así un exceso de residuos no degradables o poco tratables para su reutilización, que muchas veces decantan en problemáticas sanitarias y/o ambientales.

El tratamiento con aguas servidas es una necesidad inherente al desarrollo de las sociedades industrializadas, sin embargo este proceso no solo produce agua reutilizable, sino también una gran cantidad de residuos provenientes de los componentes del efluente, además de la cantidad de químicos y masa bacteriana que se utiliza en el proceso de purificación. Esto proporciona una cantidad de material residual que provoca problemas a la hora de decidir su fin en esta tendencia de minimizar los efectos contaminantes que implica la modernidad actual, ya que provocan una gran emisión de gases contaminantes, son entes proliferantes de elementos nocivos para la salud y ocupan gran cantidad de terreno al ser desechados, produciendo así percolación a las napas subterráneas de elementos contaminantes.

No obstante, en la actualidad nacional, este material denominado “lodos residuales” o “biosólidos”, está siendo visto con una óptica diferente, trasladándose desde un material residual contaminante a un potencial elemento aprovechable, ya que se ha investigado que los biosólidos contienen una cantidad de materia orgánica (MO) y elementos minerales que son propicios para la recuperación del medio edáfico degradado. Cabe destacar que este material posee microorganismos patógenos y metales pesados en zonas industriales, como lo es la región de La Araucanía, por lo que debe ser tratado antes de su aplicación. Aspecto que no afecta su valor, ya que gracias a esta intervención se pueden ahorrar en recursos tales como fertilizantes de mayor

costo, al ser éste un elemento con un valor reciclable que se obtiene como consecuencia de un proceso que no deja de generarse, como lo es el tratamiento de aguas servidas.

En base a éste planteamiento, se llevó a cabo un experimento que tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas del suelo, donde la hipótesis de trabajo sostiene un efecto benéfico en sus propiedades físicas al medio edáfico, lo que favorecería la recuperación de suelos degradados.

Objetivo general

Evaluar el efecto sobre las propiedades físicas de un suelo Andisol, producto de la aplicación de cinco dosis distintas de biosólidos.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la aplicación de biosólidos en dosis de 15, 30, 60, 90 y 150 Mg ha⁻¹, sobre la retención de humedad del suelo.
- Medir el efecto de la aplicación de biosólidos en dosis de 15, 30, 60, 90 y 150 Mg ha⁻¹ en el suelo, sobre la curva de velocidad de infiltración estabilizada e infiltración acumulada.
- Comparar el área foliar específica (AFE) del cultivar de trigo Quijote Baer, con aplicaciones de biosólidos en dosis de 15, 30, 60, 90 y 150 Mg ha⁻¹.
- Describir el efecto sobre el contenido de agua a punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) y a capacidad de campo (θ_{CC}) del suelo con aplicaciones de biosólidos en dosis de 15, 30, 60, 90 y 150 Mg ha⁻¹.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedentes generales

El tratamiento de aguas servidas es un proceso que genera grandes cantidad de residuos, la acumulación de estos lodos, esto no es aprobado por los entes ambientalistas, los cuales toman cada día más protagonismo en las agendas políticas de las naciones (Tobasura, 2007), ya que si bien las plantas purificadoras buscan hacer reutilizable la mayor cantidad de agua posible, no tienen mucha claridad sobre qué hacer con éste material (Marambio y Ortega, 2003).

Cabe destacar que en Chile, en la década de los 90, se tomó como desafío tratar las aguas residuales de los sistemas de alcantarillado urbanos, con el fin de disminuir las aguas superficiales (Marambio y Ortega, 2003); hecho que demuestra que el desarrollo viene acompañado de mayores necesidades de luchar contra la contaminación asociada. Así, en el año 1999 las plantas de tratamiento ascendían a 94 a nivel nacional, destacando que en la región Metropolitana la acumulación de lodos llegaría a los 2,2 millones de toneladas para el año 2000, proyectándose a 7 millones de toneladas para el 2010 (Faúndez, 2005)

Esta información llama a la urgente implementación de nuevas formas de sobrellevar la subsecuente problemática de la sanitización urbana y la acumulación de residuos peligrosos para el ambiente, en este caso, lodos residuales (Marambio y Ortega, 2003).

Sin embargo, a partir de las investigaciones sobre el tema, ha surgido una tenencia remediadora para trabajar con éste material a bajo costo. Abriendo así una posibilidad para proponer a futuro tratamientos sustentables y responsables con la naturaleza que se comprendan en base a biosólidos, como por ejemplo el tratamiento a suelos degradados (Vélez, 2007). También es interesante mencionar que esta propuesta busca recuperar los espacios contaminados utilizados con el fin de disminuir estos agentes contaminantes (Arriagada *et al.*, 2007).

2.2 Aguas residuales

Una vez que el agua ha sido utilizada en alimentación humana, en limpieza doméstica, en lavado público o en la industria, incorpora residuos y productos de todo tipo, entonces se convierte en lo que llamamos *agua residual* (Seoánez, 2005). Las aguas residuales contienen materia orgánica como inorgánica, y los microorganismos desempeñan un papel especialmente importante eliminando los compuestos orgánicos. Sin embargo, el tratamiento idóneo de las aguas residuales elimina los microorganismos patógenos, evitando que estos lleguen a los ríos o a otros abastecimientos de agua (Merli y Ricciuti, 2009). Así, de acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como (Merli y Ricciuti, 2009):

Domésticas: son aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación y también residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.

Industriales: son líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.

Infiltración y caudal adicionales: las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc.

Pluviales: son agua de lluvia, que descargan grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de esta agua es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo.

2.2.1 Tratamiento de aguas residuales

Los objetivos de los procesos de tratamiento de aguas residuales son reducir el contenido orgánico, la remoción de nutrientes y la remoción o inactivación de organismos patógenos, que producen la contaminación de éstas aguas. Para conseguir estos objetivos, se deben llevar a cabo diferentes métodos individuales que se pueden combinar para dar lugar a diversos niveles de tratamiento de las aguas residuales (Alcota, 2002). Una planta de tratamientos de aguas residuales está dividida en cinco grandes secciones (Vesilind, 2003):

Tratamiento preliminar: eliminación de sólidos grandes y granos de arena para prevenir el daño en las restantes unidades operacionales.

Tratamiento primario: separación y eliminación de sólidos en suspensión por procesos de floculación y decantación. Los sistemas de tratamiento primario son usualmente procesos físicos.

Tratamiento secundario: reducción y eliminación de la demanda de oxígeno, es decir degradación de la materia orgánica de las aguas. Estos procesos son comúnmente biológicos.

Tratamiento terciario o avanzado: denominación aplicada a cualquier refinamiento o limpiado de las aguas anteriores, uno de los cuales es la eliminación de nutrientes tales como el fósforo. Estos procesos pueden ser físicos (filtros), biológicos (estanques de oxidación), o químicos (precipitación de fósforo).

Tratamiento de lodos (postratamientos): la recolección, estabilización, y destino final de los sólidos (lodos) separados en los procesos anteriores.

Estas aguas residuales tratadas generan subproductos, llamados lodos o biosólidos, que deberán someterse a proceso de acondicionamiento, independientemente de su destino final. Este proceso permite reducir al mínimo los riesgos sanitarios.

2.3 Biosólidos

Los biosólidos son definidos por la EPA como “residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Los biosólidos incluyen las escorias ó sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración“ (EPA, 1994). De ésta manera se puede establecer que el término biosólido se utiliza para potencializar el aspecto de residuo biológico, con potenciales de reutilización que presentan los lodos secundarios.

2.3.1 Características de los biosólidos

2.3.1.1 Composición. Las características químicas de los biosólidos están relacionadas a sus cinco constituyentes principales: contenido orgánico, nutrientes, concentración de patógenos, concentración de metales y químicos orgánicos tóxicos (Metcalf y Eddy, 1996).

Cuadro 1: Composición típica de los lodos crudos y los biosólidos.

PARÁMETROS	LODO	BIOSÓLIDOS
Sólidos Secos Totales (% ST)	2,0-8,0	0,83-1,16
Sólidos Volátiles (% de ST)	60-80	59-88
Aceites y Grasas (% de ST)	7-35	5-12
Proteínas (% de ST)	20-30	32-41
Nitrógeno (N, % de ST)	1,5-4	2,4-5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de ST)	0,8-2,8	2,8-11,0
Potasio (K ₂ O, % de ST)	0-1	0,5-0,7
Celulosa (% de ST)	8,0-15,0	-----
Hierro (no como sulfuro, % de ST)	2,0-4,0	-----
Sílice (SiO ₂ , % de ST)	15,0-20,0	-----
pH	5,0-8,0	6,5-8,0

Fuente: Cortez, 2003

2.3.1.2 Contenido de Nutrientes. Los biosólidos provenientes de aguas servidas domésticas contienen tres nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Los nutrientes presentes en los biosólidos pueden estar en diversas formas químicas. Por ejemplo, el nitrógeno contenido en los biosólidos puede estar como nitratos, amonio o nitrógeno orgánico y el fósforo, por su parte, puede estar presente como ión fosfato y orto fosfato.

Sin embargo, los niveles de N, P, y K presentes en los biosólidos estabilizados son inferiores a los contenidos en fertilizantes químicos como se indica en el cuadro 2. Además, las plantas aprovechan los nutrientes que se encuentran en el suelo en forma mineralizada, con lo cual el valor fertilizante atribuible a los biosólidos estabilizados es aún menor.

Cuadro N° 2: Comparación entre los Niveles de Nutrientes de los Fertilizantes y Biosólido Proveniente de Aguas Servidas.

Compuesto	Nivel Porcentual De Nutrientes (%)		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Fertilizante	5,0	10,0	10,0
Biosólido estabilizado	3,3	2,3	0,3

Fuente: Cortez, 2003

Los biosólidos además contienen compuestos orgánicos cuya degradación en el suelo es un proceso lento. El problema principal de este tipo de compuestos no es el consumo por parte de las plantas, puesto que esto generalmente no se produce, sino por la ingesta indirecta por parte de los animales al pastar en un terreno tratado con lodo (Toro, 2005).

Por otra parte, los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales, puede contener sustancias químicas orgánicas sintéticas aportadas por los efluentes industriales, productos químicos utilizados en el hogar y pesticidas (Araya, 1999).

2.3.2 Tratamiento de los biosólidos

Antes de su disposición final, los lodos deben ser sometidos a procesos de acondicionamiento que permitan estabilizar la materia orgánica, reducir al máximo los riesgos sanitarios y disminuir su contenido de humedad. Lo anterior con la finalidad de prevenir la generación de olores, la atracción de vectores, reducir su volumen para facilitar su manejo y hacer más económico su transporte (Toro, 2005).

El lodo proveniente de los digestores contiene 96-98% de agua y requiere ser concentrado para transformarlo en un sólido pastoso (65-70% de agua) que se pueda manipular y transportar fácilmente (Sánchez, 2005).

El tratamiento del lodo, al igual que el del agua, depende de lo que se quiere lograr, del origen del lodo y del tratamiento o proceso del cual provenga. Según (Gómez y Cabrera, 2002), los procesos más usuales empleados para la disminución y eliminación de los lodos son:

Procesos físicos: corresponden al espesamiento y desaguado del lodo. Con dichas operaciones físicas el lodo reduce su volumen y humedad.

Procesos químicos: se caracterizan por la adición al lodo de elementos para generar su estabilización. La estabilización se lleva a cabo para reducir la presencia de patógenos, eliminar los olores y eliminar e inhibir su potencial putrefacción, entre otros.

Procesos biológicos: implican la acción de microorganismos. El proceso biológico más utilizado es la digestión anaerobia, cuyo propósito es lograr disminuir el volumen del lodo y la descomposición de la materia orgánica muy putrescible hasta formar compuestos orgánicos e inorgánicos relativamente estables; otro proceso biológico usado es la digestión aerobia, que consiste en la eliminación de la fracción biodegradable en tiempos muy cortos.

Procesos térmicos: consisten en someter al lodo a temperaturas extremas que inhiban o eliminen la acción de microorganismos, además de destruir elementos dañinos. Ejemplo de este proceso es la incineración, que implica una combustión a altas temperaturas, donde el lodo pasa a ser ceniza.

Desinfección: corresponde a un proceso adicional realizado para la reutilización y aplicación en el suelo. Algunos procesos que permiten controlar el contacto con los organismos patógenos presentes son: la pasteurización, acondicionamiento térmico, secado térmico, pirolisis, tratamiento elevado de pH, adición de cloro, desinfección con productos químicos y desinfección por radiación de alta energía.

2.3.3 Disposición final de los biosólidos

Una vez acondicionado el lodo, puede ser reciclado o dispuesto en una de las siguientes rutas: disposición en relleno sanitario, reciclaje o incineración.

2.3.3.1 Relleno sanitario. El objetivo es evitar el contacto entre los residuos y el medio ambiente (agua, suelo y aire, principalmente) utilizando ciertos recursos tecnológicos en su construcción, además de acoger los residuos en forma sanitariamente correcta y a un costo viable. Presenta como desventaja elevados costos de transporte y contribuye a aumentar los impactos que acarrea la operación normal de un vertedero, tales como producción de gases, generación de lixiviados, olores, ruido de la maquinaria, aumento del tráfico, uso de tierras y alteración del paisaje (Toro, 2005).

2.3.3.2 Incineración. Es considerada como una forma de disposición debido a que reduce el residuo a cerca del 10% de su masa inicial. Consiste en utilizar los gases calientes de combustión de los desechos como fuente calorífica para una turbina a vapor, con los que se genera energía eléctrica (Muñoz y Martínez, 2001).

Presenta la desventaja de no ser adecuado para cierto tipo de desechos, genera gases tóxicos y partículas no incineradas (gases ácidos, efecto invernadero, compuestos orgánicos volátiles, etc.), además del uso de posibles materiales reciclables en la combustión. Por otra parte, es una técnica apta para escalas que no representan la realidad mayoritaria de las plantas de tratamiento presentes en Chile, de tamaño excesivamente reducido (Leppe y López, 2003; Muñoz y Martínez, 2001). Finalmente en cuanto a costos, el costo de incineración es aproximadamente dos veces y medio mas alto que el de un relleno sanitario (Muñoz y Martínez, 2001).

2.3.3.3 Reciclaje. El reciclaje corresponde a una utilización benéfica de los lodos en el suelo que presenta dos objetivos principales (Leppe *et al.*, 2001):

- Aprovechar sus características físicas como elemento mejorador del suelo y su potencial fertilizante (determinado por su contenido de nutrientes).
- Disponer adecuadamente los sólidos generados durante el proceso de tratamiento de aguas, sin aumentar la masa de residuos sólidos que se producen diariamente en la sociedad.

El uso en suelo puede reemplazar parcialmente el uso de fertilizantes químicos y contribuir a mejorar la estructura del suelo. Sin embargo, se debe ejercer un control adecuado en la aplicación de lodos de modo de evitar la posibilidad de transferir al suelo los contaminantes que se encuentran contenidos en éstos, además de considerar los efectos indirectos que podrían haber sobre el aire o agua. Un elemento importante para establecer las potencialidades reales de utilización de lodos es el costo asociado a su aplicación en suelo.

Según lo expuesto por (Rojas *et al.*, 2000) las restricciones pueden aumentar significativamente estos costos, y provienen de aspectos como el contenido de elementos contaminantes, así como de las normas vigentes en cada país. Estos elementos contribuyen a determinar las características de los lodos que es posible aplicar por unidad de superficie, así como los niveles de control y sistemas de monitoreo exigidos. Desde el punto de vista como elemento mejorador del suelo y su potencial fertilizante, el biosólido se puede aplicar principalmente en dos áreas: agrícola y forestal.

La aplicación en agricultura presenta mayores limitantes que su aplicación en silvicultura, principalmente por ser aplicado en productos que serán consumidos por seres humanos y que por lo tanto deben ser sometidos a procesos de acondicionamientos y estabilización más rigurosos (Toro, 2005).

2.3.4 Impacto del uso de biosólidos en la agricultura

La dinámica de los procesos de producción y reutilización o eliminación de biosólidos es grande. A medida que transcurre el tiempo, las investigaciones revelan variadas formas de hacer ésta una actividad económica, sin perder de vista la responsabilidad y sustentabilidad ambiental (Vélez, 2007).

Diversas investigaciones destacan las bondades de la aplicación de lodos al suelo como fertilizante orgánico y recuperador de suelos degradados, esto debido a sus efectos en las propiedades del suelo. Sin embargo, existen otros estudios que cuestionan su aplicación, ya que se podrían producir efectos adversos, tales como contaminación de napas subterráneas debido a la lixiviación de alguno de sus componentes, o intoxicación de plantas debido a la concentración de metales pesados que éstos poseen. A continuación se presentan algunos de los beneficios e inconvenientes de la aplicación de biosólidos al suelo.

2.3.4.1 Beneficios de su utilización. Dentro de las principales ventajas de la aplicación de biosólidos en cultivos agrícolas, destacan el menor impacto ambiental y los menores costos de disposición, en comparación con los procesos de incineración y los mono-rellenos. (Marambio y Ortega, 2004). Este método incluye la aplicación a suelos agrícolas y forestales, orientadas a la recuperación del suelo, conservación de la tierra, áreas recreativas y sitios dedicados a usufructo (Jacobs y McCreary, 2001), siempre y cuando sean sometidos a procesos de estabilización e higienización previa, para reducir los riesgos asociados a la presencia de patógenos (Rojas *et al.*, 2000).

Los biosólidos, como acondicionadores físicos, químicos y biológicos de las propiedades del suelo, se han convertido en un importante fertilizante orgánico (Rodríguez *et al.*, 2006). Pueden incrementar la infiltración de agua, reducir la erosión del suelo, aumentar la capacidad de retención de agua, reducir la compactación del suelo, incrementar la capacidad del suelo para retener nutrientes, proporcionar nutrientes para el crecimiento de las plantas y proveer de alimentos y energía a los microorganismos beneficiosos del suelo (Jacobs y McCreary, 2001).

Según EPA (2000), la aplicación de biosólidos también provee nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el cinc y el cobre. Los biosólidos pueden servir también como una alternativa o sustituto de los costosos fertilizantes químicos.

Los nutrientes contenidos en los biosólidos ofrecen diversas ventajas en comparación con los fertilizantes inorgánicos debido a que son orgánicos y pueden ser incorporados lentamente por las plantas en crecimiento. Estas formas orgánicas de nutrientes son menos solubles en agua y, por lo tanto, tienen una menor probabilidad de lixiviarse al agua subterránea o ser arrastradas a las aguas superficiales.

2.3.4.2 Desventajas de su aplicación. A pesar de tener diversos efectos positivos en el ambiente, la aplicación al terreno puede tener impactos negativos en el agua, el suelo y el aire si dicha aplicación no se realiza correctamente. Los impactos negativos en el agua resultan por la aplicación de biosólidos utilizando tasas que exceden los requerimientos nutritivos de la vegetación. Uno de los principales inconvenientes del uso de biosólidos en la agricultura es la eventual acumulación de metales pesados en los tejidos, tanto vegetales como animales, y su bioacumulación en la cadena alimenticia (Álvarez, 2004). Por otra parte, existe el riesgo de generación de problemas de salud, es así como es riesgoso cuando se aplica un material fresco, pudiendo causar desde irritaciones hasta infecciones respiratorias de carácter biológico (Lewis *et al.*, 2002).

El exceso de nutrientes en los biosólidos (principalmente los compuestos de nitrógeno) pueden lixiviarse del suelo y llegar al agua subterránea. La escorrentía pluvial puede también transportar un exceso de nutrientes al agua superficial (Cuevas *et al.*, 2006). Sin embargo, debido a que los biosólidos son un fertilizante de liberación lenta, la probabilidad de que los compuestos de nitrógeno sean lixiviados de suelos mejorados con biosólidos, es menor a la del uso de fertilizantes químicos.

Por otra parte es necesario analizar el posible efecto salino sobre el suelo, que pueda tener la incorporación de biosólidos, dada su elevada conductividad eléctrica. Es importante considerar éste aspecto, ya que una aplicación de biosólidos con altos contenidos en sales solubles, podría causar una disminución en la capacidad de germinación de las semillas y crecimiento de las plantas (Álvarez, 2004).

En cuanto a los olores producidos por la aplicación de biosólidos, se puede afirmar que estos representan el principal impacto negativo al aire. La mayoría de los olores asociados con la aplicación al terreno son una molestia más que una amenaza a la salud humana o al ambiente. No obstante, la estabilización de biosólidos reduce los olores y da lugar a una operación que es menos desagradable que la aplicación de estiércol (EPA, 2000).

2.3.4.3 Costos asociados. Es difícil estimar el costo de las actividades de aplicación de biosólidos al terreno sin considerar los detalles específicos de cada programa. Por ejemplo, existen algunas economías de escala en la adquisición de grandes equipos. Se puede necesitar una maquinaria del mismo tamaño para un programa que diariamente maneja 10 toneladas secas de biosólidos que para uno que maneja 50 toneladas por día. El transporte de biosólidos actualmente tiene un costo que bordea los 75 a 80 \$/km x ton, y el costo de disposición en el relleno sanitario es de \$8.000 ton masa húmeda. (Rámila y Rojas, 2008).

Este rango en el costo refleja la amplia variedad de métodos para la aplicación al terreno, así como los diversos métodos para preparar los biosólidos que se aplicarán al suelo (EPA, 2000).

A pesar de la amplia diversidad de costos de los programas de aplicación al terreno, se deben considerar diversos elementos al estimar el costo de cualquier programa de aplicación de biosólidos (EPA, 2000):

- Adquisición del equipo o contratación de los servicios para su aplicación.
- Transporte.
- Mantenimiento y combustible del equipo.
- Mano de obra.
- Costos de inversión, operación y mantenimiento de las instalaciones de estabilización.
- Capacidad de realizar los programas para el manejo y el control de olores.
- Deshidratación.
- Cumplimiento de las normas, tales como las referentes a los permisos de aplicación, el monitoreo del área y el análisis de biosólidos.

2.4 Suelo

Al hablar de “suelo”, en su calidad genérica, Doran *et al.*, (1999) reconoce a este elemento como un recurso natural, dinámico y no renovable. Esto denota que el suelo es un elemento de suministro inherente a una zona específica y que puede ser utilizado por el ser humano para satisfacer sus necesidades.

El suelo conforma la capa más externa del manto terrestre, por ende es el que sustenta la vida en la tierra, y lo hace de maneras y formas tan complejas como lo son las especies que habitan en ella. En consecuencia responde a diversos contextos ambientales que influyen la configuración de su composición, modificándose así las diversas dosis de material mineral, orgánico, aire y agua que lo conforman. Cabe destacar que autores como Foth *et al.*, (1975), mencionan que el suelo “ideal” en superficie debe contar con un 45% de material mineral, 5% de materia orgánica, 25% agua, 25% de aire.

En relación a esto, el suelo también es visualizado como producto de las transformaciones de materiales geológicos sometidos bajo las acciones del clima, la vegetación y la topografía. Definición que condice con su denominación de recurso no renovable, al ser éste un elemento que requiere mucho tiempo para ser formado, dependiendo de su composición, aspecto que sin embargo no supera el transcurso de siglos como mínimo para su establecimiento. Así mismo, un suelo productivo tarda mucho en consolidarse, en contraste con el breve tiempo en que puede degradarse y destruirse si no es tratado o si es utilizado inadecuadamente. Por ende un suelo fértil y productivo destruido no puede volver a reconstruirse a una escala temporal humana, situándolo como un recurso que debe cuidarse y mantenerse. (Parra *et al.*, 2002).

Las propiedades físicas de los suelos están relacionadas con procesos químicos y biológicos que ocurren en el sistema edáfico. La nutrición de las plantas depende de la aireación y disponibilidad de agua. El desarrollo de las raíces es función de la existencia de poros, y de la resistencia que las partículas del suelo impongan al desarrollo de las raíces (Fuentes, 2006)

2.4.1 Los suelos en la región de la Araucanía. Existen distintos tipos y series, sin embargo los de mayor relevancia para la agricultura son los suelos Andisoles. Se caracterizan por ser suelos derivados de cenizas volcánicas; en Chile corresponden a los trumaos y los ñadis. Poseen excelentes condiciones físicas y morfológicas por lo cual se pueden cultivar con facilidad. Contienen grandes cantidades de fósforo, pero éste se encuentra retenido en el suelo en forma no disponible para las plantas; en consecuencia se requieren fuertes fertilizaciones fosfatadas para obtener rendimientos altos (CIREN, 2002).

2.4.1.1 Suelos serie Cunco. Los ensayos se encuentran en un suelo de Serie Cunco, que según la descripción de CIREN, (2002), corresponde a un miembro de la Familia medial, mélica de los Acrudoxic Hapludand (Andisol). Es un suelo moderadamente profundo, formado por depósitos de cenizas volcánicas, que se ubican principalmente en el Llano Central e inicios de precordillera, a una altura de 230 a 330 msnm. De textura superficial franco limosa y de color negro y pardo muy oscuro; de textura franco limosa y color pardo oscuro y pardo grisáceo. Substrato de gravas descompuestas de antiguos planos aluviales. Presenta un suelo enterrado de textura franco limosa y colores pardo muy oscuro y pardo grisáceo muy oscuro sobre un horizonte de textura franco arcillo limosa y color pardo.

2.4.2 Estabilidad de agregados Los agregados del suelo son grupos de partículas o unión de éstas en el suelo (USDA, 1998). Protegen dentro de su estructura a la MO contra el ataque microbiano. El porcentaje de agregados estables al agua es una indicación de la resistencia a la ruptura por el agua y la manipulación mecánica, también es un indicador para mejorar la humedad del suelo y el movimiento del aire (Christensen, 2001 y Carter, 2004). La formación y conservación de agregados contribuye a la preservación de la MO en el suelo.

2.4.3 Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de los suelos están íntimamente relacionadas con los procesos químicos y biológicos que ocurren constantemente en el sistema edáfico. La nutrición de las plantas por ejemplo, depende en gran parte de las condiciones de aireación y disponibilidad de agua que el suelo posea. Otro ejemplo lo constituye el desarrollo de las raíces en el suelo. Tal desarrollo es función de la existencia de poros, y de la resistencia que las partículas del suelo impongan al desarrollo de las raíces. Es por esto que permiten conocer mejor las actividades agrícolas fundamentales como el laboreo, la fertilización, el drenaje, la irrigación, la conservación de suelos y agua, así como, el manejo adecuado de los residuos de cosechas.

A continuación se mencionarán algunas de las propiedades más importantes.

2.4.3.1 Estructura La estructura es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados (Honorato, 2000).

2.4.3.2 Textura Es la cantidad relativa expresada en % de arena, % de limo y % de arcilla contenida en una porción de suelo.- Este término se refiere a las diferentes proporciones de separados en la fracción mineral del suelo, denominándose de la siguiente manera:

- Arenas: Si sus tamaños son de 2,00 a 0,05mm de diámetro.
- Limos: Si sus tamaños son de 0,05 a 0,002mm de diámetro.
- Arcillas: Si sus tamaños son menores de 0,002mm de diámetro.

De acuerdo con el separado que domine en el suelo, éste recibe un nombre especial; así como por ejemplo si domina la arena, el suelo se denomina arenoso; si domina la arcilla se denomina

arcilloso. Según lo citado por Palmer y Frederick (1977), un suelo que presente las 3 fracciones en la misma proporción, se le conoce como suelo de textura franca.

Existe un método para calcular la textura de una manera aproximada en base a la plasticidad que presenta la fracción arcilla al añadirle agua. Se toma una pequeña cantidad de muestra en la palma de la mano, se le añade agua hasta saturación. Se frota las manos para hacer un cilindro y en función de la facilidad de formar un tubo pequeño y delgado y según que se pueda o no doblar se establecen las texturas arcillosas, franco arcilloso y franco. En función de la aspereza (se frota la muestra junto al oído y se escucha el sonido de los granos) se determina la importancia de los contenidos en arena.

2.4.3.3 Densidad La densidad se refiere al peso por volumen del suelo, y está en relación a la porosidad. Un suelo muy poroso será menos denso; un suelo poco poroso será más denso. A mayor contenido de materia orgánica, más poroso y menos denso será el suelo.

2.4.3.4 Porosidad Total: Es definida como el volumen total de poros, constituidos por todo el volumen aparente no ocupado por los sólidos, es función de la distribución en el tamaño de las partículas (textura) y el arreglo espacial de estas partículas conformando agregados (estructura). Esta plantea equilibrio entre contenido hídrico y aireación del suelo (Gavande, 1972).

La porosidad total en suelos de tipo trumaos aumenta de 64%, en la superficie hasta 84%, en las partes más profundas (CIREN, 2002).

2.4.3.5 Infiltración: Esta dice relación con la cantidad de agua que se infiltra en un suelo por unidad de tiempo, bajo condiciones de campo normales, pero esta capacidad depende no tan solo de la forma de la mojadura, si no que además la velocidad de avance en ese frente depende en gran parte del contenido de humedad que presenta el suelo y del tipo de suelo. (Gavande, 1972).

2.4.3.6 Contenido de humedad: Es la capacidad de retención de humedad por parte de los suelos. El movimiento del agua en el suelo, junto a la capacidad de éste para mantener la humedad, se relaciona con la porosidad que determina la aireación y el drenaje, factores que a su vez dependen de otras características físicas, como son la textura y estructura del suelo (Palmer y Troeh, 1977; Bowles, 1978).

El agua en el suelo se puede clasificar como agua disponible y agua no disponible para una planta, cuando el agua ha saturado el suelo según Parker (2000), el ámbito donde el agua se encuentra disponible para las plantas va desde capacidad de campo hasta punto de marchitez permanente.

2.4.3.7 Capacidad de Campo: es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica. Este concepto es de gran importancia en agricultura pues, en la zona de acción de las plantas representa el agua que, transcurrido un tiempo (unos 3 días) después de un riego o de una lluvia, queda en el terreno, parte de la cual podrá ser aprovechada por la vegetación para sus funciones biológicas. Se alcanza cuando la tensión matricial tiene un valor medio de $1/3$ atmósferas en suelo franco, variando desde 0,1 atmósferas en suelos arenoso, hasta 0,5 atmósferas en arcilloso. (Fuentes, 2006).

2.4.3.8 Punto de marchitez permanente: corresponde al grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno y en consecuencia, las plantas no pueden extraerla. Al igual que la capacidad de campo, es un concepto puramente agronómico, que juega un importante papel en fenómenos como la evapotranspiración. Se determina en laboratorio, sometiendo la muestra a una presión de 15 atmósferas y hallando después su grado de humedad. Su valor real depende del tipo de vegetación que exista sobre el suelo, y solo a partir de experiencias de marchitamiento de plantas podrá obtenerse en cada caso (Gavande, 1972).

2.4.4 Biosólidos en el suelo. De acuerdo a lo señalado por los autores Buckman y Brady (1993), la vida de la planta depende de la relación raíz suelo, para el buen desarrollo de la misma. Si las propiedades físicas son limitadas, se obtienen plantas con un desarrollo radicular restringido, crecimiento lento, con escasa cantidad de tallos, hojas pequeñas, marchitez temporal, madurez temprana de la planta y rendimiento limitado.

En este punto los biosólidos, como acondicionadores físicos, químicos y biológicos, se han convertido en un importante fertilizante orgánico (Rodrigues *et al.*, 2006). Pueden incrementar la infiltración de agua, reducir la erosión del suelo, aumentar la capacidad de retención de agua, reducir la compactación, aumentar la capacidad del suelo para retener nutrientes, proporcionar nutrientes para el crecimiento de las plantas y proveer de alimentos y energía para los microorganismos beneficiosos del suelo (Jacobs y McCreary, 2001). Todas estas propiedades beneficiosas de los biosólidos, lo hacen muy atractivo para los agricultores y silvicultores, ya que los pueden utilizar como una alternativa a los fertilizantes y así reducir costos, sin embargo se debe siempre tener en cuenta los factores edafoclimáticos, tipo de cultivo, entre muchos otros (Jacobs y McCreary, 2001).

En cuanto a su aplicación, la incorporación de biosólidos debiera generar una mejor condición física que dejarlos esparcidos sobre el suelo, lo que podría acarrear efectos negativos ya que por ejemplo, algunos materiales orgánicos muestran repelencia al agua, y se provocaría un sello superficial, con aumento de la escorrentía de estos materiales y contaminación de sectores vecinos.

Diversos estudios indican que la aplicación de biosólidos al suelo genera, en el corto plazo, un aumento de la macro porosidad, en comparación con un compost de residuos agrícolas, que provoca un aumento de la micro porosidad. Si el lodo es compostado, no existen mayores diferencias con el lodo fresco, pero en ambos casos existe un aumento de la micro agregación (Bouanani *et al.*, 2002).

Aplicaciones de compost de lodo en dosis crecientes de hasta 37,5 ton ha⁻¹ provocaron un aumento de la conductividad hidráulica saturada (Trelo-Ges y Chuasavathi, 2002). Sin embargo, con dosis mayores (hasta 80 ton ha⁻¹) se han observado la formación de un sello superficial Macedo *et al.* (2002).

De ésta manera se puede decir que la aplicación al suelo aparece como el mejor método de reciclar los lodos, siendo un 80% del material reutilizado, generando mejoras en su productividad y en la recuperación de ecosistemas degradados, debido a que actúa como acondicionador de suelo que además de favorecer, la retención de humedad, permite una mejor penetración de raíces y mejora la textura y estructura del suelo, reduciendo la escorrentía. (Cristina C. Ortega B, 2004).

La aplicación de biosólidos al suelo, permitiría recuperar y mejorar la capacidad productiva del medio edáfico, si se considera el potencial orgánico y nutricional que tienen. (Varnero y Ramírez, 2003).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Ubicación del ensayo. El ensayo se realizó en un predio ubicado en la Pre-cordillera Andina, situado a 5 km al oriente del pueblo Las Hortensias en la comuna de Cunco, Provincia de Cautín, Región de La Araucanía. Sus coordenadas geográficas corresponden a 38° 58'21" Sur y 72°7'31.6" Oeste, a una altura de 337 m.s.n.m. La temperatura media anual es de 12 - 13° C; media julio 8-9° C; media máxima enero 22 - 24° C. La pluviometría anual fluctúa entre 2500 - 3000 mm. (Véase anexo).

3.1.2 Suelo. El suelo es de tipo Andisol y pertenece a familia Los Prados, serie Cunco. La profundidad del suelo varía entre 50-90 cm, con una matriz franco arcillosa y pendientes de 2% en el lugar del ensayo.

3.1.3 Manejo del ensayo

3.1.3.1 Preparación del suelo. Se procedió a invertir y mullir los primeros 20 cm, de la superficie del suelo, por medio de herramientas manuales tales como azadón, pala y rastrillo, antes de la aplicación del biosólido. Una vez realizado éste proceso se incorporó el biosólido en el suelo por medio de palas a una profundidad de aproximada de 20 cm y se dejó estabilizar por un período de 15- 30 días antes de la siembra.

3.1.3.2 Características del biosólido aplicado. El biosólido utilizado proviene de la planta de tratamiento de aguas servidas de Vilcún, perteneciente a la empresa Aguas Araucanía S.A. en la cual se realizan los diferentes procesos para obtener un biosólido apto para su uso. Dentro de los procesos se encuentran: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, y posteriormente para finalizar se realiza una estabilización química con cal. Los biosólidos utilizados en el ensayo pertenecen a la clase B (MINSEGPRES, 2006).

3.1.3.3 Aplicación del biosólido. La incorporación del biosólido al suelo se realizó entre el día 19 de mayo de 2007 y el día 02 de junio del mismo año. Es importante señalar que para calcular las dosis de aplicadas en cada uno de los tratamientos, se determinó la capacidad de una carretilla en metros cúbicos, y luego se relacionó con el tamaño de las parcelas y la cantidad de biosólido en cada tratamiento.

3.1.3.4 Siembra. El cultivo empleado correspondió a *Triticum aestivum*. cv. Quijote Baer, cultivar que se encuentra inscrito en el registro de variedades protegidas por el Servicio Agrícola Ganadero (SAG, 2007). Esta variedad se caracteriza por ser de hábito de desarrollo alternativo precoz, con barbas y tiene una altura de 100 cm. Por otra parte posee resistencia a enfermedades tales como: *Septoria tritici*, *Puccinia striiformis* y *Puccinia recondita*, todas ellas presentes en la región de la Araucanía.

La siembra fue realizada el día 25 de agosto de 2007, en forma mecanizada. La dosis de semilla utilizada para el ensayo en cada una de las parcelas fue de 170 kg ha⁻¹, con una distancia entre hileras de aproximadamente 18 cm y una profundidad de siembra de 2 -3 cm.

3.1.3.5 Control de malezas. Debido a la alta cantidad de malas hierbas presentes en las parcelas, tanto de hoja ancha como gramíneas, fue necesario realizar una aplicación de los herbicidas Sal dimetil amina de MCPA, junto a Metsulfuron metil, los cuales corresponden a herbicidas sistémicos selectivos, post emergentes. Para una solución eficiente, se utilizaron en dosis de 11 ha⁻¹ y 8g ha⁻¹ respectivamente, al estado de 4 a 6 macollas.

3.1.3.6 Cosecha. Por último la etapa correspondiente a la cosecha, se realizó el 9 de febrero de 2008, de forma manual, por medio de echonas y posteriormente trillado con máquina manual en la Estación Experimental Maquehue.

3.1.4 Tratamientos. El estudio inicialmente incluyó cinco tratamientos:

1. Parcelas testigo (T0), sin aplicación de fertilizantes.
2. Parcelas fertilizadas químicamente (TF), con 200 u N ha⁻¹, 90 u P₂O₅ ha⁻¹ vía súper fosfato triple y 50 u K₂O ha⁻¹ vía nitrato de potasio. Aplicación realizada según los resultados del análisis de suelo y los requerimientos del cultivo.
3. Parcelas con dosis de 30 Mg ha⁻¹ (T30), en base materia seca.
4. Parcelas con dosis de 60 Mg ha⁻¹ (T60), en base materia seca.
5. Parcelas con dosis de 90 Mg ha⁻¹ (T90), en base materia seca.

Para el segundo año, se incluyeron cuatro nuevas parcelas con dos nuevas dosis, 15 Mg ha⁻¹ (T15) y 150 Mg ha⁻¹ (T150) de biosólido en base materia seca. El propósito de establecer nuevos ensayos se debió a que la investigación no sólo debiera arrojar valores de dosis ideales de aplicación, sino también estimar si en algún momento se observan parcelas que demuestren resultados despreciables o efectos de sobre aplicación de biosólidos, incluso dosis que presenten toxicidad para el cultivo.

3.2 Métodos

3.2.1 Evaluación de propiedades físicas del suelo. La metodología que se utilizó para éste estudio, incluyó un muestreo de cada parcela con tres repeticiones en cada una de ellas; esto es a distancias de dos, cinco y ocho metros cada muestra. De ésta manera se obtuvo un total de cuarenta y dos muestras, las que posteriormente fueron rotuladas y analizadas según el procedimiento correspondiente.

3.2.1.1 Contenido de humedad gravimétrica. Se determinó el contenido de humedad de los ensayos a una profundidad de 20 cm. Para obtener cada muestra, se utilizó un barreno, con el cual se perforó el suelo hasta llegar a la profundidad ya mencionada; luego el suelo obtenido se almacenó en bolsas de papel y se rotularon. Posteriormente, las muestras se pesaron y así se obtuvo el peso húmedo (Mt). Luego se introdujo la totalidad de las bolsas a un horno, y se dejaron secar por un tiempo de 24 horas a una temperatura de 105° C, así se obtuvo el peso seco (Ms).

De esta manera se puede obtener la humedad gravimétrica, utilizando la siguiente fórmula:

$$W = \frac{M_t - M_s}{M_s} \times 100$$

Donde:

- W = humedad
- Mt = peso húmedo
- Ms = peso seco

3.2.1.2 Humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Las muestras se obtuvieron realizando un corte en el suelo a 20 cm de profundidad, luego se rotularon y se enviaron al Laboratorio de Física de suelos de la Universidad de Concepción.

3.2.1.3 Velocidad de infiltración estabilizada e infiltración acumulada. Mediante el método del cilindro infiltrómetro estándar, se determinó en cada parcela el tiempo de la infiltración de agua al suelo. De ésta manera se obtuvo las curvas de velocidad de infiltración e infiltración acumulada.

Al interior del cilindro infiltrómetro (30 cm alto y 20 cm de diámetro), se introdujo agua hasta llegar a una altura de 15 cm, luego se cronometró, tomando lecturas a intervalos de tiempo entre los: 0, 1, 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos, hasta que la velocidad de infiltración fuera constante. Cuando el agua bajó hasta los 5 cm de altura en el cilindro, se tomó una lectura del nivel y del tiempo y posteriormente se agregó agua nuevamente hasta completar los 15 cm (Palmer y Troeh, 1977).

3.2.1.4 Área foliar específica. Para la determinación de área específica foliar (AEF), se cuantificaron los pesos de cada hoja y por medio del programa Autocad 2002 se determinó su área. Después por medio de la expresión de Liu y Stutzel (2004) se calculó el área foliar específica en donde:

$$\text{Área Foliar Específica (cm}^2/\text{gr)} = \frac{\text{Área (cm}^2\text{)}}{\text{Peso (gr)}}$$

3.1.3 Diseño experimental. Corresponde a un diseño completamente aleatorio con siete tratamientos y tres repeticiones, utilizando parcelas de 40 m² (10 m de longitud y 4 m de ancho), como se puede apreciar en la figura 2.

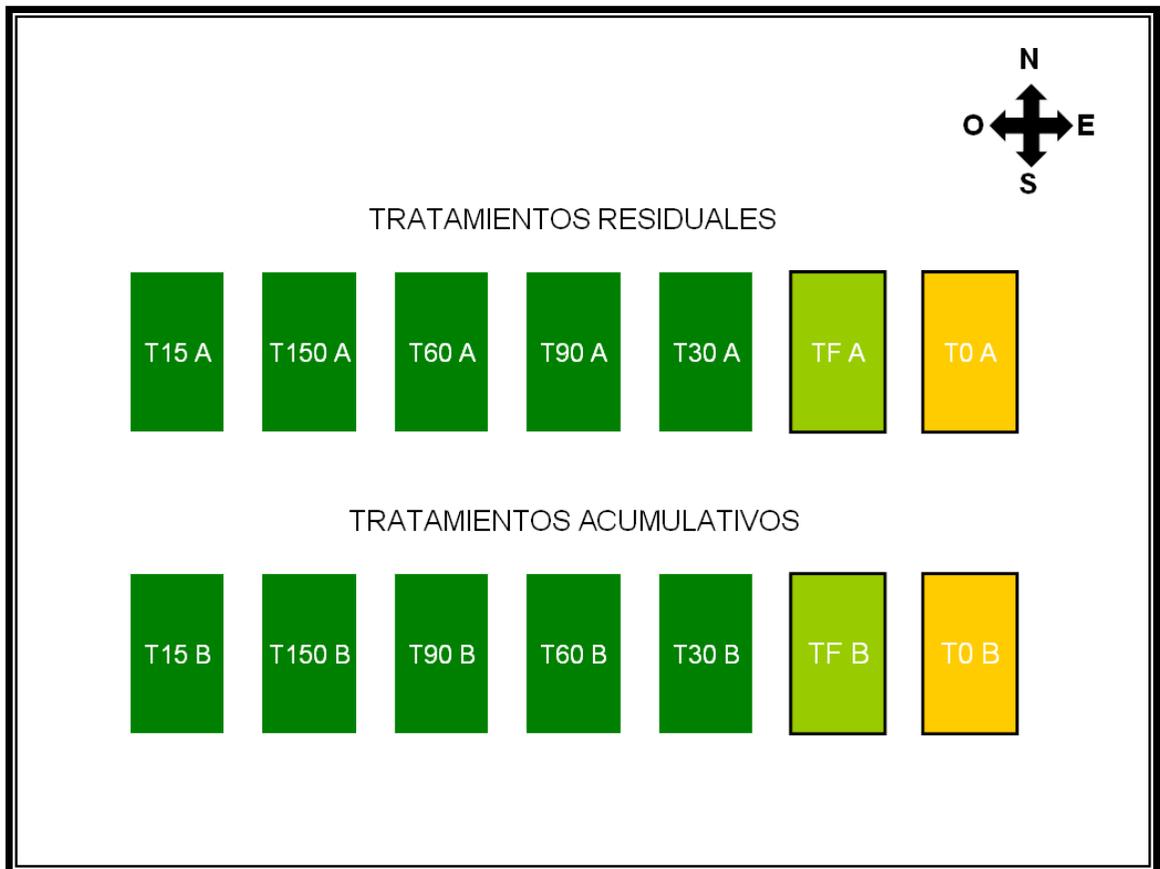


Figura 2. Esquema de distribución de las parcelas.

Los tratamientos residuales correspondieron a ensayos en los cuales sólo se aplicaron diferentes dosis de biosólidos para el primer año del experimento, diferenciándose de los tratamientos acumulativos, a los cuales se les aplicaron distintas dosis de biosólidos una vez por año, siendo en esta investigación la segunda vez que se aplicó.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Infiltración acumulada

En la figura 1 se aprecian diferentes curvas, que corresponden a la infiltración acumulada de ensayos con la aplicación de distintas dosis de biosólidos, en tratamientos acumulativos, frente a un testigo.

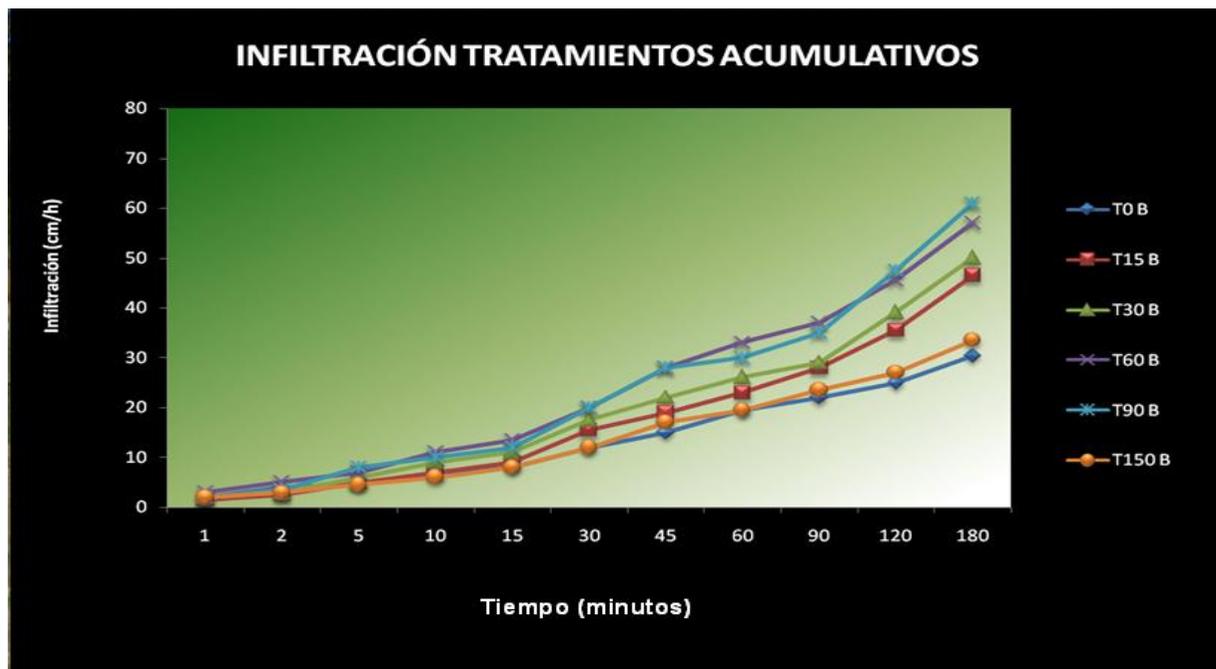


Figura 1: Infiltración acumulada (cm) en el tiempo, de los tratamientos acumulativos con distintas dosis de biosólidos respecto al testigo.

Las curvas de infiltración obtenidas para los distintos tratamientos, señalan una diferencia significativa ($P \leq 0,05$, Duncan), entre prácticamente todos los tratamientos, a excepción del testigo (T0) y el tratamiento con mayor dosis de aplicación (T150), los que no arrojaron diferencias significativas, obteniendo siempre las curvas con valores más bajos de infiltración acumulada. Destacan los altos valores de infiltración de los tratamientos (T90) y (T60), los que comenzaron a estabilizarse después del minuto 120, con valores cercanos a 47 cm.

4.2 Velocidad de infiltración estabilizada.

En la figura 2 se muestran las diferentes velocidades de infiltración estabilizada que se obtuvieron en distintos ensayos, con la aplicación de distintas dosis de biosólidos, en tratamientos acumulativos, frente a un testigo y tratamiento con fertilización mineral.

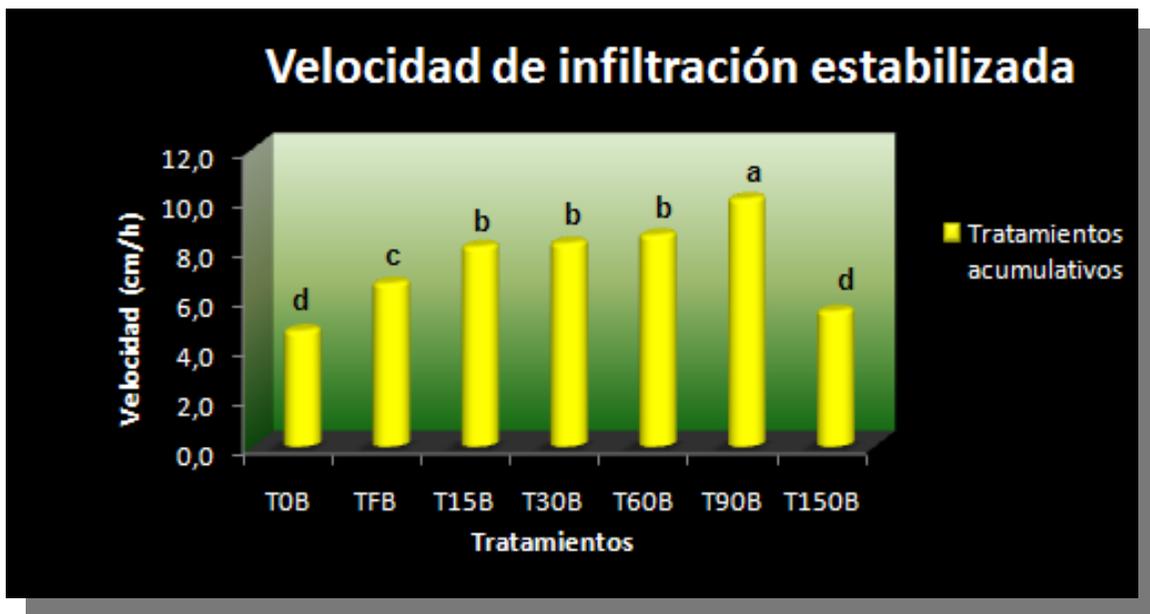


Figura 2: Velocidad de infiltración estabilizada (cm/h) con distintas dosis de biosólidos, en tratamientos acumulativos, respecto al testigo.

Como se puede apreciar en la figura 2, a mayor dosis de biosólidos aplicados al suelo, mayor es la velocidad de infiltración. Sin embargo, en la aplicación con mayor cantidad de biosólidos (T150), se observó una drástica disminución, obteniendo valores cercanos a los correspondientes al testigo (T0). De la misma manera se observó diferencias significativas ($P \leq 0,05$, Duncan) entre todos los tratamientos con respecto al testigo, a excepción del tratamiento (T150), con el cual no registró diferencias estadísticas significativas.

En la figura 3 se comparan las diferentes velocidades de infiltración estabilizada que se obtuvieron en distintos ensayos, con la aplicación de distintas dosis de biosólidos, en tratamientos residuales (TA) y acumulativos (TB), frente a un testigo.

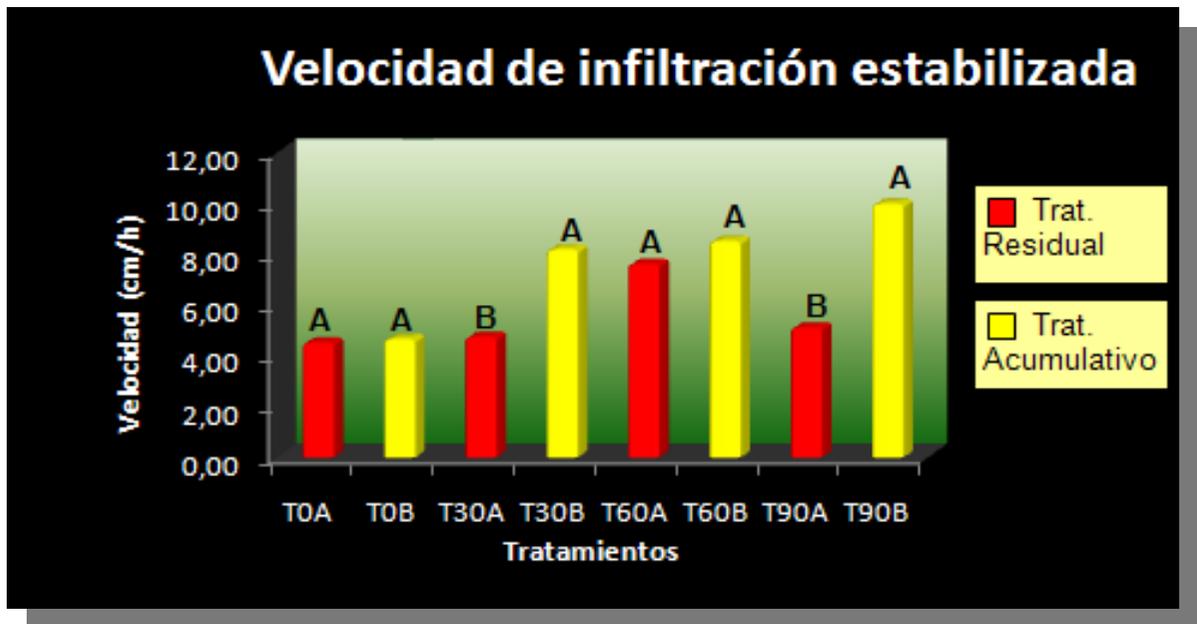


Figura 3: Velocidad de infiltración estabilizada (cm/h) con distintas dosis de biosólidos, en tratamientos residuales y acumulativos, respecto a un tratamiento control.

En la figura 3, se observan las diferentes velocidades de infiltración obtenidas, comparando los tratamientos residuales frente a los acumulativos. De ésta manera se aprecia una diferencia significativa ($P \leq 0,05$, Duncan) al comparar los tratamientos T30 y T90. En cuanto a la comparación entre testigos y los tratamientos T60 no existen diferencias significativas.

4.3 Contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente

En la figura 4 se puede apreciar el porcentaje de humedad retenido por el suelo a 1/3 de atmósfera en tratamientos residuales con distintas dosis de biosólidos y su comportamiento con respecto al testigo y tratamiento con fertilización mineral.

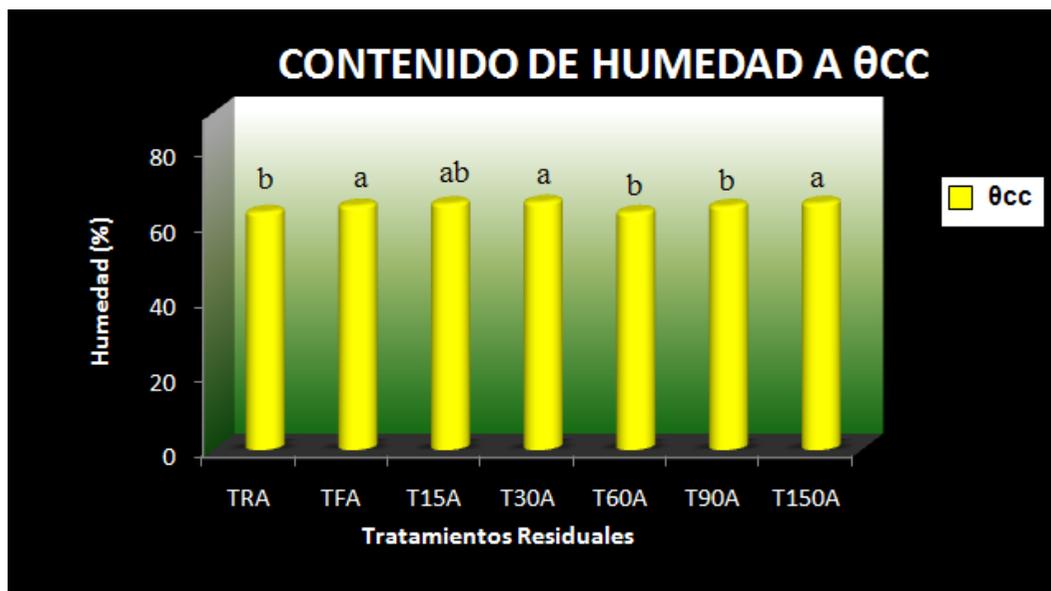


Figura 4: Retención de humedad (%) a 1/3 atmósfera en aplicaciones de diferentes dosis de biosólidos.

La cantidad de agua retenida por el suelo a 1/3 de presión atmosférica o retención a capacidad de campo (θ_{cc}) para los distintos tratamientos residuales con adiciones de biosólidos, pareciera no demostrar una marcada tendencia frente a tratamiento control y tratamiento con fertilización mineral, sin embargo existen diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$, Duncan).

En la figura 5 se puede apreciar el porcentaje de humedad retenido por el suelo a 1/3 de atmósfera en tratamientos acumulativos con distintas dosis de biosólidos.

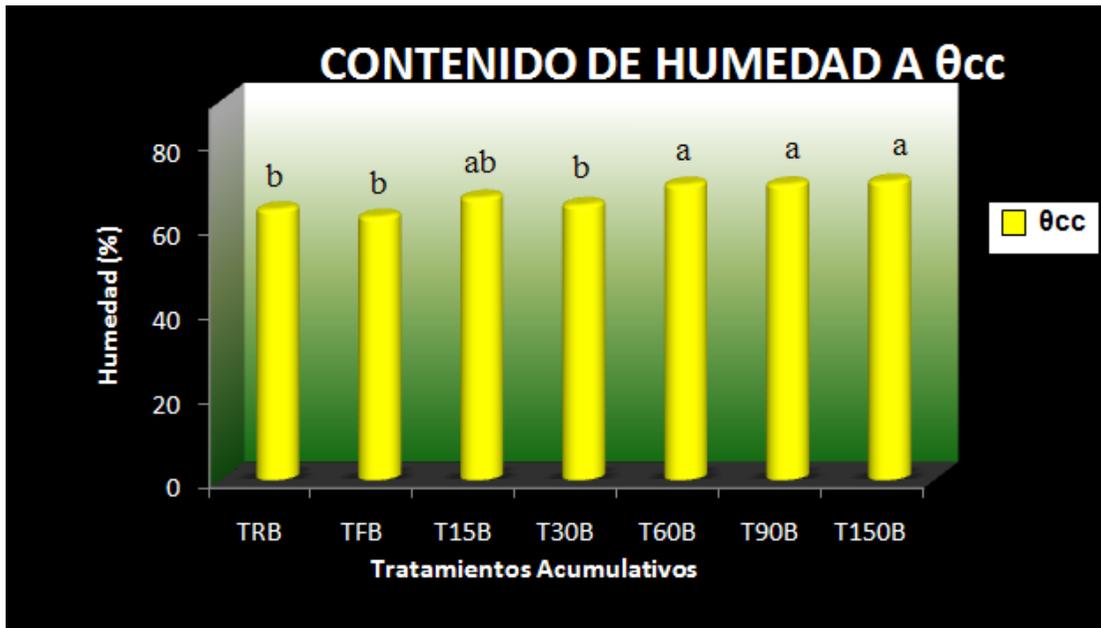


Figura 5: Retención de humedad (%) a 1/3 atmósfera en aplicaciones de diferentes dosis de biosólidos.

Se puede observar que la cantidad de agua retenida por el suelo a 1/3 de atmósfera o retención a capacidad de campo (θ_{cc}), no cuantificó grandes diferencias entre los tratamientos, sin embargo, al realizar un análisis estadístico se observan diferencias significativas ($P \leq 0,05$, Duncan) entre los ensayos con mayor contenido de biosólidos (60, 90 y 150 $Mg\ ha^{-1}$) en comparación al testigo y tratamiento con fertilización mineral.

A continuación en la figura 6 se presentan los resultados de humedad retenida a 15 atmósferas o punto de machitez permanente, para los tratamientos residuales.

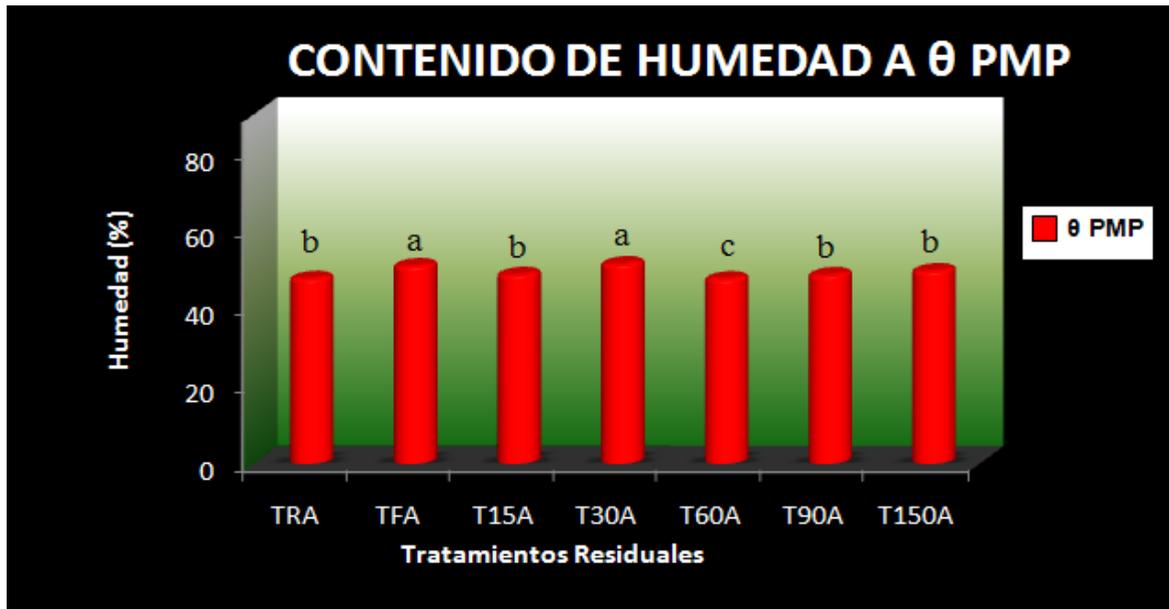


Figura 6: Retención de humedad a 15 atmósferas en aplicaciones de diferentes dosis de biosólidos.

Los resultados entregados reflejaron efectos sobre la retención de humedad a 15 atmósferas o punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), de los tratamientos T30A y T60A con respecto al testigo (TRA). Con los siguientes tratamientos no se registraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$, Duncan).

En la figura 7 se observa el contenido de humedad a punto de marchitez permanente para los tratamientos acumulativos.

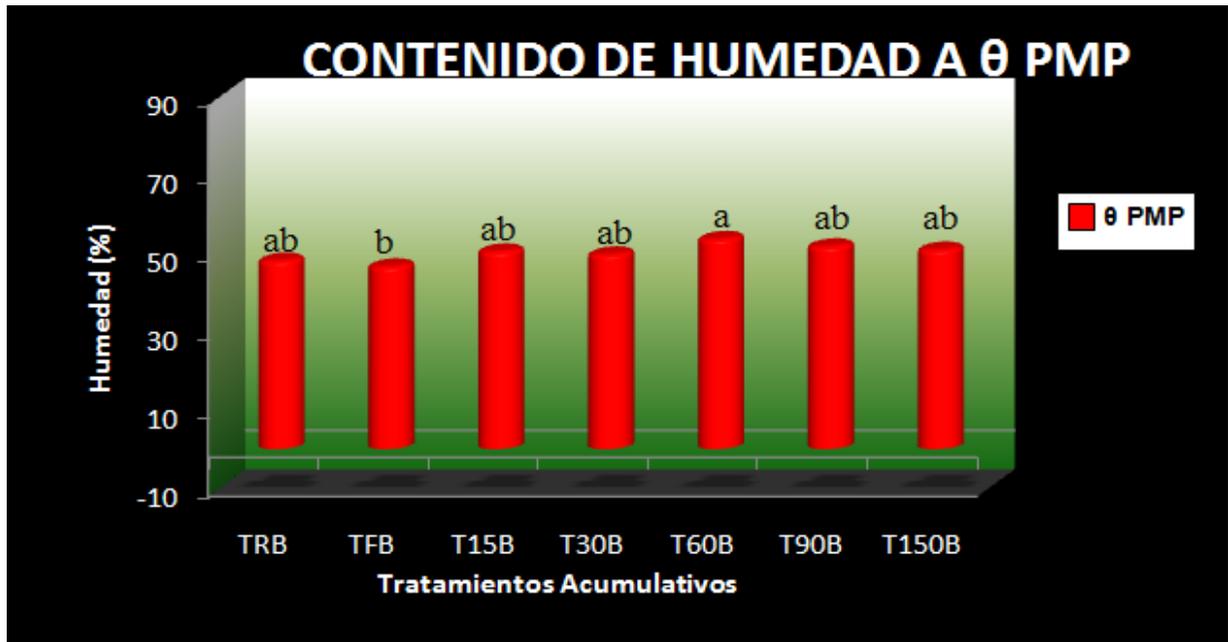


Figura 7: Retención de humedad a 15 atmósferas en aplicaciones de diferentes dosis de biosólidos.

Por otra parte los resultados obtenidos para (θ_{PMP}), no indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$, Duncan), al ser comparados los tratamientos con el testigo. Sólo se puede apreciar diferencias estadísticas entre el tratamiento con aplicaciones de 60 Mg ha^{-1} respecto al tratamiento con fertilización mineral. Finalmente las mediciones de retención de humedad a θ_{CC} y θ_{PMP} en las parcelas residuales resultaron ser similares, aunque con valores levemente inferiores.

4.4 Contenido de humedad gravimétrica

En la figura 8 se muestra la evolución del contenido de humedad gravimétrico de los tratamientos residuales, bajo la aplicación de distintas dosis de biosólidos, frente a un testigo y tratamiento con fertilización mineral.

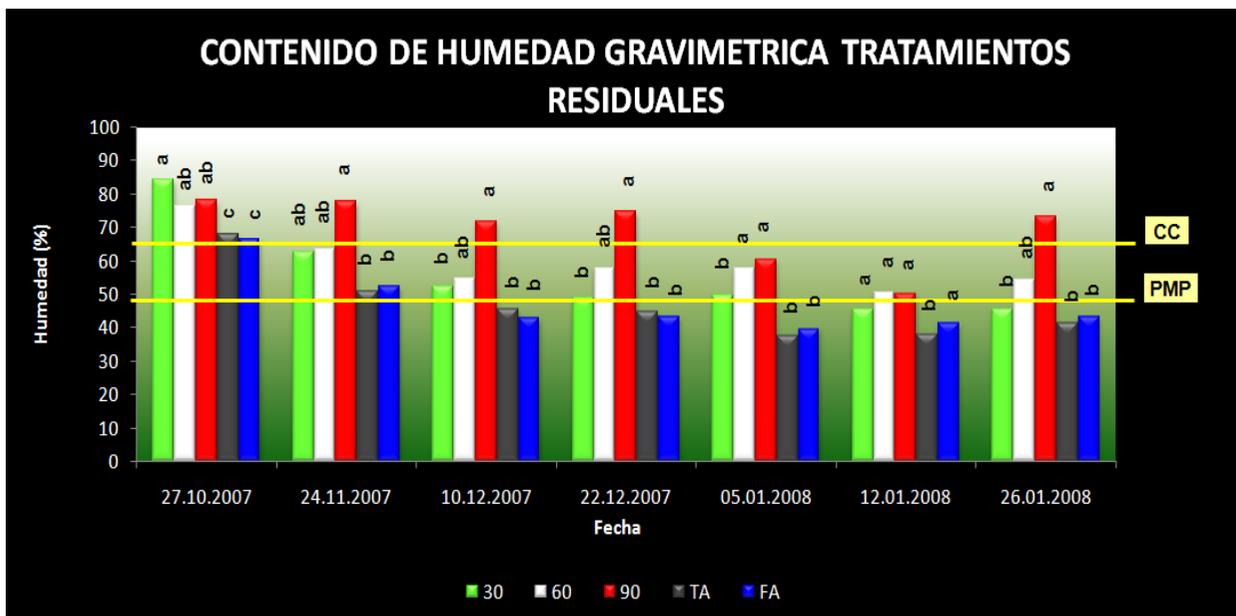


Figura 8: Contenido de humedad gravimétrico de tratamientos residuales.

Los resultados obtenidos del contenido de humedad gravimétrica en los tratamientos residuales, demuestran claramente una diferencia entre los tratamientos con aplicación de biosólidos, respecto a valores obtenidos por el testigo y tratamiento con fertilización mineral. En la mayoría de los casos se establece una diferencia estadística significativa ($P \leq 0,05$, Duncan), a excepción de las fechas correspondientes a 05.01.2008 y 12.01.2008, en las cuales no existe diferencia estadística significativa. Es importante señalar que en éste período se registraron elevadas temperaturas y una pluviometría menor a la de veranos anteriores. (Véase anexo 1).

En la figura 9 se muestra la evolución del contenido de humedad gravimétrico de los tratamientos acumulativos, bajo la aplicación de distintas dosis de biosólidos, frente a un testigo y tratamiento con fertilización mineral.

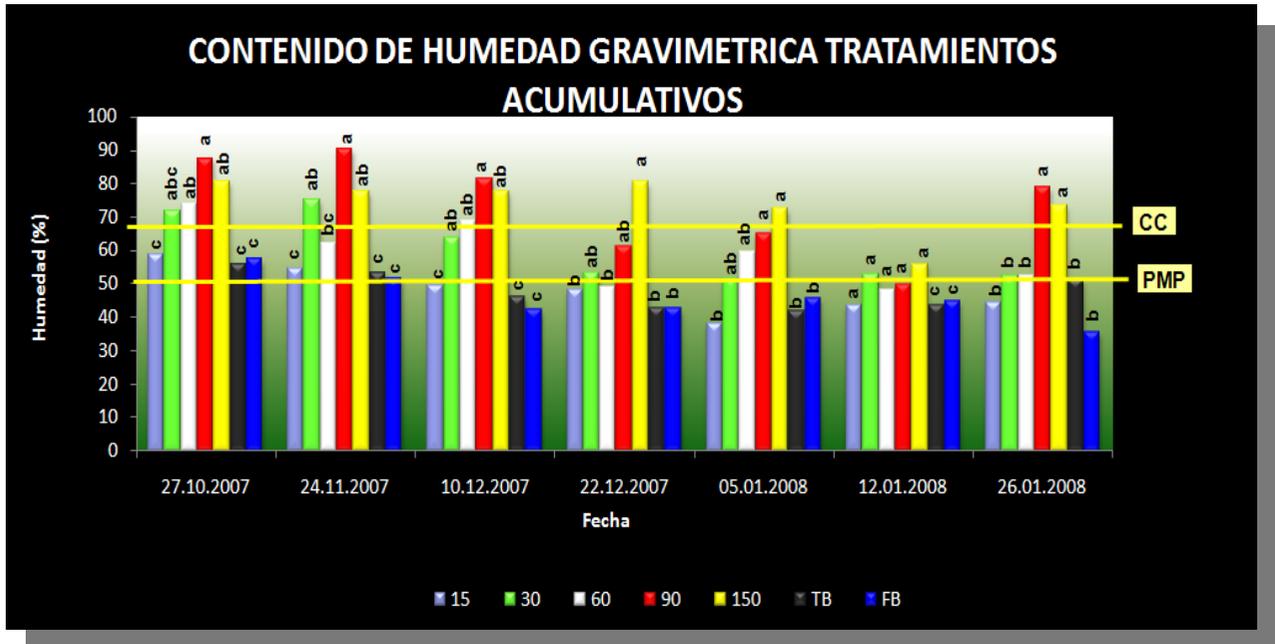


Figura 9: Contenido de humedad gravimétrico de tratamientos acumulativos.

Los resultados obtenidos del contenido de humedad gravimétrica en los tratamientos acumulativos, reflejan la capacidad que tienen los suelos con aplicación de biosólidos para retener humedad. Esto queda de manifiesto en la gráfica, donde se puede apreciar que siempre existió una diferencia estadística significativa ($P \leq 0,05$, Duncan) con respecto a los tratamientos testigo y con fertilización mineral, resultando sólo una fecha sin diferencia estadística significativa, la cual corresponde a 12.01.2008. Como es de esperar, los valores más altos se obtuvieron para los tratamientos con mayor dosis de aplicación de biosólidos.

4.5 Área foliar específica

En la figura 10 se presentan los resultados del área foliar específica de las plantas de trigo, en tratamientos residuales, bajo distintas dosis de biosólidos, frente a un testigo y tratamiento con fertilización mineral.

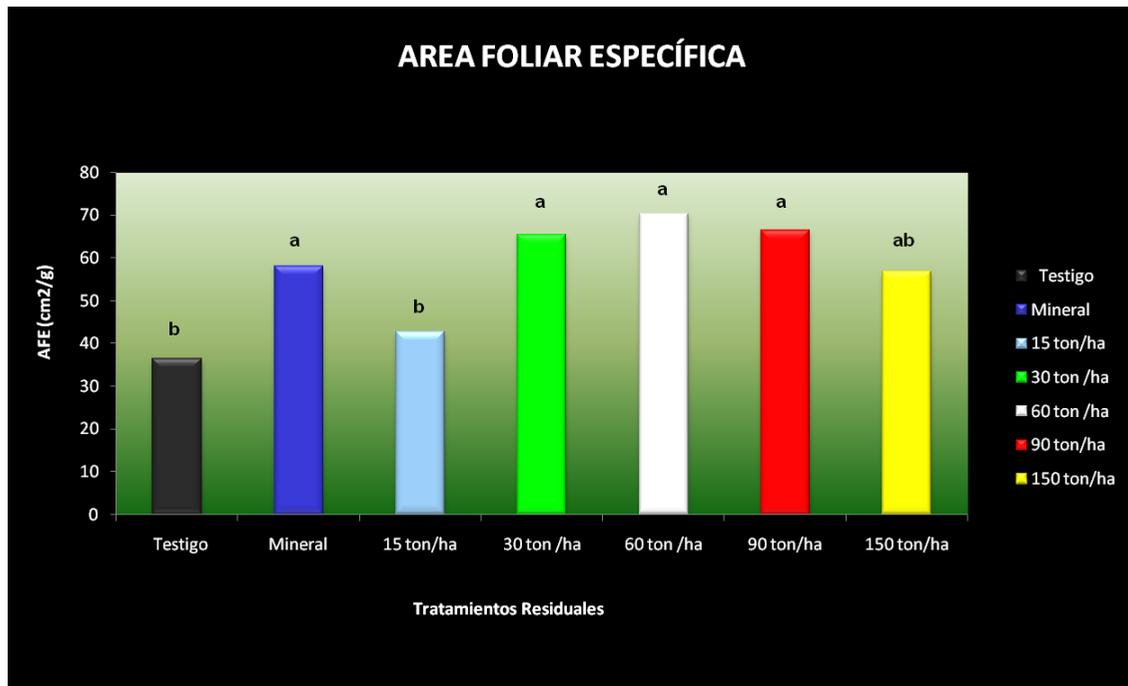


Figura 10: Área foliar específica (cm²/g).

En cuanto a la medición de área foliar específica en los tratamientos residuales, se registró diferencia estadística significativa ($P \leq 0,05$, Duncan), entre los tratamientos con aplicación de biosólidos y testigo. Por otra parte, entre las distintas dosis de aplicación de biosólidos y la parcela con fertilización mineral, no existe diferencia estadística significativa. El incremento de área foliar específica se relaciona con los altos valores de contenido de humedad obtenidos en los tratamientos con aplicación de biosólidos.

En la figura 11 se presentan los resultados del área foliar específica de las plantas de trigo, en tratamientos acumulativos, bajo distintas dosis de biosólidos, frente a un testigo y tratamiento con fertilización mineral.

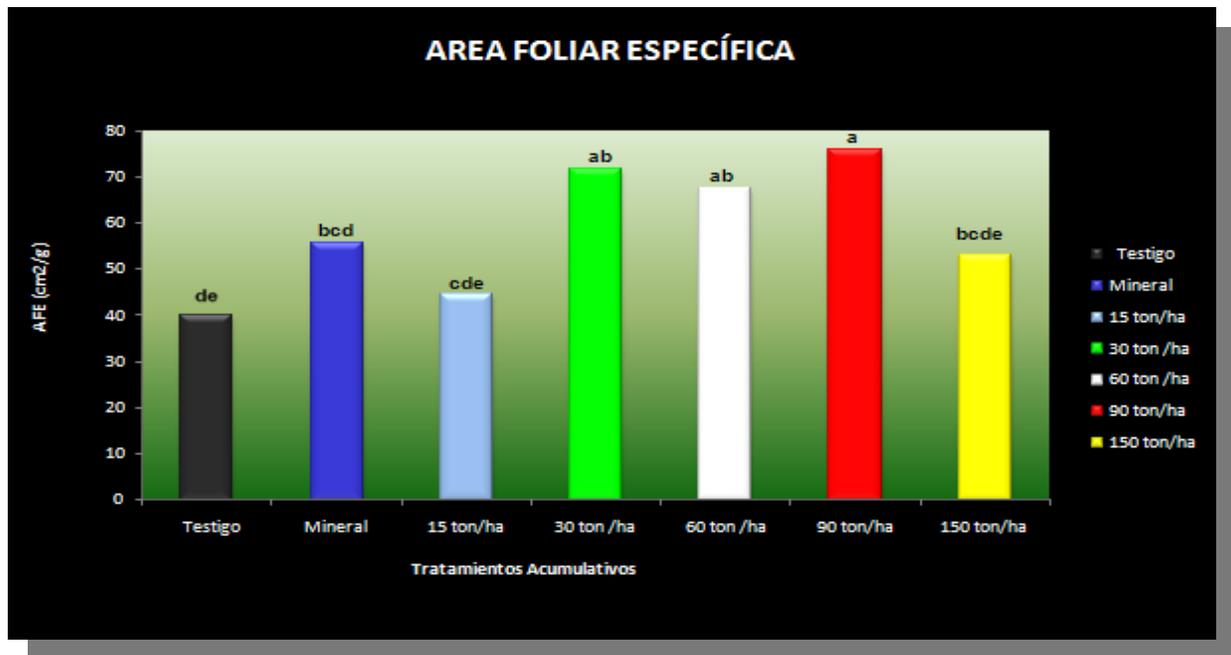


Figura 11: Área foliar específica (cm²/g).

Los resultados obtenidos en los tratamientos acumulativos con respecto a área foliar específica, establecen una diferencia estadística significativa (Duncan, $P > 0,05$). Sin embargo es importante destacar que los tratamientos con aplicación de 15 Mg ha⁻¹ y 150 Mg ha⁻¹, no registraron una diferencia estadística significativa con respecto al testigo. Esto puede resultar de gran importancia, ya que demuestra que tanto una dosis muy baja como una muy elevada de biosólidos aplicado al suelo, no afecta éste tipo de parámetro. Es importante señalar que éste estudio se realizó bajo una siembra primaveral de trigo (*Triticum aestivum*).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los lodos obtenidos de las plantas de tratamiento de agua corresponden a un material con un alto componente de materia orgánica. Es por esto que los efectos de la aplicación de lodos urbanos son predominantemente físicos, mientras que los efectos químicos y nutricionales dependerán de la composición, tratamiento y método de aplicación. Por la composición de los lodos urbanos es esperable que los efectos físicos sobre el suelo sean similares a los obtenidos con las aplicaciones de otros tipos de materiales orgánicos, generando cambios en la estructura y en el sistema poroso.

Al analizar la evolución en el contenido gravimétrico de agua a 20 cm de profundidad, durante siete fechas, se puede afirmar que los tratamientos con aplicación de biosólidos presentaron un mayor contenido de humedad respecto a los tratamientos con aplicación de fertilización mineral y testigo. A medida que se aumentaron las dosis, mayores fueron los contenidos de humedad, los que se mantuvieron siempre sobre el punto de marchitez permanente, incluso en los períodos más secos.

Existe una relación directa entre la dosis de biosólidos aplicados al suelo y el contenido de humedad gravimétrica, lo que corrobora un estudio donde se señala que la aplicación de biosólidos, en dosis de 7 Mg ha^{-1} hasta 90 Mg ha^{-1} , aumentó la infiltración de agua y conservó el contenido de humedad del suelo (Jurado *et al.*, 2004). Esto coincide con lo planteado por Phillips *et al.*, (1997), y Jackson, (2000), quienes describieron un aumento en la retención de agua en suelos con aplicación de biosólidos.

Los elevados valores de humedad gravimétrica en los ensayos, se deben al aporte de materia orgánica presente en los biosólidos, los que contienen entre 59-88 %. Esto sumado a los altos contenidos de materia orgánica que presenta este tipo de suelos, con valores cercanos a 17%, generan efectos los que se reflejan principalmente en una disminución de la densidad real y cambios en la estabilidad de los agregados del suelo.

Estudios similares fueron obtenidos por Betancourt *et al.* (1999), donde la materia orgánica presentó correlaciones positivas para la estabilidad de los agregados, presentando un mejoramiento en las condiciones físicas de suelos degradados, principalmente en su estabilidad estructural. Es así como las aplicaciones de biosólido generan un aumento en la estabilidad de los agregados, lo que asegura un potencial de protección del suelo ante la erosión (Roldán *et al.*, 1996). La mayor estabilidad se traduciría en un aumento del diámetro medio de los agregados, favoreciendo el movimiento del agua y aire (Treló-Ges y Chuasavathi, 2002). Además, la redistribución del sistema poroso tendría un efecto positivo, mejorando la capacidad de retención de agua (Muñoz *et al.*, 1999).

Por otra parte Bouanani *et al.*, (2002), indican que la aplicación de lodo fresco genera, en el corto plazo, un aumento de la macro-porosidad, en comparación con un compost de residuos agrícolas, que provoca un aumento de la micro-porosidad.

Es importante señalar que los valores de humedad más elevados se concentraron en los tratamientos con aplicaciones de 90 y 150 Mg ha⁻¹, y los valores más bajos para el tratamiento de 15 Mg ha⁻¹, el cual se comportó de manera similar al testigo y tratamiento con fertilización mineral. En ambos casos los resultados arrojaron ventajas y desventajas, debido principalmente a que el tratamiento de 15 Mg ha⁻¹ no aportó una cantidad de humedad relevante para el desarrollo del cultivo, en cambio los tratamientos de 90 y 150 Mg ha⁻¹ presentaron contenidos de agua cercanos a saturación, lo que podría indicar el riesgo de exceso de humedad en la superficie del suelo, que es donde normalmente se requiere aireación para los cultivos (Millar, 2007).

Con respecto al clima, éste registró altas temperaturas en los meses donde se realizó la toma de muestras de humedad gravimétrica (noviembre 2007, febrero 2008), lo que afectó en la evapotranspiración del cultivo. No obstante, mayor influencia tuvo la pluviometría, la que en los meses de enero y febrero de 2008, acumuló un total de sólo 27,1 mm de agua, lo que afectó a los cultivos de secano, en los cuales el contenido de humedad para los tratamientos sin aplicación de biosólidos disminuyó hasta situarse bajo el punto de marchitez permanente.

En cuanto a los tratamientos con dosis de biosólidos sobre 60 Mg ha^{-1} , estos siempre se encontraron sobre el punto de marchitez permanente e incluso sobre capacidad de campo, lo que indica la capacidad de retención de agua que poseen los suelos con aplicación de biosólidos (Jackson y Miller, 2000).

Al analizar la infiltración acumulada y velocidad de infiltración estabilizada, los resultados obtenidos mostraron una tendencia similar a lo ocurrido con el contenido de humedad gravimétrico, esto es, a mayor dosis de biosólidos mayor fue la infiltración acumulada y mayor velocidad estabilizada de infiltración. Esto se debe al elevado contenido de materia orgánica, la que aumentaría las velocidades de infiltración debido a que genera una mayor estabilidad de macro-poros por la depositación de materia orgánica en las paredes de estos; en la medida que menor sea el contenido de materia orgánica, mayor será el riesgo de colapso de la estructura al regar el suelo (Michell et al., 1995; Le Bissonnais y Arrouays, 1997).

Sin embargo, no todos los tratamientos se comportaron de manera predecible, y con respecto a la velocidad de infiltración, los tratamientos correspondientes a $15, 30, 60 \text{ Mg ha}^{-1}$, a pesar de tener valores diferentes, no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$, Duncan), arrojando diferencias importantes sólo al compararlos con el testigo y el tratamiento con dosis de 150 Mg ha^{-1} . En cuanto al tratamiento con aplicación de biosólidos de 150 Mg ha^{-1} , demostró poseer propiedades completamente diferentes a los demás tratamientos, siendo sólo comparable a los valores obtenidos por el testigo, tanto en velocidad de infiltración estabilizada como en infiltración acumulada.

Este efecto producido por la aplicación de biosólido al suelo, coincide con lo descrito por otros autores, quienes señalan que aplicaciones de biosólidos en dosis crecientes de hasta $37,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ provocaron un aumento de la conductividad hidráulica saturada (Treló-Ges y Chuasavathi, 2002). Sin embargo, con dosis mayores (hasta 80 Mg ha^{-1}) se ha observado la formación de un sello superficial (Macedo *et al.* 2002). Podría pensarse entonces que aplicaciones en suelos con alto contenido de materia orgánica, pueden provocar una repelencia

excesiva al agua, lo que se traduce en una menor tasa de infiltración, y sumado a esta menor conductividad hidráulica, se produciría una mayor escorrentía superficial (Macedo *et al.* 2002).

Es importante indicar que la forma de aplicación no deja de ser un factor a considerar, ya que los tratamientos acondicionados con mayores dosis de biosólidos y sumado al efecto aditivo de incorporar al suelo estos residuos, generaría una condición física más eficiente en la infiltración, que dejarlos sobre la superficie, ya que podrían generar una capa superficial impermeable favoreciendo el escurrimiento e impidiendo la infiltración (Cuevas *et al.*, 2006).

Se analizó el área foliar específica de un cultivar de trigo establecido en los suelos acondicionados con biosólidos en diferentes dosis, arrojando como resultado diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0,05$, Duncan) entre los tratamientos con aplicaciones de 30, 60 y 90 Mg ha⁻¹ en comparación al testigo. Estas diferencias son efecto de la humedad presente en esos tratamientos, ya que el área foliar específica es un claro indicador de estrés hídrico (Abbate y Cantarero, 2007).

Las razones del incremento en área foliar específica del cultivo, se deben a la utilización de biosólido en el suelo, del cual se destacan características como: disminución del Al fitotóxico y por ende de la acidez en los suelos, incremento de la CIC (Carpenter y Fernández, 2000) y un mejoramiento en el transporte de nutrientes (Malavolta, 1994). Además otros autores señalan que permite una fácil penetración radical (Fageria y Baligar, 1997) y mejora la aptitud del suelo para el cultivo, a través de la reducción del escurrimiento y la erosión (Souza, 1995), así como el aporte de nutrientes, principalmente P y N (Andrade *et al.*, 2000).

Sin embargo, los tratamientos con dosis de 15 Mg ha⁻¹ y 150 Mg ha⁻¹, no demostraron tener diferencias significativas ($P \leq 0,05$, Duncan) en comparación al testigo, lo que presenta un punto de análisis importante, ya que se trata de dosis extremas.

Según lo descrito por Jurado *et al.*, (2004), la densidad y la diversidad de plantas disminuyeron a medida que se incrementó la dosis de biosólidos. Se han obtenido algunos resultados negativos sobre las propiedades del suelo, sin embargo éstos se han presentado en dosis altas, sobre 90 Mg ha^{-1} , las que no se recomiendan comercialmente, hecho que no se obtuvo en éste estudio.

Algunos investigadores, como Rhode (1962), han atribuido el pobre crecimiento de algunos cultivos a las altas concentraciones de Zn y Cd en biosólidos utilizados como abono orgánico. El contenido de Zn se incrementó significativamente en el suelo que recibió las dosis mayores de estos materiales como consecuencia de un alto contenido de este elemento en los biosólidos utilizados. Sin embargo, éstas concentraciones no fueron lo suficientemente altas para causar efectos negativos por toxicidad.

Por otra parte, la comparación de la producción obtenida entre fertilización mineral y tratamiento con biosólidos, indica que la enmienda con estos residuos produce un aumento en la productividad del suelo, incluso cuando el nivel de N está por debajo de los valores óptimos requeridos por el cultivo. Esto se atribuye al posible efecto de la materia orgánica (De Haan, 1983) y de otros micronutrientes, como el Fe, aportados con los biosólidos. El hecho de que en todos los suelos enmendados, con cualquier dosis de biosólidos, se obtenga mayor producción en el segundo cultivo que en las parcelas fertilizadas inorgánicamente, puede ser debido al efecto de la mineralización del N inicial añadido con el lodo, que está presente fundamentalmente en forma orgánica. A medida que esta mineralización progresa, cada vez más N asimilable es liberado; dando como resultado que para el segundo, o siguientes, cultivos se presente mejor respuesta al efecto del aporte de lodos que en la primera cosecha desarrollada en el suelo enmendado. Por el contrario durante el crecimiento del trigo, en el suelo fertilizado inorgánicamente, el contenido de N asimilable es alto y se pueden producir pérdidas por volatilización (N-NH_4^+) y por drenaje (N-NO_3^-) que hacen que descienda la asimilabilidad para las plantas del segundo cultivo. (Quinteiro; Andrade; De Blas, 1998)

Otros estudios señalaron que existen evidencias de que los incrementos de producción cuando se incorporan biosólidos no son exclusivamente el resultado de un mayor aporte de nutrientes al cultivo, sino que además son producto de las mejoras en las propiedades físicas y químicas del suelo receptor de estos materiales orgánicos (Aguilar *et al.*, 1999, Mbila *et al.*, 2003).

Finalmente, es válido señalar que desde el punto de vista de los cambios en las características mecánicas de los suelos, con aplicaciones de este tipo de enmiendas existe poca investigación. Es indudable que la materia orgánica del suelo aumenta la resistencia mecánica de estos, ya que actúa como ligante entre las partículas, aumentando los valores de ángulo de fricción (Hartge y Horn, 1992). Por lo tanto una aplicación de materia orgánica aumentaría el grado de resistencia mecánica de los suelos frente a acciones antrópicas (laboreo) o naturales como el efecto del golpe de la gota de lluvia sobre los agregados de suelo cuando estos están desnudos. Evidencias de esto se presentan en estudios con aplicaciones de residuos orgánicos (Hartge y Zhang, 1997). Sin embargo, dosis excesivas en algunos suelos podrían provocar un efecto contrario, vale decir, actuar como lubricantes entre las partículas de suelo, sin generar ligazones que favorecieran la agregación, por lo que es válido preguntarse cuales son las tasas adecuadas de aplicación de biosólidos, para determinados tipos de suelo del punto de vista físico-químico.

6. CONCLUSIONES

Sobre la base de la metodología utilizada, de los resultados obtenidos y su posterior análisis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

El contenido de humedad gravimétrico, presentó una de las mayores diferencias, principalmente en los tratamientos de 90 y 150 Mg ha⁻¹ de biosólidos con respecto al testigo. Estos presentaron elevados contenidos de agua, siempre cercanos a capacidad de campo e incluso cercanos a saturación, lo que indicaría riesgo de exceso de humedad en la superficie del suelo. Es importante señalar que aún en el período de sequía, los tratamientos con mayores dosis de biosólidos, fueron capaces de retener suficiente humedad para mantenerse sobre el punto de marchitez permanente, aportando así el agua requerida por el cultivo en períodos críticos.

La infiltración acumulada y velocidad de infiltración estabilizada, aumentaron a medida que se incrementó la dosis de biosólidos. Sin embargo la dosis de 150 Mg ha⁻¹ tuvo valores inferiores, indicando un posible sellamiento de la superficie del suelo.

El área foliar específica del cultivar de trigo en los tratamientos acondicionados con biosólidos, arrojó como resultados diferencias significativas entre los tratamientos con aplicaciones de 30, 60 y 90 Mg ha⁻¹ en comparación al testigo, favoreciendo ampliamente a los ensayos con aplicación de biosólidos. Estas diferencias serían efecto de la cantidad de nutrientes aportadas por éstos y por la humedad presente en esos tratamientos, ya que el área foliar específica es un indicador de estrés hídrico.

7. RESUMEN

El tratamiento de aguas servidas es una necesidad inherente al desarrollo de las sociedades industrializadas, sin embargo este proceso no solo produce agua reutilizable, sino también una gran cantidad de residuos provenientes de los componentes del efluente.

Actualmente en la región de La Araucanía existen 31 plantas de tratamientos de aguas servidas, dispersas en distintas áreas y con una proyección en aumento, provocándose así una acumulación de lodos, que requieren de un proceso de reciclaje más amigable con el medio ambiente.

Esto llevó a efectuar la presente investigación, la cual se realizó durante los meses de abril 2007 y marzo 2008, en la localidad de Cunco, ubicado específicamente en las coordenadas 38° 58'21" Sur y 72°7'31.6" Oeste; a 330 msnm. El sector se caracterizó por poseer un suelo Andisol, serie Cunco, perteneciente a la familia Los Prados, en el cual posteriormente se realizó la incorporación de biosólidos en dosis de 15, 30, 60, 90 y 150 ton ha⁻¹, y luego se estableció un cultivo de trigo (*Triticum aestivum*).

El objetivo del estudio fue evaluar si la incorporación acumulativa y residual en el medio edáfico de este tipo de residuos produce cambios sobre parámetros físicos del suelo, con una hipótesis de trabajo que sostiene un efecto benéfico en las propiedades físicas del medio edáfico, lo que favorecería la recuperación de suelos degradados.

El contenido de humedad gravimétrico, presentó una de las mayores diferencias, principalmente en los tratamientos de 90 y 150 Mg ha⁻¹ de biosólidos con respecto al testigo. Estos presentaron elevados contenidos de agua, siempre cercanos a capacidad de campo e incluso cercanos a saturación, lo que indicaría riesgo de exceso de humedad en la superficie del suelo. Es importante señalar que aún en el período de sequía, los tratamientos con mayores dosis

de biosólidos, fueron capaces de retener suficiente humedad para mantenerse sobre el punto de marchitez permanente, aportando así el agua requerida por el cultivo en períodos críticos.

La infiltración acumulada y velocidad de infiltración estabilizada, aumentaron a medida que se incrementó la dosis de biosólidos. Sin embargo la dosis de 150 Mg ha⁻¹ tuvo valores inferiores, indicando un posible sellamiento de la superficie del suelo.

El área foliar específica del cultivar de trigo en los tratamientos acondicionados con biosólidos arrojó como resultados diferencias significativas entre los tratamientos con aplicaciones de 30, 60 y 90 Mg ha⁻¹ en comparación al testigo. Estas diferencias serían efecto de la cantidad de nutrientes aportadas por los biosólidos y por la humedad presente en esos tratamientos, ya que el área foliar específica es un indicador de estrés hídrico.

8. SUMMARY

The sewage treatment plant is a requirement inherent to development of the industrial societies and technology, instead this process not only produce recyclable or potable water, but also a hutch amount of waste coming out of the effluent components.

In our days in the Araucania region, there exist 31 sewage treatment plants, "dispel" in diferent areas and with growing up projection, causing an acumulation of biosolid that "recuares" of an "environment friendler" recyclable process.

This investigation was made during the months of 2007 april and 2008 march in Cunco, a locality ubicated especifically in coordinates 38° 58'21" south, 72°7'31.6" west, and 330 msnm. The section characteristics were having an Andisol soil, cunco serial, pertinent of the grassland family. After that there was made the incorporation of biosolids in dosis of 15, 30, 60,90 and 150 ton⁻¹, and then there was stablish a wheat cultivate (*triticum aestivum*).

The studio objective was to evaluate if the accumulative incorporation of these kind of waste in "edafic enviroment" produce changes above phisical parameters of the soil with the work hipotesis that sustain a benefic effect to the edafic environment in its phisical porperties, which look with favor on the degraded control treatment recuperation.

The gravimetric moisture content, presented one of the majors differences, mainly in the 90 treatments of 150 and Mg ha⁻¹ of has biosólidos with respect to the control treatment. These presented high water contents, always near field capacity and even near saturation, which would indicate risk of excess of humidity in the surface of the soil. It is important to indicate that still in the period of drought, the treatments with biosólidos majors dose of, were able to retain sufficient humidity to stay on the point of permanent marchitez, contributing therefore to the water required by the culture in periods critics.

The accumulated infiltration and speed of stabilized infiltration, increased as the biosólidos dose was increased of. Nevertheless the 150 dose of Mg ha^{-1} had values inferiores, indicating a possible soil seal effect.

The specific foliar area of cultivating of wheat in the treatments equipped with biosólidos threw like results significant differences between the treatments with applications of 30, 60 and 90 Mg ha^{-1} with respect to the treatment control. These differences would be effect of the amount of nutrients contributed by the biosólidos ones and the present humidity in those treatments, because the specific foliar area is an indicator of hydric stress.

9. LITERATURA CITADA

Acevedo, E. 2004. Valorización de lodos provenientes de tratamiento de aguas servidas como mejorador de suelos degradados. Universidad de Chile. Santiago. 33 p.

Albaladejo, J., y Díaz, E. 1990. Degradación y regeneración del suelo en el litoral mediterráneo español. Experiencias en el proyecto Lucdeme. Editorial. CSIC. Murcia (España) (1): 191-214.

Alcota, C. 2002. Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 175 p.

Álvarez, L. 2004. Mineralización in Vitro de nitrógeno y fósforo y contenido de metales pesados en suelos acondicionados con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas servidas. Tesis Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 64 p.

Araya, L., 1999. Estabilización de lodos de tratamiento de aguas residuales. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago. 109 p.

Arriagada, C., Herrera, M., Borie, F. y Campos, J. 2007. Contribution of Arbuscular Mycorrhizal fungi on growth of Eucalyptus globulus co-cultured with Glycine max in soil contaminated with heavy metals. Journal of environmental management. 84: 93-99 p.

Baver, L., 1973. Física de Suelos. 1ª Edición. Editorial de FAO editor, México. 529 p.

Blake, G., and Hartge H. 1965. Bulk density. In: Klute, A., ed. Methods of soil analysis. 1ª Edition, Part 1. Editor Madison and Society Agronomy (USA), (1):371-373 p.

Blake, G. and K. Hartge H. 1986. Particle density. Methods of soil analysis. 2º ed. Editor Madison and Society Agronomy. Madison, Wisconsin, USA, (1): 363-375 p.

Bouanani, F. Domeizel, M. and Prone, A. 2002. Field study and controlled conditions experiments of nitrogen mineralization and changes of a soil physical properties, after spreading of organic matters coming from agricultural and municipal wastes. In: Abstracts 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand. 209 p.

Buckman, M y Brady, N.C. 1993. Naturaleza y propiedades de los suelos. Edición revisada. Editorial Montaner y Simón S.A. Barcelona. España. 590 p.

- Bustamante M.** 1999. Diseño conceptual de la disposición de lodos y biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Ingeniero Civil Químico. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 107 p.
- Bowles. E.** 1978. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. 2ª Edición. Editorial Mc Graw – Hill Latino Americana I. S. A. Bogota. Colombia. 215 p.
- CIREN.** 2002. Descripción de suelos y materiales y métodos (estudio agroecológico de la provincia de Cautín IX región). Edición única. Centro información de recursos naturales. Santiago Chile. 109 p.
- Cortez E.** 2003. Fundamentos de ingeniería para los tratamientos de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región metropolitana. Tesis Ingeniero civil químico. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 95 p.
- Cuevas B., Seguel S., Ellies Sch., Dörner F.** 2006 Efecto de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. *Revistas Ciencias del Suelo y Nutrición Vegetal.* 6 (2): 1-12 p.
- Ellies, A., R. Grez, y C. Ramírez.** 1996. Efecto de la materia orgánica sobre la capacidad de humectación y las propiedades estructurales de algunos suelos de la zona centro sur de Chile. *Agro Sur (Chile):*48-58 p.
- EPA.** 2000. Folleto informativo del manejo de biosólidos y residuos. Control de olores en el manejo de biosólidos. 22p.
- Faúndez, P.** 2005. Actividad microbiológica global en suelos acondicionados con biosólidos cloacales frescos y compostados con residuos forestales. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 61p.
- Foth, H. Millar, C; Turk, I.** 1975. Fundamentos de la ciencia del suelo. 1º edición de la 5º edición inglesa. Editores John Wile y Sons S. Editorial Continental S.A. México. 513 p.
- Fuentes E.** 2006. Guía de profesores N° 2 “propiedades físicas de suelo”. Universidad de Chile. Scholar google.
- Gavande, S.** 1972. Física de suelos principios y aplicaciones. 1ª edición. Editorial Limusa – Wiley, S.A. México. 347 p.
- Guerrero, C., Mataix, J. Navarro, P. Garcia, F. And Gómez, I.** 2001. Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land Research and Management (USA)* (15): 163-171 p.

Herrera L. 1999. Microbiología de Efluentes Líquidos Industriales. Ingeniera Ambiental Universidad de Santiago de Chile. Santiago. Chile. 138 p.

Jacobs, L. y Mc Creary, D. 2001. Utilizing biosolids on Agricultural Land. Department of Crop and Soil Sciences Michigan State University. Extension Bulletin E-2781. p. 5-9

Knight P. 1998. Caracterización, reutilización, tratamiento y disposición final de lodos provenientes de plantas de tratamientos, para la elaboración de una propuesta de norma técnica de manejo, elaborado para CONAMA. Única edición. Santiago. Chile. 243 p.

Le Bissonnais, Y, and Arrouays, D. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. European Journal of Soil Science (Francia). (48): 39-48 p.

Leppe, A., López, A. 2003. Lodos: En busca de un destino. XV congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: AIDIS. Concepción. Chile, p.11.

Leppe, A., López, A., Nelson, P. 2001. Lodos provenientes de plantas de aguas servidas: potencialidades y restricciones; temores y realidades. XIV congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: AIDIS. Santiago. Chile, p. 12.

López, J., López. 1985. El diagnostico de suelos y plantas, Métodos de campo y laboratorio. 4^a Edición. Editorial mundi prensa. Madrid. España. 363 p.

Marambio C. Ortega R. 2004. Uso potencial de lodos derivados del tratamiento de aguas servidas en la producción de cultivos en Chile. Pontificia Universidad Católica.

Merli, G. Ricciuti, N. 2009. Microbiología de las aguas residuales, aplicación de biosólidos en suelo. Seminario de procesos fundamentales físico-químicos y microbiológicos. Bahía Blanca. Argentina. 14-22 p.

Metcalf, L. y Eddy, H. 1996. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización, 3^a edición, Editorial Mc Graw Hill. México. 456 p.

Moffat y Bird, 1989. The potential for using sewage sludge in forestry in England and Wales. Forestry an international journal of forest research (England). (62):1-17 p.

Muñoz, E. y Martínez R. 2001. Rellenos Sanitarios. "Scirus". 15 p.

Muñoz, F.; Polo M.; Giradles, J. 1999. Modificación física de algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Guadalquivir enmendado con lodos de depuradora, en Estudios de la zona no saturada del suelo. Muñoz, R., Ritter, A., Tascón, C. Editorial ICIA. Tenerife. España. 115-121p.

Nordclif, S. 1998. The use of composted Municipal solid waste in land restoration. In: Abstracts 16th World Congress of Soil Science. Montpellier, France. 396 p.

Palmer, R.; Troeh F. 1977. Introducción a la ciencia del suelo. 2° edición. Libros e editoriales, S.A. Mexico. 131 p

Pinto. ME., Casati, H. Tsui-Ping, H. MSB, KU y Edwards, G. 1999. Effects of UV-B radiation on growth, photosynthesis, UV-B absorbing compounds and NADP-malic enzyme in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different nitrogen conditions. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology (Tokyo). 48: 200-209 p.

Rámila, J. y Rojas, S. 2008. Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua. Tesis ingeniero comercial. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 166 p.

Roldan, A., Abadalejo, J. And Thornes, J. B. 1996. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. Arid Soil Research Rehabilitation, (USA). (10): 139-148 p.

Sánchez, E. 2005. Programas de acciones de Saneamiento. En Curso de tratamiento de aguas residuales municipales, curso organizado por el Instituto Mexicano del Agua Potable, San Luis Potosí.

Santibáñez, C. 2006. Uso de lodos para la restauración de comunidades vegetales en suelos degradados y tranques de relave. Tesis Dr. en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 142 p.

Seguel, S, Garcia, C, y Cassanova P. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades de físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánica. Agricultura técnica (Chile). (63): 287-289 p.

Seoanez, M. 2005. Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo. Mundi-Prensa, España. P. 37-66

Singh, R., Agrawal, M. 2007. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste Management. PWS Publishing (USA), (573): 20 p.

Sociedad Agronómica de Chile. 2003. Acondicionamiento con biosólidos para recuperar suelos degradados. Revista Simiente (Chile). Volumen 73 (3-4): 18-18 p.

Tobasura, I. 2007. Ambientalismo y ambientalistas: una expresión del ambientalismo en Colombia. Revista Ambiente & Sociedade (Brasil). Volumen 10 (002): 45-60 p.

Toro C. 2005. Áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales en la VI región de Chile. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 65 p.

Trelo-Ges, V; Chusavathi, T. 2002. Effect of municipal waste and grass cultivation on physical properties of a sandy soil of northeast Thailand. In: Abstracts 17th World Congress of Soil Science. Bangkok. Thailand. 924 p.

Vélez, J. 2007. Los biosólidos: ¿Una solución o un problema? Producción más limpia. Vol. 2 N° 2. 17 p.

Vesilind, A. 2003. Wastewater treatment plant design. WEF-IWA: Alexandria (VA, EU). 512 p.

Warren, Forsyth. 1980. Física de Suelos. Manual de laboratorio. 1^a Edición. San José: lica. 212p.

10. ANEXOS

Anexo 1 Pluviometría total mensual registrada en la Estación Agro meteorológica de Carillanca, período 2007-2009 (febrero) y promedio histórico de 35 años del mismo período.



Fuente: INIA, 2009

Anexo 2 Análisis químico del suelo en que se realizó el estudio.

ANALISIS QUIMICO DE SUELOS					
Muestra/Potrero Superficie/ha	T. FERTILIZANTE RESIDUAL	90B T.ACUMULATIVO	T 60-B T.ACUMULATIVO	T 60-A T.RESIDUAL	T 90-A T.RESIDUAL
Nº Laboratorio	69712-07	69713-07	69714-07	69715-07	69716-07
N (mg/kg)	-	-	-	-	-
P(mg/kg)	10	28	73	17	18
K(mg/kg)	59	149	325	117	125
pH (en agua)	5.61	5.85	6.36	5.66	5.54
Materia orgánica (%)	19	22	21	16	19
K (cmol+/kg)	0.15	0.38	0.83	0.30	0.32
Na (cmol+/kg)	0.22	0.04	0.05	0.04	0.03
Ca (cmol+/kg)	2.84	12.36	20.43	7.15	6.26
Mg (cmol+/kg)	0.43	0.61	1.11	0.43	0.39
Al (cmol+/kg)	0.19	0.04	0.02	0.06	0.11
Saturación de Al (%)	4.96	0.30	0.09	0.75	1.55
CICE (cmol+/Kg)	3.83	13.43	22.44	7.98	7.11
S.Bases (cmol+/kg)	3.64	13.39	22.42	7.92	7.00
B (ppm)	0.19	0.38	0.52	0.27	0.34
Mo (ppm)	-	-	-	-	-
Zn (ppm)	2.47	6.41	19.8	2.66	3.81
Cu (ppm)	1.95	4.41	10.23	2.20	2.82
Fe (ppm)	35.1	47.9	64.8	42.1	42.5
Mn (ppm)	1.24	5.11	5.71	2.58	3.29
S (ppm)	12	33	65	18	19
Al Ext. (ppm)	1713	1419	996	1543	1827
pH CaCl ₂	4.79	5.31	5.76	5.05	4.85

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS					
Muestra/Potrero Superficie/ha	TESTIGO RESIDUAL	TESTIGO ACUMULATIVO	T 30 T.ACUMULATIVO	T 30 T.RESIDUAL	T F B T.RESIDUAL
Nº Laboratorio	69707-07	69708-07	69709-07	69710-07	69711-07
N (mg/kg)	-	-	-	-	-
P(mg/kg)	8	8	33	23	11
K(mg/kg)	47	43	117	137	11
pH (en agua)	5.42	5.62	5.67	5.69	5.62
Materia orgánica (%)	19	19	19	19	19
K (cmol+/kg)	0.12	0.11	0.30	0.35	0.17
Na (cmol+/kg)	0.09	0.10	0.05	0.04	0.27
Ca (cmol+/kg)	2.54	2.61	9.19	10.25	2.57
Mg (cmol+/kg)	0.45	0.41	0.50	0.63	0.45
Al (cmol+/kg)	0.22	0.18	0.08	0.05	0.17
Saturación de Al (%)	6.43	5.28	0.79	0.44	4.68
CICE (cmol+/kg)	3.42	3.41	10.12	11.32	3.63
S.Bases (cmol+/kg)	3.20	3.23	10.04	11.27	3.46
B (ppm)	0.27	0.23	0.27	0.31	0.22
Mo (ppm)	-	-	-	-	-
Zn (ppm)	2.10	1.75	7.53	5.23	1.84
Cu (ppm)	1.87	1.37	4.63	3.77	1.52
Fe (ppm)	35.1	39.5	51.6	41.9	41.5
Mn (ppm)	1.05	1.1	4.14	3.63	1.18
S (ppm)	8	8	30	43	11
Al Ext. (ppm)	1814	1899	1368	1443	1949
pH CaCl ₂	4.76	4.79	5.11	5.15	4.78

Anexo 3: Anova de un factor para infiltración acumulada.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1544.299	6	257.383	220.975	.000
Intra-grupos	16.307	14	1.165		
Total	1560.606	20			

Anexo 4: Anova de un factor para velocidad de infiltración estabilizada

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	107.229	11	9.748	32.802	.000
Intra-grupos	7.132	24	.297		
Total	114.361	35			

Anexo 5: Análisis de subconjuntos homogéneos para velocidad de infiltración estabilizada

Duncan ^a	31.00	3	4.5367				
	32.00	3	4.6500				
	301.00	3	4.7500				
	901.00	3	5.1200				
	1502.00	3	5.4533				
	41.00	3		6.4167			
	42.00	3		6.5800			
	601.00	3			7.6100		
	602.00	3			8.0467		
	302.00	3			8.1867		
	152.00	3			8.5300		
	902.00	3				9.9767	
Sig.			.076	.717	.069		1.000

Anexo 6: Anova de un factor para humedad gravimétrica en distintas fechas.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
HUMEDAD1	Inter-grupos	3727.411	11	338.856	4.302	.001
	Intra-grupos	1890.485	24	78.770		
	Total	5617.897	35			
HUMEDAD2	Inter-grupos	5278.210	11	479.837	5.317	.000
	Intra-grupos	2166.092	24	90.254		
	Total	7444.302	35			
HUMEDAD3	Inter-grupos	6500.048	11	590.913	3.791	.003
	Intra-grupos	3741.064	24	155.878		
	Total	10241.112	35			
HUMEDAD4	Inter-grupos	5183.760	11	471.251	3.178	.009
	Intra-grupos	3558.387	24	148.266		
	Total	8742.147	35			
HUMEDAD5	Inter-grupos	4338.041	11	394.367	2.835	.016
	Intra-grupos	3338.007	24	139.084		
	Total	7676.048	35			
HUMEDAD6	Inter-grupos	867.692	11	78.881	1.181	.350
	Intra-grupos	1603.372	24	66.807		
	Total	2471.063	35			
HUMEDAD7	Inter-grupos	6459.069	11	587.188	3.586	.004
	Intra-grupos	3930.139	24	163.756		
	Total	10389.208	35			

Anexo 7: Análisis de subconjuntos homogéneos para humedad gravimétrica

Duncan ^a	32.00	3	55.7500				
	42.00	3	57.3100	57.3100			
	152.00	3	58.9267	58.9267			
	41.00	3	66.5500	66.5500	66.5500		
	31.00	3	68.1200	68.1200	68.1200	68.1200	
	302.00	3	71.7533	71.7533	71.7533	71.7533	71.7533
	602.00	3		73.9700	73.9700	73.9700	73.9700
	601.00	3			76.6600	76.6600	76.6600
	901.00	3			78.7267	78.7267	78.7267
	1502.00	3			80.7367	80.7367	80.7367
	301.00	3				84.5867	84.5867
	902.00	3					87.5633
	Sig.		.061	.052	.099	.057	.067

Anexo 8: Anova de un factor para el área foliar específica

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	5592,549	11	508,414	5,509	,000
Intra-grupos	2214,942	24	92,289		
Total	7807,492	35			

Anexo 9: Análisis de subconjuntos homogéneos para área foliar específica

Duncan ^a	31,00	3	36,4433					
	32,00	3	40,1933	40,1933				
	152,00	3	44,4900	44,4900	44,4900			
	1502,00	3	53,2067	53,2067	53,2067	53,2067	53,2067	
	42,00	3		55,6833	55,6833	55,6833	55,6833	
	41,00	3			58,1133	58,1133	58,1133	58,1133
	301,00	3				65,3833	65,3833	65,3833
	901,00	3				66,3733	66,3733	66,3733
	602,00	3				67,7333	67,7333	67,7333
	601,00	3				70,1400	70,1400	70,1400
	302,00	3				71,5967	71,5967	71,5967
	902,00	3					76,0933	76,0933
	Sig.		,060	,082	,124	,052	,055	,055

