

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**APLICACIÓN DE DISTINTAS DOSIS DE DIGESTATO PARA ACELERAR LA
DEGRADACIÓN DE RASTROJO DE TRIGO**

JAVIER IGNACIO FRANCHI PÉREZ

Santiago, Chile
2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**APLICACIÓN DE DISTINTAS DOSIS DE DIGESTATO PARA ACELERAR LA
DEGRADACIÓN DE RASTROJO DE TRIGO**

**APPLICATION OF DIFFERENT DIGESTATE DOSES TO HASTEN WHEAT
STUBBLE DETERIORATION**

JAVIER IGNACIO FRANCHI PÉREZ

Santiago, Chile
2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**APLICACIÓN DE DISTINTAS DOSIS DE DIGESTATO PARA ACELERAR LA
DEGRADACIÓN DE RASTROJO DE TRIGO**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

JAVIER IGNACIO FRANCHI PÉREZ

| Profesor Guía | Calificaciones |
|--|-----------------------|
| Sra. María Teresa Varnero M. Químico Farmacéutico | 7,0 |
| Profesores Evaluadores | |
| Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr. | 6,6 |
| Marcos Mora G. Ingeniero Agrónomo, Dr. | 7,0 |

Santiago, Chile
2016

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecerle a mi profesora guía, Sra. María Teresa Varnero, quien me dio la oportunidad de participar en su proyecto. Entregándome constantemente su apoyo y confianza para el desarrollo de este trabajo.

No hay palabras que puedan describir mi profundo agradecimiento hacia mi familia, Especialmente a mi madre Nancy Pérez y a la madre de mi hijo, mi polola Yessenia Fabris, quienes durante todos estos años confiaron en mí, entregándome su cariño, paciencia y por sobre todo apoyo incondicional.

Al regalo más grande que he recibido en la vida, mi hijo javier, quien fue el pilar fundamental para poder lograr esta meta, dándome las fuerzas necesarias para no decaer antes las dificultades que se me presentaron durante la carrera.

A quienes durante años han sido mis amigos, confidentes, hermanos y gran apoyo mutuo en todo momento, agradeciéndoles la confianza que depositaron en mí para poder estar siempre en las buenas y en las malas juntos. Erwin Mackay, Ruddy Zuñiga, Maximiliano Toledo, Eduardo Basualto, Jose Álvarez, Andrea Badillo, Jocelyn Quirino, Bárbara Quirino, Camilo Jara, Sebastián Melipil, Scarlett Antivilo, Constanza González, Alicia Galdámes, Pietro Delucchi, Fabián Abarza y Felipe Díaz. Gracias por creer en mí y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencia que nunca voy a olvidar.

Gracias a todas las personas del Centro AGRIMED que fueron participe de este proyecto, ya sea de manera directa o indirecta, siendo los responsables de realizar su pequeño aporte, que el día de hoy se ve reflejado en la culminación de mi paso por la Universidad.

Esta tesis fue financiada por el Proyecto NAC-I-023-2014 del Fondo de Protección Ambiental (FPA) del Ministerio del Medio Ambiente, titulado “Desarrollo de una tecnología alternativa a la quema de rastrojos mediante inoculantes provenientes de biodigestores”

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT..... | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| Objetivo General | 4 |
| Objetivos Específicos | 4 |
| MATERIALES Y MÉTODO | 5 |
| Área de estudio | 5 |
| Método..... | 6 |
| Diseño del experimento | 6 |
| Variables medidas previas al experimento | 7 |
| Variables medidas después de terminado el experimento | 8 |
| Parámetros físico-químicos..... | 8 |
| pH..... | 8 |
| Conductividad Eléctrica. | 8 |
| Fitotoxicidad. | 8 |
| Actividad Microbiana..... | 9 |
| Contenido de Agua..... | 10 |
| Sólidos Volátiles. | 10 |
| Carbono Orgánico. | 10 |
| Nitrógeno Total. | 10 |
| Densidad Aparente. | 10 |

| | |
|---|----|
| Tamaño de partícula..... | 10 |
| Análisis estadístico..... | 11 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 12 |
| Parámetros físico-químicos-biológicos previos al experimento..... | 12 |
| Parámetros físico-químicos de los tratamientos..... | 14 |
| pH..... | 14 |
| Conductividad Eléctrica..... | 15 |
| Fitotoxicidad..... | 17 |
| Actividad microbiana..... | 18 |
| Contenido de Agua..... | 20 |
| Sólidos Volátiles (M.O)..... | 21 |
| Carbono Orgánico (CO)..... | 23 |
| Nitrogeno total..... | 24 |
| Relación Carbono/Nitrógeno..... | 26 |
| Densidad Aparente..... | 28 |
| Tamaño de partícula..... | 29 |
| CONCLUSIONES..... | 31 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 32 |
| ANEXOS Y APÉNDICES..... | 35 |

RESUMEN

En Chile se cultivan anualmente 690.000 ha de cereales, los cuales poseen un potencial de $3,4 \times 10^6$ toneladas de rastrojo. Debido a la gran cantidad de rastrojos que se generan mediante esta actividad, es costoso y complejo dar usos alternativos a este material, utilizándose habitualmente la quema directa para eliminarlos. Esto produce efectos de deterioro ambiental, contaminando el aire y disminuyendo los niveles de materia orgánica de los suelos. En este trabajo se evaluó el uso de digestato, co-producto obtenido en la producción de biogás, con el objeto de determinar su potencial en la degradación biológica del rastrojo de trigo. Se establecieron ocho tratamientos con tres repeticiones cada uno, evaluando 2 variables: tamaño de rastrojo inicial y concentración de digestato. Para la primera variable se definieron 2 tamaños de partículas, menor a ocho centímetros y mayor a veinte centímetros; para la segunda variable, se consideraron cuatro concentraciones de digestato (% v/v): 0 - 30 - 60 y 100 %, aplicando una concentración de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a un equivalente de $8,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de rastrojo de trigo. En las materias primas y en los tratamientos, se analizaron diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, tales como: pH, C.E, contenido de agua, contenido de materia orgánica, relación C/N, nitrógeno total, contenido de carbono orgánico, densidad aparente, fitotoxicidad y actividad biológica. Al término del ensayo, se determinó la distribución de tamaño de partículas.

Los resultados indican que el tamaño de rastrojo de trigo no afecta el nivel de degradación de los materiales tratados con digestato. No obstante, los tratamientos con una concentración de 60% y 100% digestato, presentaron un mayor avance degradativo respecto a los tratamientos con una concentración de 30%. Además, se pudo apreciar que la distribución de tamaño de partículas para los materiales degradados con digestato se concentró entre los tamices pequeños y medianos, constituyendo un 80 % del material en partículas menores a 2 mm. En todos los tratamientos disminuyó la relación C/N inicial del rastrojo, alcanzando valores inferiores a 24/1 en los tratados con digestato. En los bioensayos de germinación, en todos los tratamientos los índices de germinación (%IG) fueron mayores al 80%, lo que indica que se obtiene un material estabilizado y libre de metabolitos fitotóxicos. De esta manera, se demuestra que la utilización de digestato, como acelerador biológico de la degradación de rastrojo de trigo, es una alternativa viable para evitar la quema del residuo, reduciendo el tiempo de estabilización y maduración del material en el proceso de descomposición.

Palabras claves: Actividad biológica, Concentración de digestato, Relación C/N, Descomposición, Tamaño de partícula.

ABSTRACT

In Chile is used 690,000 cereals hectares are produced annually, which have a potential of 3.4×10^6 tons of stubble. Due to large amounts of stubbles generated, alternative uses to this material is yet expensive and complex and direct burning to eliminate them. This situation produces environmental damage, polluting the air and reducing the levels of organic matter in the soils. In this work it was evaluated the usage of digestate, a co-product obtained in the biogas production, in order to judge its potential biological biodegradation on wheat stubble. Eight treatments with three repetitions each were established. They evaluated two variables: the initial size of the stubble and the digestate concentration. For the first variable, two size of particles were determined, larger than 20 centimeters and smaller than 8 centimeters; as for the second variable, four digestate concentrations were considered (%v/v): 0 - 30 - 60 y 100 %, applying a concentration of 20 m^3 per hectare equal to 8.5 tons per hectare of wheat stubble. In raw materials and products obtained in each treatment, several parameters such were analysed: pH, C.E, moisture content, organic matter content, C/N relation, total nitrogen, organic carbon content, bulk density, phytotoxicity and biological activity. At the end of the test, the particle size distribution.

Results indicate that the difference in the particle size of the wheat stubble initially defined, does not affect the level of degradation of the materials treated with digestate. However, treatments with concentrations of 60% and 100% digestate had higher degradative progress in relation to the treatments with 30% of digestate concentration. In addition, it was observed that the distribution of particle size for the products degraded with digestate was concentrated among small and medium sieves, constituting an 80% of particles smaller than 2 mm. In all treatments the initial C/N relation of the stubble decreases, reaching lower values than 24/1 in those treated with digestate. In the germination bioassays, in all the treatments, germination rates (%IG) are higher than 80%. This indicates that a stabilized and free of phytotoxic metabolites material is obtained. Thus, it is shown that the use of digestate as a biological accelerator of degradation in wheat stubble, is a viable alternative to avoid burning the waste by reducing the stabilization and maturation time of the material in the decomposition process.

Key words: Biological activity, Digestate concentration, C/N relation, Decomposition, Particle size.

INTRODUCCIÓN

El mercado del trigo (*Triticum aestivum L.*) ha tenido un papel fundamental en la economía agrícola, tanto en Chile como en el resto del mundo, siendo el principal cereal cultivado a nivel nacional, con un total de 1.474.662 toneladas en la temporada 2012/13, equivalente al 32% de la producción agrícola del país (INE, 2012). Esto, debido básicamente a su gran capacidad adaptativa hacia los diversos ecosistemas y al alto nivel nutricional que representa para la alimentación del ser humano (Avendaño, 2002).

Actualmente, Chile consume un total de 150 kilogramos de trigo por habitante en un año, llegando a ser uno de los más elevados a nivel mundial, representando el 40% de las calorías presentes en la dieta nacional (Jobet, 2003).

El gran consumo de trigo en el ámbito nacional, lo ha llevado a ser categorizado como un cultivo tradicional en la agricultura chilena (Ocampos et al., 2008). Sin embargo, las prácticas agrícolas modernas no han podido solucionar el efecto secundario que se genera en la producción de esta biomasa, en donde según Evans (1993) los índices de cosecha de los diversos cultivos no superan el 50%. Por lo tanto, la cantidad de residuo que queda en los suelos agrícolas es mayor al que se cosecha. Esto significa que, en los cultivos de trigo, por cada tonelada de grano producido, quedan en los terrenos entre 1,2 y 1,4 toneladas de rastrojo (Fundación Chile, 2011). Esto se traduce, según los datos entregados por INE (2012), a un rango entre 7,7 y 9 Toneladas de rastrojo de trigo por hectárea, los que al poseer una alta relación C/N, demoran en descomponerse, generando efectos alelopáticos que dificultan la germinación y el desarrollo de los cultivos siguientes (Hetz et al., 2006).

Es por esto que el residuo que queda sobre la superficie de los suelos, posterior a la cosecha, es comúnmente quemado. Esto se hace principalmente para poder despejar el terreno de forma rápida y a un bajo costo, con el fin de realizar actividades de labranza o siembra directa sobre el suelo. No obstante, esta acción genera efectos negativos inmediatos sobre la calidad del aire y el suelo cultivado, mediante el deterioro y la reducción de los niveles de materia orgánica, respectivamente, contribuyendo a la contaminación atmosférica y generando, a largo plazo, daños irreversibles en la fertilidad de los suelos (Lindh, 2004).

En la actualidad, la Región de O'Higgins mantiene un 29% de la población dedicada a la agricultura (CONICYT, 2010), de la cual, un alto porcentaje se especializa en el cultivo de cereales, siendo el trigo el segundo cereal más sembrado en la zona, con una producción de 650 Toneladas en la última temporada (INE, 2012).

La quema de rastrojos en esta región se ha convertido en uno de los principales problemas, en donde más del 85% de los agricultores realizan esta actividad, siendo una de las principales fuentes de emisiones de material particulado y gases de efecto invernadero (GEI) que se le liberan al medio ambiente (INE, 2012).

Estudios tales como los realizados en el “Anteproyecto del plan de descontaminación atmosférica para el valle central de la Región del Libertador General Bernardo O`Higgins” han demostrado que las quemas agrícolas en la región producen más de 2035,9 toneladas de MP10, contribuyendo con más del 26% del total que se libera al aire (SINIA, 2012).

Una forma de evitar las quemas agrícolas es generar una alternativa que provoque una rápida degradación de los residuos orgánicos agrícolas, con el fin de que el material se encuentre en condiciones de ser reincorporado al suelo. Una opción es la utilización de digestato, el cual es un acelerante de la degradación del material orgánico, debido a que mantiene un abundante consorcio de microorganismos especializados en la degradación de moléculas orgánicas, y se obtiene como un co-producto estable y almacenable en la tecnología del biogás, proveniente de digestores anaeróbicos (INN, 2015a).

Basado en los antecedentes entregados, el objetivo de esta investigación es evaluar el uso del digestato, como acelerante de la degradación del rastrojo de trigo. Las características físicas-químicas y biológicas del digestato, favorecen la degradación de los rastrojos de cereales, dejándolos en condición de ser incorporados al suelo. Al evitar la quema de rastrojos, se contribuye a disminuir los gases efecto invernadero que se emiten hacia la atmósfera y se impide que los suelos pierdan su fertilidad.

Objetivo General

Determinar *in situ* la biodegradación de rastrojo de trigo con digestato proveniente de un biodigestor.

Objetivos Específicos

- Evaluar la dosis óptima de digestato para acelerar la degradación de rastrojo de trigo.
- Evaluar y establecer el tamaño de partícula adecuada del rastrojo para optimizar su degradación.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El estudio se realizó entre los meses de septiembre de 2014 y febrero de 2015, en el Módulo Docente para Análisis Ambiental Proyecto MECESUP UCH 303 (Figura 1) y en el Laboratorio de Reciclaje Orgánico, ambos pertenecientes al Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en Santa Rosa 11315, Comuna de La Pintana, Región Metropolitana, a 33°34' de Latitud Sur y 70°38' Longitud Oeste. El digestato utilizado en el ensayo se obtuvo del biodigestor ubicado en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, al igual que el rastrojo de trigo recolectado en los predios de Antumapu en abril de 2014.

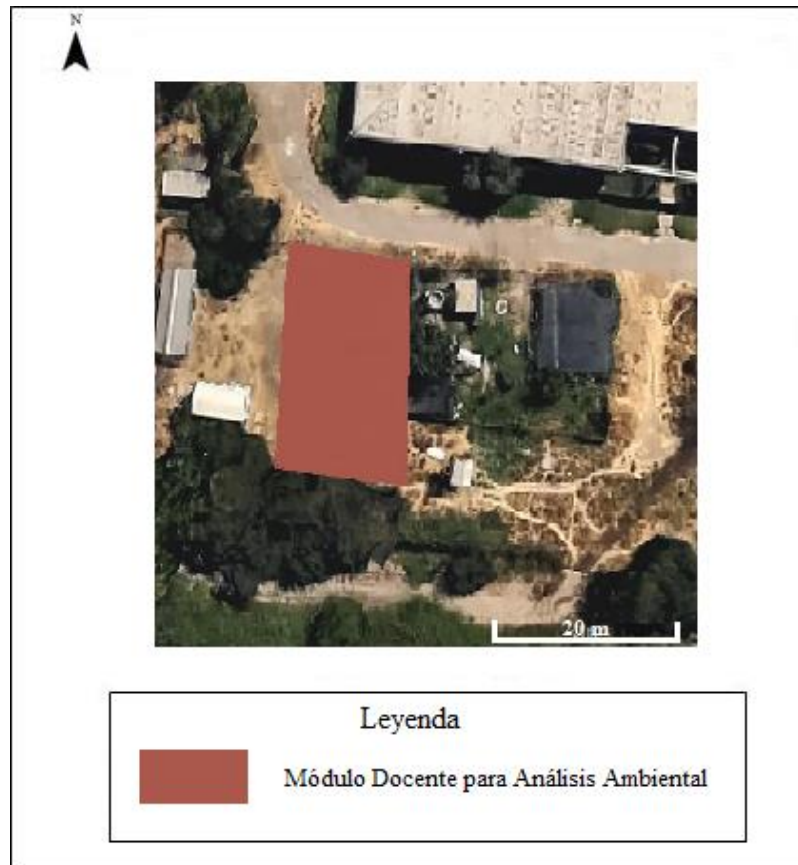


Figura 1. Ubicación espacial del área de estudio.

Método

Diseño del experimento

Se realizaron ocho tratamientos con tres repeticiones cada uno, en los cuales se evaluaron diversas concentraciones de digestato, sobre dos tamaños de rastrojos de trigo (Cuadro 1). Los tratamientos fueron ubicados en veinticuatro parcelas con una dimensión de 1 m², las cuales fueron distribuidas de manera aleatoria con una distancia entre ellas de 50 cm, para prevenir influencias de un tratamiento sobre otro. Para evitar alteraciones de la lluvia sobre el ensayo, en relación a la degradación del rastrojo, se construyó un techo de 20m x 8m x 3,5m, el cual cubrió de manera completa las veinticuatro parcelas. Se asumió que el resto de los fenómenos atmosféricos tales como cambios de temperatura y vientos influyeron de la misma manera sobre el total de las parcelas.

Cuadro 1. Tratamientos con sus respectivas concentraciones y tamaños de rastrojo.

| Tratamiento | Concentración: Digestato (D) + Agua de riego (A) | Tamaño rastrojo (cm) |
|-------------|--|----------------------|
| T1 | 0 % D + 100 % A | ≤ 8 |
| T2 | 30 % D + 70 % A | ≤ 8 |
| T3 | 60 % D + 40 % A | ≤ 8 |
| T4 | 100 % D + 0 % A | ≤ 8 |
| T5 | 0 % D + 100 % A | ≥ 20 |
| T6 | 30 % D + 70 % A | ≥ 20 |
| T7 | 60 % D + 40 % A | ≥ 20 |
| T8 | 100 % D + 0 % A | ≥ 20 |

El suelo del terreno en el cual se realizó el ensayo pertenece a la Serie Santiago, de origen aluvial, clasificado como Entic Haploxeroll según CIREN (1996).

Las parcelas fueron cargadas en su superficie con 0,85 kg de rastrojo de trigo cada una, equivalentes a 8,5 toneladas por hectárea. El total de rastrojo de trigo que se utilizó durante todo el proyecto fue de 20,4 kg para las 24 parcelas.

El proceso de degradación del rastrojo se evaluó una vez por semana, realizando un registro fotográfico para constatar cambios visuales. La frecuencia con que se aplicó la concentración de digestato se determinó la primera semana del ensayo, para establecer un óptimo de humedad de 70%, que favoreciera la actividad y desarrollo de microorganismos aeróbicos y facultativos del medio edáfico. Para esto se utilizó la Ecuación 1.

$$V = \left(\frac{M * R}{T} \right) - M$$

Ecuación 1. Volumen de concentración aplicada a tratamientos.

Donde,

M: Masa de rastrojo de trigo.

R: Porcentaje de sólidos totales de rastrojo de trigo inicial (93,75 %).

T: Porcentaje de sólidos totales de los tratamientos (30 %).

V: Volumen de líquido (agua o digestato) para disminuir % de sólidos totales.

La Ecuación 1 se utilizó para obtener un 70 % de humedad en los tratamientos (adecuada para favorecer la actividad microbiana edáfica aeróbica y facultativa), para lo cual se tuvo que disminuir la concentración de Sólidos Totales de 93,75 % a 30 %. Esto permitió definir un volumen de 2 litros por tratamiento, el cual se aplicó durante el ensayo 3 veces por semana.

Esta Ecuación se aplicó de manera estándar para el total de las concentraciones, debido a la semejanza que posee la densidad del agua de riego con la densidad del digestato. Las mezclas se realizaron utilizando 4 bidones de 200 litros, en los cuales se incorporó las concentraciones indicadas en el Cuadro 1, usando un bidón por concentración.

Variables medidas previas al experimento

Tanto para el rastrojo como para el digestato, al inicio del ensayo, se midieron los parámetros indicados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Caracterización de las materias primas.

| Variables | Rastrojo trigo | Digestato |
|--|----------------|-----------|
| pH | X | X |
| Conductividad eléctrica (dS * m ⁻¹) | X | X |
| Fitotoxicidad (%) | X | X |
| Desprendimiento de CO ₂ (mg de C-CO ₂ * g ⁻¹ M.O. * día ⁻¹) | - | X |
| Contenido de agua (%) | X | X |
| Sólidos Volátiles (M.O.) (%) | X | X |
| Carbono Orgánico (%) | X | X |
| Nitrógeno total (%) | X | X |
| Densidad Aparente (g * mL ⁻¹) | X | - |

Variables medidas después de terminado el experimento

Al finalizar el ensayo, después de los 5 meses de experimento, se realizaron análisis de las propiedades de los diversos tratamientos utilizando las variables indicadas en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Variables medidas posterior al experimento

| Variables | Tratamiento |
|--|-------------|
| pH | X |
| Conductividad eléctrica (dS * m ⁻¹) | X |
| Fitotoxicidad (%) | X |
| Desprendimiento de CO ² (mg de C-CO ₂ * g ⁻¹ M.O. * día ⁻¹) | X |
| Contenido de humedad (%) | X |
| Sólidos Volátiles (M.O.) (%) | X |
| Carbono Orgánico (%) | X |
| Nitrógeno Total (%) | X |
| Densidad Aparente (g * mL ⁻¹) | X |
| Tamaño de partícula (mm) | X |

Parámetros físico-químicos

La metodología utilizada para medir los parámetros físico-químicos de las materias primas y de los tratamientos fueron:

pH. El método que se utilizó para determinar el nivel de pH fue el propuesto por TMECC (2004), a través de un pHmetro.

Conductividad Eléctrica. La Conductividad Eléctrica se evaluó utilizando un conductivímetro previamente calibrado, de acuerdo al método presentado por TMECC (2004).

Fitotoxicidad. Se determinó utilizando una especie vegetal, rabanito (*Raphanus sativus*). Esta especie fue evaluada debido a su sensibilidad, rápido crecimiento, fácil manejo y su gran utilización en la literatura científica. El método empleado fue el planteado por Varnero (2005a) el cual permitió indicar la existencia de sustancias fitotóxicas dentro de la muestra mediante el cálculo del porcentaje de germinación y posterior crecimiento radicular de las semillas incubadas, utilizando el extracto acuoso de rastrojo de trigo, previamente diluido en agua destilada en una relación de 1:5 reposado durante 24 horas, y el extracto de

digestato en concentración de 100%, 60% y 30%, además de un control en base a agua destilada. Los parámetros que se calcularon con la prueba de germinación fueron:

Porcentaje de Germinación relativo (GR):

$$GR(\%) = \frac{NE}{NT} \times 100$$

Donde,

NE: N° de semillas germinadas en el extracto

NT: N° de semillas germinadas en el control a base de agua destilada

Largo de radícula relativo (ER):

$$ER(\%) = \frac{LE}{LT} \times 100$$

Donde,

LE: Largo promedio de radículas en el extracto (cm)

LT: Largo promedio de radículas en el control (cm)

Índice de Germinación (IG):

$$IG = \frac{GR * ER}{100}$$

De acuerdo a los valores obtenidos de Índice de Germinación se pudo determinar el nivel de fitotoxicidad (Cuadro 4).

Cuadro 4. Nivel de fitotoxicidad

| Índice de Germinación | Nivel de Fitotoxicidad |
|-----------------------|--|
| $IG \leq 50$ | Presencia de sustancias fitotóxicas |
| $50 < IG < 80$ | Presencia de sustancias fitotóxicas moderada |
| $IG \geq 80$ | Ausencia de sustancias fitotóxicas |

Actividad Microbiana. Se calculó a través de un ensayo de respirometría, a partir de la cuantificación de desprendimiento de CO₂, según la metodología propuesta por TMECC (2004). Una de las formas utilizadas para medir indirectamente la actividad microbiana de un material, es la cuantificación del desprendimiento de CO₂. Al término del experimento se realizó el ensayo en terreno que consistió en colocar una muestra del material dentro de un tubo cilíndrico sellado herméticamente durante 2 horas.

Para realizar el ensayo de respirometría, se dispuso una muestra de material que ocupara los primeros 5 cm del tubo, colocando posteriormente en el centro un frasco con 10 mL de NaOH 0,3 N. Transcurrido 2 horas, se retiró el frasco del interior del tubo cilíndrico y se le agregaron 2 mL de BaCl₂ al 20% y 3 gotas de Timolftaleína. Titulando finalmente con HCl 0,15 N, hasta observar un cambio en la coloración de azul a incoloro.

De acuerdo con las reacciones químicas ocurridas, la mitad de los mL de HCl 0,15 N utilizados en la titulación corresponden al NaOH 0,3 N que no reaccionó con el CO₂, entonces, por diferencia se obtiene el CO₂ que reaccionó con NaOH. Una vez determinada la cantidad de NaOH que reaccionó con el CO₂, se puede obtener la cantidad de CO₂ que se libera por la acción de los microorganismos.

Contenido de Agua. La medición del contenido de agua se realizó utilizando la metodología TMECC (2004). Para determinar el porcentaje de contenido de agua se colocó una muestra del material dentro de la estufa de secado a 65°C hasta que el material presentó un peso constante. Se calculó la diferencia entre la masa inicial, previa al secado, y la masa final del material que queda luego del proceso, expresando el valor obtenido en porcentaje respecto al material seco.

Sólidos Volátiles. La cantidad de Sólidos Volátiles se calculó mediante la metodología planteada por TMECC (2004). Esto consistió en poner una muestra del material, previamente secado a 65°C, dentro de una mufla a 550°C por 2 horas. Luego se calculó la diferencia entre el peso inicial, previo a la calcinación y el peso final de las cenizas que quedaron luego del proceso; el valor obtenido se expresó en porcentaje.

Carbono Orgánico. La cantidad de Carbono Orgánico se obtuvo dividiendo el valor calculado de Sólidos Volátiles por 1,8.

Nitrógeno Total. Los valores de Nitrógeno Total se obtuvieron del análisis realizado en el laboratorio AGROLAB, utilizando la metodología de TMECC (TMECC, 2004).

Densidad Aparente. Para determinar la densidad aparente, se tomó una muestra del material de 50 cm³, el cual se introdujo dentro de un cilindro graduado de 50 cm³ previamente pesado. El material se depositó hasta llenar la capacidad máxima del cilindro, sin compactar: luego se calculó la diferencia entre la masa inicial del cilindro y la masa final del cilindro llenado con el material.

Tamaño de partícula. Para determinar la distribución del tamaño de partículas del rastrojo de trigo, se extrajo una muestra de 100 g por cada tratamiento. El material se colocó en un conjunto de tamices, unidos de manera vertical, partiendo desde la parte superior con el tamiz de mayor abertura y terminando en la parte inferior con el tamiz de abertura más pequeño. Posteriormente, el conjunto de tamices se situó en un agitador durante 120 segundos, para posteriormente pesar el contenido de material encontrado en cada tamiz. Cada fracción se expresó porcentualmente en base a la masa total.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de dos vías, utilizando los datos de concentración de digestato y tamaño del rastrojo (4 concentraciones x 2 tamaños de rastrojo x 3 repeticiones), utilizando un nivel de significancia de un 5%. Cuando se observaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey con un nivel de significancia de un 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros físico-químico-biológicos previos al experimento

Se realizó un análisis de las materias primas (Rastrojo de Trigo y Digestato), con el fin de conocer el estado de cada material previo a la realización del ensayo. Los resultados obtenidos se presentan en los cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Caracterización físico-química de rastrojo de trigo.

| Variables | Rastrojo Trigo |
|---|----------------|
| pH | 5,83 |
| Conductividad eléctrica (dS*m ⁻¹) | 2,86 |
| Contenido de agua (%) | 6,25 |
| Relación C/N | 99,76 |
| Sólidos Volátiles (M.O.) (%) | 93,37 |
| Carbono Orgánico (%) | 51,87 |
| Nitrógeno total (%) | 0,52 |
| Densidad Aparente (g*mL ⁻¹) | 0,02 |
| Fitotoxicidad (I.G) (%) | 7 |

El rastrojo de trigo presenta un pH moderadamente ácido. La conductividad eléctrica indica que este material es levemente salino, por lo que puede generar algún grado de restricción en el rendimiento de cultivos muy sensibles, siendo recomendado un máximo de aplicación en el terreno menor a 8 litros/m² (Anexo 1). La humedad que presenta (6,25 %) está por bajo el nivel normal (10-12 %) según datos de Varnero (2005a), atribuible al tiempo expuesto al sol después de la fecha de cosecha. El contenido de materia orgánica es alto (93,37 %), con una concentración de nitrógeno bajo (0,52), similar a otros cereales, tales como maíz, cebada, arroz y avena (Varnero, 2005b). La relación carbono/nitrógeno del rastrojo es elevado, lo que puede generar una inmovilización del nitrógeno hacia los microorganismos, influyendo en una lenta descomposición. El valor obtenido como índice de germinación indica que este residuo presenta un nivel de fitotoxicidad severo (Cuadro 4), pudiendo afectar la germinación de ciertos cultivos (Cuadro 5).

Cuadro 6. Caracterización físico-química del Digestato.

| Variables | Digestato |
|---|-----------|
| pH | 6,6 |
| Conductividad eléctrica (dS*m ⁻¹) | 1,8 |
| Contenido de agua (%) | 97,01 |
| Carbono Orgánico (%) | 33,18 |
| Nitrógeno total (mg*L ⁻¹) | 227 |
| Desprendimiento de CO ₂ (mg de C-CO ₂ *g ⁻¹ M.O.*día ⁻¹) | 0,21 |
| Sólidos Volátiles (M.O.) (%) | 59,73 |
| Densidad Aparente (g*mL ⁻¹) | 0,99 |
| Fitotoxicidad (I.G) (%) | 36,77 |

El contenido de materia orgánica que posee el digestato es cercano al 60 %, lo cual se encuentra dentro de los rangos aceptados por la Norma Chilena de calidad de digestato 3375 (INN, 2015a). El pH que presenta el material es ligeramente ácido y la conductividad eléctrica indica que no es salino, por lo tanto, puede ser utilizado en actividades agrícolas sin ningún tipo de restricción. El material presenta un desprendimiento de CO₂ de 0,21 mg de C-CO₂ * g⁻¹ M.O. * día⁻¹, lo cual indica que se encuentra estable según los rangos de aceptación de la Norma Chilena de Compost 2880 (INN, 2015b). De acuerdo a los datos de fitotoxicidad (Cuadro 4), el digestato presenta un índice de germinación menor al 50 %, lo que indicaría que el material presenta sustancias fitotóxicas, que pueden generar efectos negativos sobre la germinación y crecimiento de ciertos cultivos (Cuadro 6).

Parámetros físico-químicos de los tratamientos

pH

Los valores de pH medidos en los tratamientos indican que el incremento de la concentración de digestato eleva los valores de pH desde ácido a levemente alcalino. El rastrojo inicial mantenía un pH de 5,82, lo que indica que este residuo se encontraba con un pH moderadamente ácido. Al término del experimento el pH aumento en los 8 tratamientos, superando la neutralidad levemente. Los valores de pH obtenidos al final del ensayo fueron de 7,28 para T1, 7,49 para T2, 7,56 para T3, 7,74 para T4, 7,02 para T5, 7,45 para T6, 7,53 para T7 y 7,62 para T8 (Figura 2).

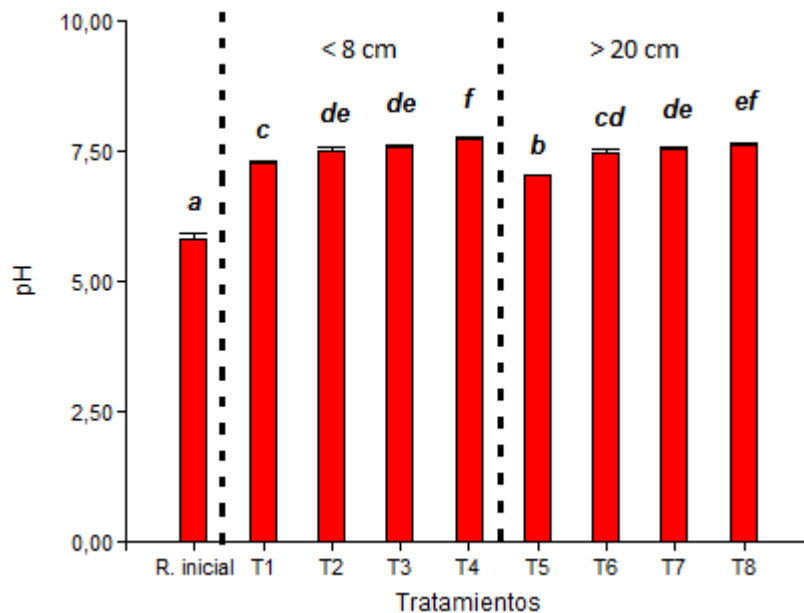


Figura 2. Resultados de pH en los tratamientos al finalizar el ensayo. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor $< 0,0001$, demostrándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 1).

El aumento de pH en los tratamientos, comparándolo con el rastrojo inicial, se atribuye a la acción de los microorganismos en la descomposición del rastrojo de trigo, los cuales, mediante la desintegración de los ácidos orgánicos en el proceso de degradación del material, generaron una disminución de la acidez en los tratamientos y por efecto un aumento en el pH (Suarez, 1993).

Por lo tanto, se puede asumir que los tratamientos T4 y T8 son los que tuvieron un mayor avance en la degradación del material, debido a que lograron la mayor diferencia de pH en comparación con el rastrojo inicial.

De acuerdo a lo mencionado por Garrido (1994), los cultivos tienen un mejor desarrollo en suelos con valores de pH cercano a la neutralidad, debido a que bajo estas condiciones los elementos nutritivos tales como el nitrógeno y potasio se encuentran fácilmente disponibles para las plantas. Además, Wild (1992) indica que los suelos que poseen valores de $\text{pH} < 5,0$ inciden en una baja descomposición de la materia orgánica, no así en suelo que poseen valores más altos de pH.

Los valores de pH obtenidos en los tratamientos indican que se encuentran dentro de los rangos para ser considerados un abono óptimo para el uso en los cultivos, ya que se encuentran cercanos a la neutralidad, manteniendo valores de pH que fluctúan entre 7 y 7,7. Además, según la Normativa Chilena de Compost (INN, 2015b), los tratamientos cumplen con los valores para ser considerado como un material estabilizado, la cual exige valores de pH entre 5,5 y 8,5.

Conductividad Eléctrica

En la Figura 3 se observa una disminución de la conductividad eléctrica en los 8 tratamientos, al término del experimento. Esto en relación a la medición realizada al rastrojo previo al ensayo, el cual presentó el valor más alto de salinidad, con una conductividad eléctrica de $2,89 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. De los 8 tratamientos, T1 fue el que obtuvo un menor grado de salinidad, con un valor de conductividad eléctrica de $1,46 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, seguido de T5, con un valor de $1,90 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, T2, T3, T4, T6, T7 y T8 obtuvieron una conductividad eléctrica de $2,25 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, $2,33 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, $2,68 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, $2,44 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, $2,55 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y $2,76 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ respectivamente. El incremento de la conductividad eléctrica, dentro de los tratamientos con un mismo tamaño de rastrojo, coincidió con las concentraciones de digestato aplicado en cada uno de ellos.

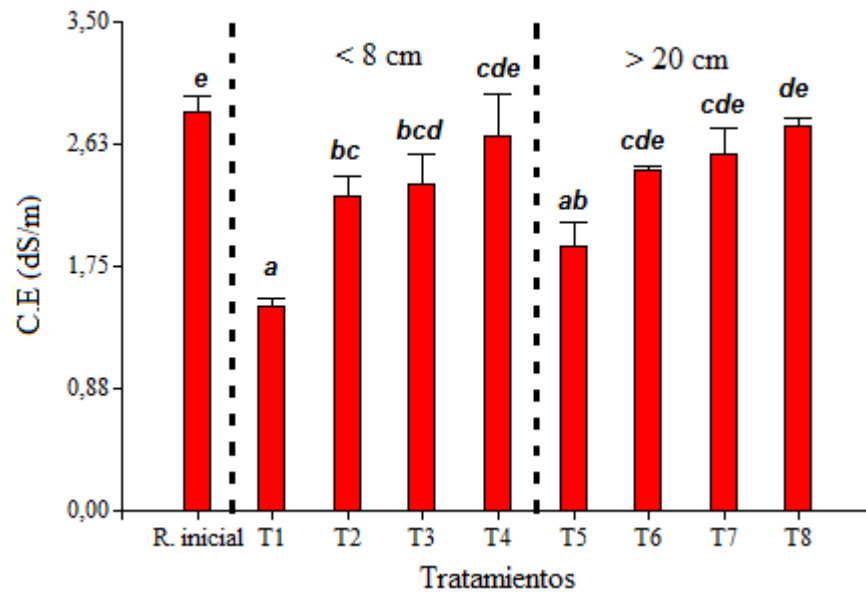


Figura 3. Valores de Conductividad eléctrica (C.E) de los tratamientos al término del ensayo. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor $< 0,0001$, demostrándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 2).

En los tratamientos se pudo identificar que T1 y T5 fueron los que tuvieron una menor salinidad con respecto a los otros tratamientos. Esto se puede atribuir al manejo que se realizó a los 2 tratamientos, en base a aplicaciones de 100% agua de riego, lo que permitió lavar en parte las sales presentes en el rastrojo, disminuyendo sus niveles de salinidad, obteniendo los valores más bajos de conductividad eléctrica en comparación a los otros tratamientos.

El descenso de salinidad obtenido en los tratamientos, en relación al rastrojo inicial, coinciden con la concentración de digestato que se incorporó en cada tratamiento. Esto quiere decir que la variación de la concentración de digestato influyó en los valores de conductividad eléctrica que presentaron los tratamientos al término del ensayo.

Según los datos entregados por Hogg et al. (2002), la cantidad de compost que se puede incorporar a un suelo depende de la salinidad del abono y de la tolerancia a la salinidad del cultivo que se plantara en el terreno (Anexo 1).

Conforme a lo indicado en el Anexo 1, la cantidad máxima de litros que pueden ser incorporados en los terrenos, de acuerdo a la conductividad eléctrica obtenida en los tratamientos al término del ensayo, es de 15 litros \cdot m⁻² para T1 y T5 en terrenos con plantas sensibles y de 60 litros \cdot m⁻² en terrenos con plantas tolerantes. Para el resto de los

tratamientos, la cantidad cambia a 8 litros*m⁻² en terrenos con plantas sensibles y 32 litros*m⁻² en terrenos con plantas tolerantes.

Se debe considerar que los rangos de restricción que muestra el Anexo 1 son efectivos solo cuando se incorpora el abono a una profundidad máxima de 5 cm, puesto que, si la profundidad aumenta a 10 cm, los rangos de tolerancia pueden ser duplicados (Hogg, et al., 2002).

Fitotoxicidad

En el presente estudio se realizó un análisis de fitotoxicidad con el fin de evaluar el nivel de madurez biológica de los tratamientos utilizados en este ensayo. De acuerdo a las indicaciones de Varnero et al. (2007) es importante evaluar la idoneidad de los materiales orgánicos para la agricultura, debido a que la utilización de un material como abono, sin un grado de madurez adecuado, puede generar efectos negativos en los cultivos, debido a la existencia de metabolitos fitotóxicos, los cuales pueden ser generados por un alto contenido de amonio, de ácidos volátiles orgánicos, de metales pesados y de sales.

La realización del análisis fitotóxico, a través del índice de germinación (Figura 4), permitió determinar la toxicidad de los tratamientos, evaluando los niveles de sustancias fitotóxicas que pudieran generar un efecto negativo tanto en la germinación como en el crecimiento de los cultivos.

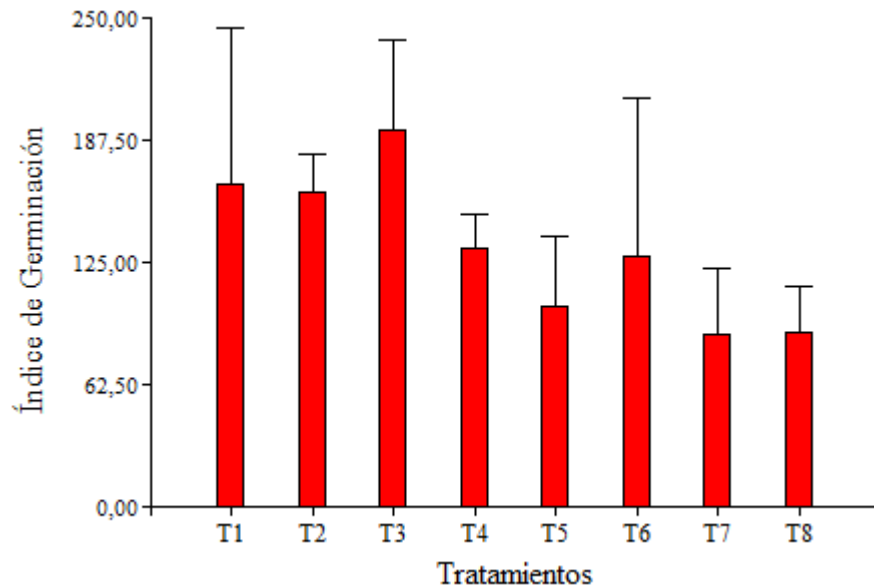


Figura 4. Ensayo de fitotoxicidad realizado a los tratamientos al finalizar el ensayo.

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor de 0,14, demostrándose que no hay diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 3).

Los porcentajes obtenidos de índice de germinación en los tratamientos fueron de 165 % para T1, 160 % para T2, 192 % para T3, 131 % para T4, 102 % para T5, 128 % para T6, 88 % para T7 y 89 % para T8 (Figura 4).

En relación al índice de germinación de todos los tratamientos, se puede destacar que ninguno presenta sustancias fitotóxicas, ya que los valores de %IG obtenidos son mayor al 80 % (Figura 4). De acuerdo a esto, se puede afirmar que la utilización de estos materiales orgánicos, como enmiendas orgánicas en el suelo, no afectarían el desarrollo de los cultivos.

Según la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2015b) la totalidad de los tratamientos cumplen con el porcentaje mínimo requerido (80 %) para ser considerados como materiales libres de metabolitos fitotóxicos.

Actividad microbiana

Los microorganismos heterótrofos del suelo, utilizan la degradación de los residuos vegetales y otros orgánicos para obtener energía, desarrollarse y mantenerse. Durante el proceso de degradación aeróbica del material, los microorganismos respiran constantemente, siendo la tasa de respiración un índice confiable de la tasa de crecimiento de la población de microorganismos descomponedores y de la cantidad de materia orgánica descompuesta, por lo tanto, los factores que afectan al crecimiento de los microorganismos y degradación de la materia orgánica, influyen de la misma manera en la respiración (Guerrero et al., 2012). La Figura 5 presenta el desprendimiento de CO₂ de los tratamientos al término del experimento.

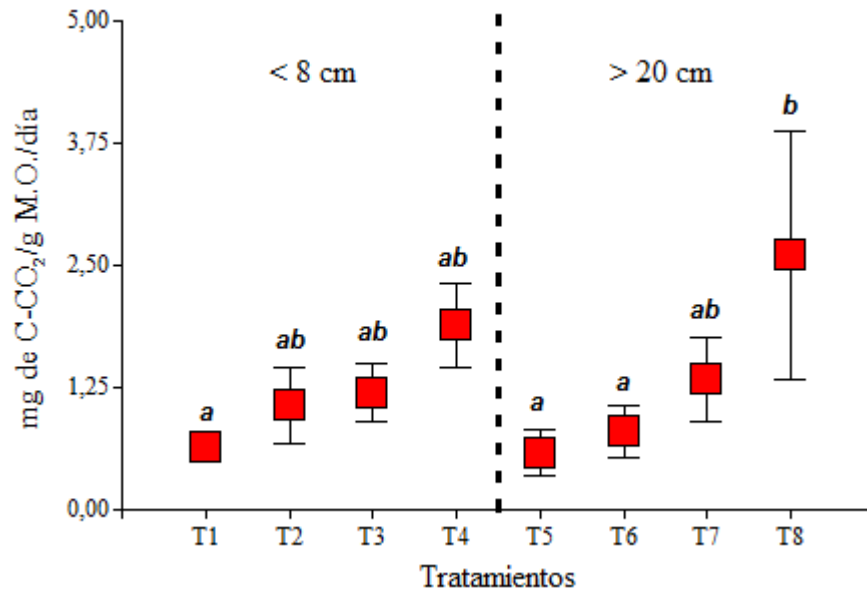


Figura 5. Valores de desprendimiento de CO₂ medidos en los tratamientos al término del ensayo. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor de 0,0047, lo que comprueba la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 4).

El desprendimiento de CO₂ que se obtuvo al finalizar el experimento, mediante el uso de la respirometría, indicó que los 8 tratamientos se encuentran con una baja actividad microbológica, debido a que se encuentran bajo los 8 mg C-CO₂*g⁻¹ MO*día⁻¹, valor que exige la normativa chilena de Compost 2880 (INN, 2015b) para considerar un material maduro y estabilizado, siendo atribuible probablemente al agotamiento de las fracciones orgánicas más lábiles del rastrojo, quedando principalmente fracciones orgánicas más resistentes a la biodegradación y sustancias orgánicas complejas. Los valores obtenidos en mg C-CO₂*g⁻¹ MO*día⁻¹ para los tratamientos fueron de 0,63 en T1, 1,07 en T2, 1,2 en T3, 1,89 en T4, 0,58 en T5, 0,81 en T6, 1,34 en T7 y 2,6 en T8 (Figura 5).

A pesar que todos de los tratamientos se encontraron con una baja actividad microbológica, se destacan por sobre los demás los tratamientos que sólo disponían de agua de riego (T1 y T5). En estos tratamientos, se apreció una mínima descomposición de material, atribuible las características de las fracciones orgánicas del rastrojo de trigo como ligno- celulosa, junto al bajo contenido de N, P, Ca y Mg. Al no disponer de digestato como acelerador de la degradación, se limitó el desarrollo de la población global microbiana, esto considerando que, frente a un elevado contenido de celulosa degradable, la disponibilidad de nitrógeno es un factor limitante para la actividad microbiana celulolítica (Lindh, 2004).

En el caso de los tratamientos restantes, el avance de la degradación estuvo directamente relacionado a la concentración de digestato que se incorporó en cada uno, siendo los tratamientos T4 y T8, los que tuvieron una mayor degradación. Esto fue causado principalmente a la entrega adicional de carbono y nitrógeno otorgado por el digestato, lo que favoreció el crecimiento de los microorganismos y a su vez permitió a estos descomponer aquellos residuos más resistentes de rastrojo de trigo.

Al término del ensayo, la existencia de una baja liberación de carbono en forma de CO₂ en los tratamientos que se aplicó digestato, indicaría un decrecimiento en la población microbiana, alcanzando una fase estacionaria. Esto, debido al agotamiento de stock de materia orgánica fácilmente descomponible por los microorganismos.

Contenido de Agua

En cuanto a la retención de agua en condiciones de campo, la figura 6 presenta los porcentajes de contenido de agua obtenidos en los tratamientos al término del experimento.

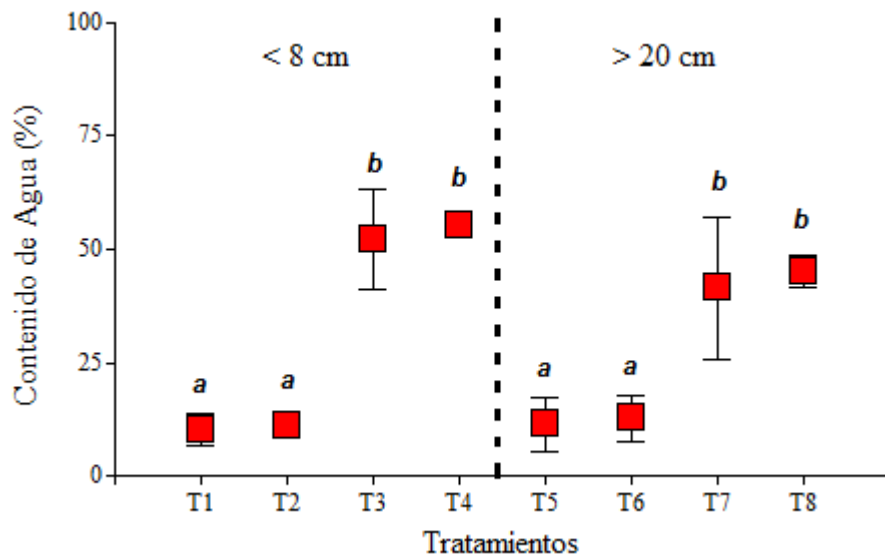


Figura 6. Valores de contenido de agua en tratamientos al finalizar el ensayo. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor de 0,0047, lo que confirma la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 5).

En la Figura 6 se puede observar un incremento de la humedad a medida que aumenta la concentración de digestato, existiendo una diferencia mínima entre T1, T2, T5 y T6, al igual que entre T3, T4, T7 y T8; sin embargo, la diferencia entre estos 2 grupos es notoria, en donde T1, T2, T5 y T6 se encuentran con un 10,1%, 11,2%, 11,4% y 12,7% de agua, respectivamente, mientras que T3, T4, T7 y T8 presentan un porcentaje de agua de 52,1%, 55,3 %, 41,5% y 45,1% respectivamente.

Según Frioni (1990), la humedad óptima con la cual se obtiene la máxima densidad microbiana para la descomposición de la materia orgánica, está entre el 50 y 70 % de la capacidad del material. Esto se considera un parámetro fundamental para mantener la actividad microbiana, dado que el agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, siendo además el medio de transporte de las sustancias solubles que alimentan a las células y de los desechos de las reacciones que se generan durante dicho proceso. Cuando la humedad se encuentra bajo el 30%, la actividad microbiana decrece rápidamente por la falta de agua; por sobre el 70% de humedad el agua desplaza al aire en los espacios libres entre las partículas, disminuyendo el traspaso de oxígeno y favoreciendo el desarrollo de los microorganismos anaeróbicos.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los tratamientos T3 y T4 son aquellos que mantuvieron una humedad dentro los rangos recomendados para el óptimo crecimiento de los microorganismos. Los tratamientos T7 y T8, a pesar de no estar dentro de los rangos recomendados, no se consideran como un material que posee una baja actividad microbiana, dado que superan el 30% de humedad, llegando a estar muy cerca al 50% de humedad recomendado. Los tratamientos T1, T2, T5 y T6 poseen un bajo contenido de agua, encontrándose por bajo el 30% de humedad, por lo tanto, la ausencia de humedad en estos tratamientos es uno de los factores que pudo afectar la acción de los microorganismos en la descomposición del material.

Sólidos Volátiles (M.O)

El contenido de materia orgánica que presentaba el rastrojo de trigo antes de comenzar el ensayo era de 93,4%. Posterior a los 5 meses de ensayo, se obtuvo una disminución de materia orgánica en todos los tratamientos conforme aumentaba la concentración de digestato incorporado en cada uno. En la Figura 7 es posible observar la tendencia existente con respecto a la disminución de contenido de materia orgánica en los tratamientos. Los valores de materia orgánica que alcanzaron los tratamientos al término del experimento fueron de 75,6% para T1, 55,2% para T2, 42,7% para T3, 41% para T4, 92,6% para T5, 57,9% para T6, 46,9% para T7 y 42,7% para T8.

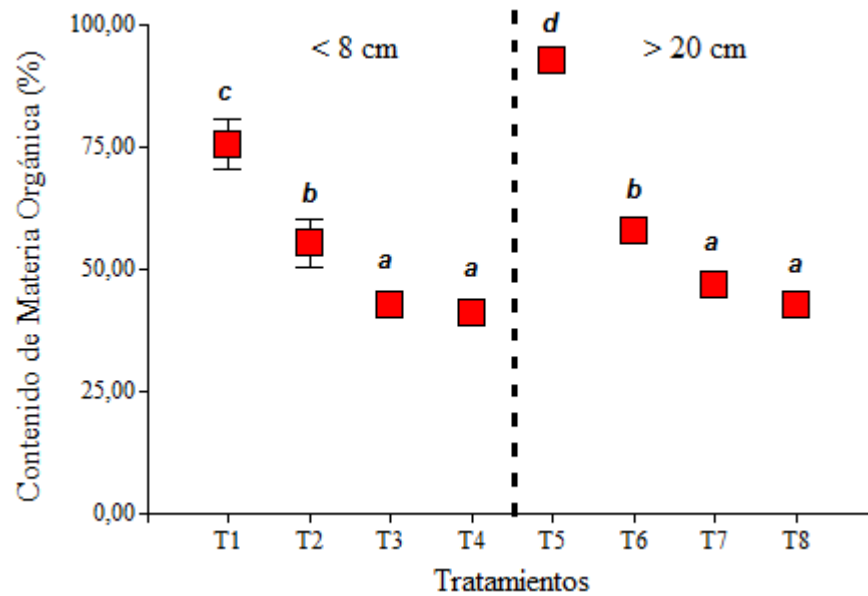


Figura 7. Valores obtenidos de materia orgánica en tratamientos con distinto tamaño de rastrojo y dosis de digestato. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor $< 0,0001$, corroborándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 6).

La disminución del contenido de materia orgánica se atribuye principalmente a la actividad microbiana que se genera en los tratamientos, los cuales descomponen las moléculas orgánicas y reducen el porcentaje de materia orgánica en los residuos (Suárez, 2012).

Los tratamientos a los cuales se ejerció un mayor poder degradativo por parte de los microorganismos fueron aquellos tratados con una concentración de 60 y 100% de digestato, correspondiendo a los tratamientos T3, T4, T7 y T8, con un porcentaje de materia orgánica que declinó de 93,4% hasta llegar a 42,6, 41, 46,9 y 42,7%, respectivamente.

En el caso de los tratamientos T1 y T5, estos no tuvieron una gran disminución de contenido de materia orgánica, debido principalmente a la baja actividad microbiana que se generó en estos tratamientos. Esto se debe a la dificultad por parte de los organismos para descomponer el material, por su alto contenido de lignina y por la ausencia del aporte externo de nitrógeno que entregaba el digestato.

Según Jenkinson (1992), la materia orgánica que se tritura en partículas pequeñas es más degradable que la materia gruesa, debido a que los trozos más pequeños tienen una mayor superficie expuesta al ataque de los microorganismos. De acuerdo a esto, los tratamientos

con un tamaño de rastrojo menor a los 8 cm, tuvieron una mayor degradación en comparación con los tratamientos con un tamaño de rastrojo mayor a 20 cm. Esto resultó más evidente en los tratamientos que fueron tratados solo con agua, en donde se pudo observar que el tratamiento T1 tuvo una mayor degradación que el tratamiento T5, debido a que tenía una mayor área de contacto por parte de los microorganismos, bajando de un 93,4% de contenido de materia orgánica a un 75,6%; para el tratamiento T5 se obtuvo una disminución desde los 93,4% a 92,6%.

De acuerdo a la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2015b), los materiales deben tener un contenido de materia orgánica igual o superior al 20%. Como se aprecia en la Figura 7, todos tratamientos cumplen con los requerimientos exigidos por la normativa.

Carbono Orgánico (CO)

Al inicio del experimento, el rastrojo presentaba un contenido de carbono orgánico de 51,9%. Este porcentaje varió al finalizar el experimento, tendiendo a una disminución a medida que se incrementaba la concentración de digestato. Los valores obtenidos para los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8 fueron de 42%, 30,7%, 23,7% y 21,5%, 51,45%, 32,18%, 26,03% y 21,68%, respectivamente (Figura 8).

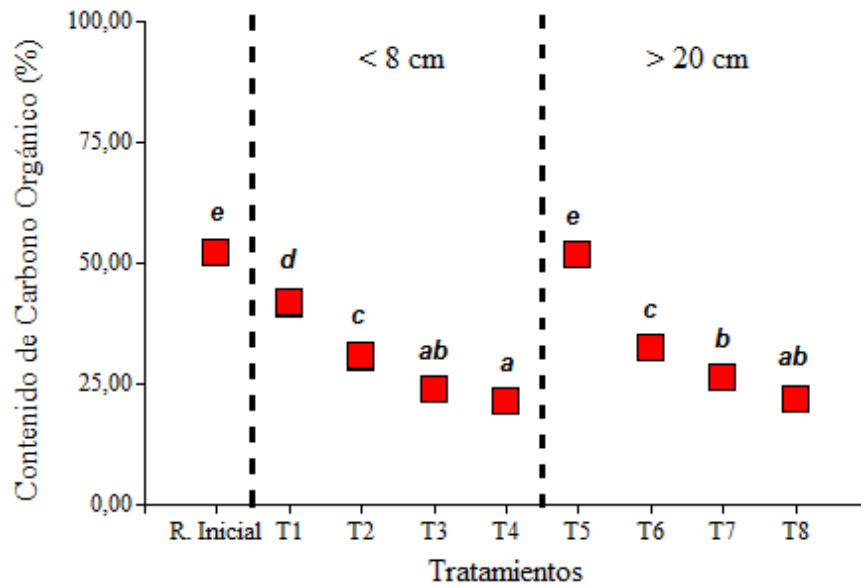


Figura 8. Contenido de Carbono Orgánico en tratamientos al término del ensayo. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor $< 0,0001$, comprobándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 7).

De acuerdo a lo indicado por Varnero (1992), la disminución del carbono orgánico está asociada a la degradación del material, debido a que el carbono orgánico es utilizado por los microorganismos como fuente de energía en el proceso de biodegradación oxidativa de las moléculas orgánicas.

En base a lo mencionado anteriormente, los tratamientos T4 y T8 fueron los que tuvieron un mayor avance degradativo, debido a que presentaron una mayor disminución de contenido de carbono orgánico con respecto al rastrojo inicial, siendo estos tratamientos los que alcanzaron una mayor estabilización del residuo.

Los tratamientos que obtuvieron una menor pérdida de carbono orgánico fueron los tratamientos T1 y T5, los cuales fueron regados durante el experimento solo con agua, siendo esto insuficiente para generar las condiciones necesarias que permitieran a los microorganismos acelerar la degradación del material.

Sin embargo, la disminución de contenido de carbono orgánico con respecto al rastrojo inicial fue mucho menor en T5, llegando a perder solo un 0,42% de carbono orgánico durante el experimento, en donde T1, bajo las mismas condiciones, tuvo una pérdida de contenido de carbono orgánico de 9,89%. Esto demuestra que en ausencia de digestato, es recomendable triturar el material, debido a que las partículas pequeñas se degradan más rápido, dado que se aumenta la superficie de ataque de los microorganismos degradadores, acelerando el proceso de descomposición del residuo.

Nitrogeno total

Los porcentajes obtenidos de nitrógeno indican que el rastrojo inicial, previo al experimento, presentaba un porcentaje de nitrógeno de 0,52%. Este valor aumentó al término del ensayo en todos los tratamientos, excepto en T5, el cual mantuvo el mismo porcentaje de nitrógeno. Los contenidos de nitrógeno de los tratamientos al finalizar el experimento fueron de 0,69% para T1, 1,67% para T2, 1,86% para T3, 1,87% para T4, 0,52% para T5, 0,95% para T6, 1,08% para T7 y 1,23% para T8 (Figura 9).

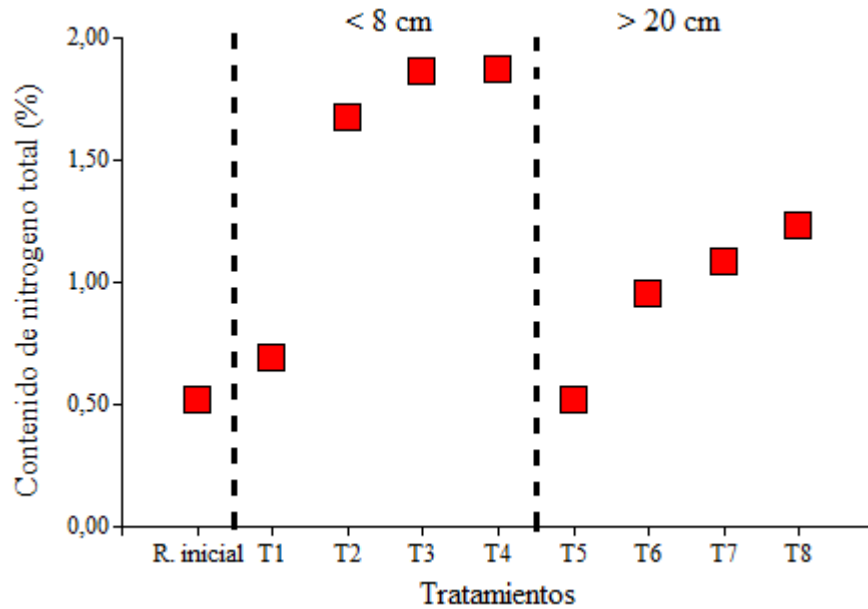


Figura 9. Resultados de contenido de nitrógeno total en el rastrojo de trigo al inicio del ensayo y en los tratamientos al término del ensayo.

El nitrógeno normalmente es un factor limitante en la descomposición de los residuos, afectando el desarrollo de los microorganismos y la mineralización del carbono (Heal et al., 1997). Kumar y Goh (2000) indican que altos contenidos de nitrógeno favorecen la degradación de los residuos y su posterior liberación de nutrientes. No obstante, en los residuos que poseen un bajo contenido de nitrógeno, al inicio de la descomposición, cuando no se les adiciona nitrógeno mineral, aumentan los niveles de nitrógeno orgánico, debido probablemente a la inmovilización del nutriente por parte de los microorganismos. Esto es utilizado como nitrógeno disponible por la sucesión de microorganismos, quedando en forma de nitrógeno biomásico (Williams y Gray, 1974).

Debido al bajo porcentaje de nitrógeno que mantenía el rastrojo inicial, los microorganismos debieron probablemente realizar el proceso de inmovilización para disponer de fuentes nitrogenadas que permitieran llevar a cabo su síntesis protoplasmática. Este proceso fue mayor en T3, T4 y T8, permitiendo que los tratamientos tuvieran un mayor desarrollo y crecimiento de actividad microbiana, y por ende una mayor aceleración de degradación del residuo.

Los valores más bajos de contenido de nitrógeno se encuentran en los tratamientos T1 y T5, los cuales fueron tratados solo con agua, manteniendo niveles de degradación mínimos al finalizar el experimento.

Al comparar T1 y T5, se puede observar que, si bien ambos tuvieron los más bajos niveles de nitrógeno, el tratamiento T1 tuvo un aumento de contenido de nitrógeno al finalizar el experimento, lo cual no sucedió con el tratamiento T5, manteniendo un porcentaje de

contenido de nitrógeno igual al rastrojo inicial. Esto indicaría que en ausencia de digestato, el largo del rastrojo influye en la degradación que puedan generar los microorganismos al residuo, siendo la degradación más eficiente en rastrojos con un largo de partícula menor a 8 cm.

De acuerdo a la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2015b), los tratamientos cumplen con el contenido de nitrógeno mínimo exigido para ser considerado un material estabilizado.

Relación Carbono/Nitrógeno

El rastrojo inicial que se utilizó para realizar el experimento presentaba una relación carbono/nitrógeno de 99/1. Al finalizar el ensayo, los tratamientos variaron sus valores de relación carbono/nitrógeno en proporción a la variación de la concentración de digestato, obteniéndose para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8 una relación carbono/nitrógeno de 61/1, 18/1, 13/1, 11/1, 99/1, 34/1, 24/1 y 18/1, respectivamente (Figura 10).

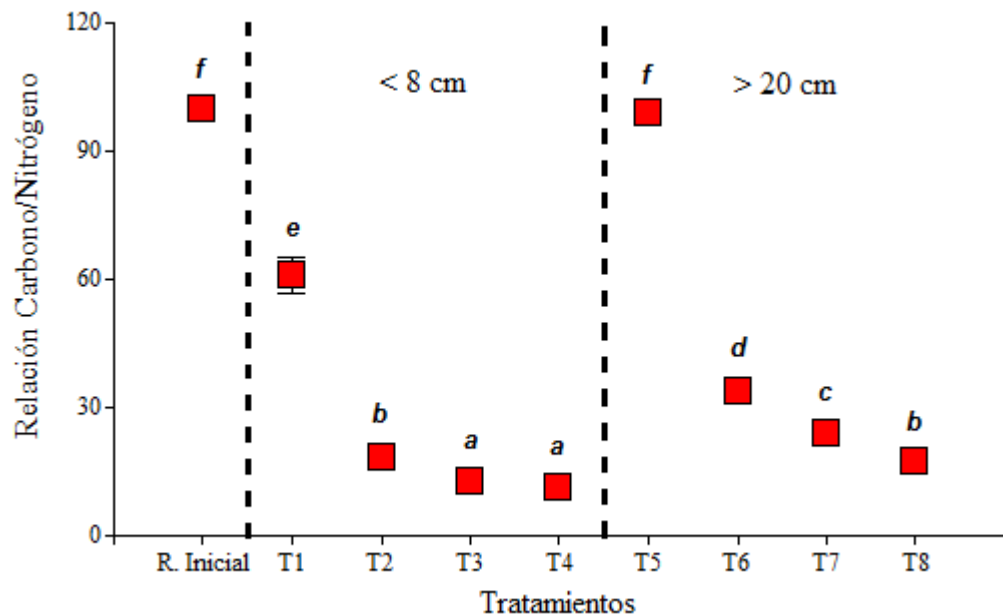


Figura 10. Valores de relación Carbono/Nitrógeno (C/N) de los tratamientos al finalizar el experimento. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor $< 0,0001$, demostrándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 8).

Es generalmente aceptado que residuos que poseen una alta relación carbono/nitrógeno se degradan más lentamente que residuos con una baja relación carbono/nitrógeno. Esto se debe a que los microorganismos que se encuentran en residuos con una baja relación C/N reducen la competencia por el nitrógeno, aumentando considerablemente la descomposición del material (Kumar y Goh, 2000).

Según Matus (1994), la inmovilización de nitrógeno durante la descomposición del residuo se genera con una alta relación C/N, retardando la degradación de dicho residuo, debido a la ausencia de nitrógeno, el cual es requerido por los microorganismos para la generación de nuevas células. En consecuencia, se puede decir que mientras menor sea la descomposición del residuo, menor disminución de carbono habrá, y por ende menor será la disminución de la relación carbono/nitrógeno.

Los tratamientos que tuvieron una mayor descomposición de materia orgánica durante el experimento fueron T2, T3, T4 y T8, los cuales disminuyeron entre un 82,4 a 88,5% su relación carbono/nitrógeno con respecto al rastrojo inicial, lo que se traduce en un mayor aprovechamiento, por parte de los microorganismos, en la utilización de los compuestos orgánicos del material.

Los tratamientos que presentaron la menor degradación de material fueron T1 y T5, disminuyendo su relación carbono/nitrógeno un 39,9 y 0,82 %, respectivamente, con respecto al rastrojo inicial. Esta baja disminución de la relación C/N se atribuye a la complejidad del residuo para ser degradado, debido a su alto contenido de lignina y a la baja cantidad de nitrógeno que posee el material.

Con respecto al tamaño de partícula, se puede apreciar que aquellos tratamientos que fueron inicialmente chipiados para obtener un largo de rastrojo menor a 8 cm, tuvieron una mayor degradación que aquellos tratamientos con un largo de rastrojo mayor a 20 cm, siendo esto más evidente en los tratamientos T1 (tratamiento menor a 8 cm) y T5 (tratamiento mayor a 20 cm), observándose una diferencia entre T1 y T5, con respecto a la relación carbono/nitrógeno, de 39,08%.

Según la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2015b), los tratamientos deben presentar una relación carbono/nitrógeno menor o igual a 30/1 para ser considerado como un compost estabilizado. Como se puede observar en la Figura 10, todos los tratamientos cumplen con la normativa exigida, excepto T1, T5 y T6, siendo estos tratamientos los que sufrieron la menor degradación durante el ensayo, siendo considerados como materiales inmaduros.

Densidad Aparente

La densidad aparente que alcanzaron los tratamientos al finalizar el ensayo varió en proporción a la concentración de digestato que se incorporó en cada uno. La densidad aparente que presentó el rastrojo inicial fue de 0,02 g/mL, aumentando este valor en todos los tratamientos al término del experimento. Los valores finales que obtuvieron los tratamientos fueron de 0,05 g/mL en T1, 0,21 g/mL en T2, 0,25 g/mL en T3, 0,29 g/mL en T4, 0,05 g/mL en T5, 0,09 g/mL en T6, 0,17 g/mL en T7 y 0,21 g/mL en T8 (Figura 11).

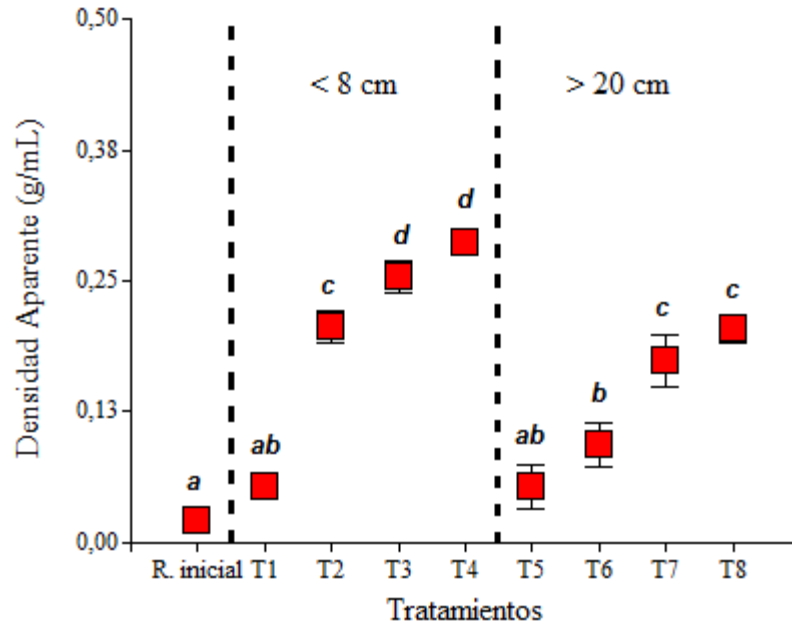


Figura 11. Valores de Densidad aparente en los tratamientos al término del ensayo. Letras en común indican que no existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($P \leq 0,05$).

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor $< 0,0001$, corroborándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos (Apéndice 9).

Chávez y Gordillo (2010) indican que un material, para ser considerado estabilizado, debe presentar una densidad aparente entre 0,4 y 0,7 g/mL, lo cual está influenciado por la humedad, el tamaño de las partículas, el contenido de materia orgánica y su grado de descomposición. Además, señalan que la densidad aparente se incrementa con el tiempo de compostaje, como consecuencia del aumento de la descomposición y disminución del tamaño de las partículas.

Los tratamientos T2, T3, T4, T7 y T8 obtuvieron los valores más altos de densidad aparente, alcanzando, según lo antes mencionado, un mayor grado de descomposición y de

disminución de tamaño de partículas; sin embargo, no lograron el valor mínimo para ser considerados como materiales estabilizados.

Los valores obtenidos en los tratamientos T1, T5 y T6, indican una mínima variación de densidad aparente en relación al valor obtenido del rastrojo inicial, lo que señalaría, según este parámetro, una baja degradación del material, además de una mínima disminución del tamaño de las partículas.

De acuerdo a la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2015b), los tratamientos deben tener valores de densidad aparente menor o igual a 0,7 g/mL, para ser considerado como compost maduros. Según los valores obtenidos en este ensayo, todos los tratamientos cumplen con el rango exigido por esta norma.

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula que se obtuvo al finalizar el experimento en los tratamientos, disminuyó a medida que se incrementaba la concentración de digestato que se incorporaba en cada uno. Los valores obtenidos, con respecto a la distribución de partículas acumuladas entre los tamices pequeños y medianos, fue de 63% para T1, 77% para T2, 83% para T3, 87% para T4, 15% para T5, 63% para T6, 88% para T7 y 90% para T8 (Figura 12).

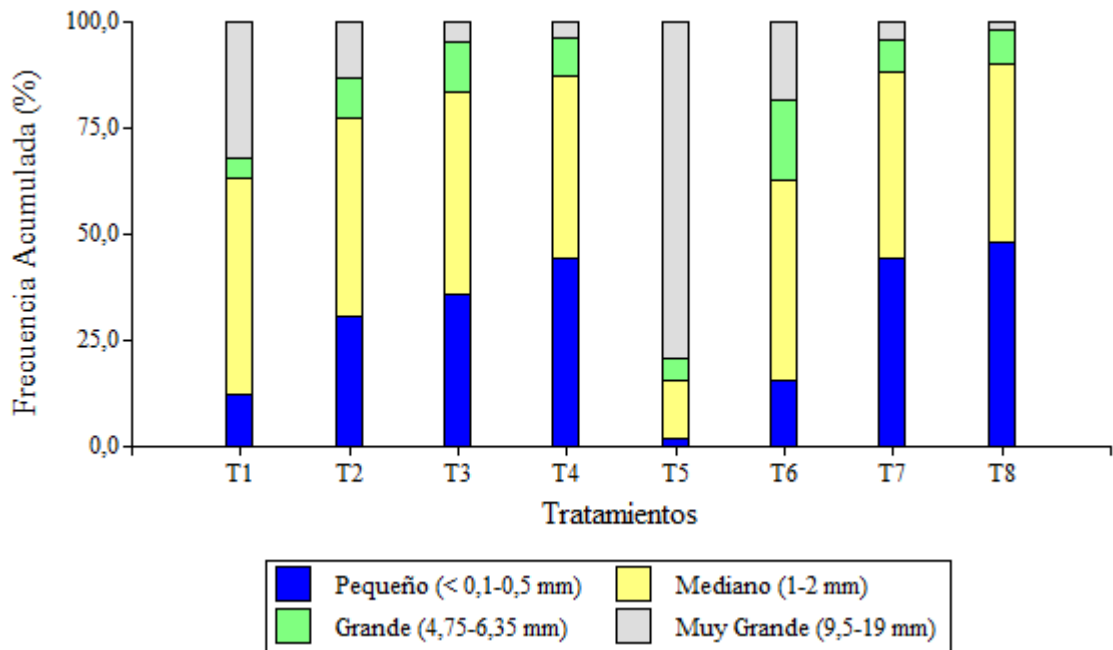


Figura 12. Distribución de tamaño de partículas en función de abertura de tamiz en los tratamientos al finalizar el ensayo.

Se realizó un ANDEVA para los tratamientos con un nivel de significancia de 5%, obteniendo un p-valor de 0,0001 en el grupo de tamices pequeños, 0,002 en el grupo de tamices medianos, 0,0291 en el grupo de tamices grandes y $< 0,0001$ en el grupo de tamices muy grandes, demostrándose la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos en cada grupo de tamiz (Apéndice 10).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el experimento, los tratamientos que fueron regados con digestato obtuvieron una mayor distribución de partículas entre los tamices pequeños y medianos, siendo esto más notorio en los tratamientos T3, T4, T7 y T8, en los cuales se pudo apreciar una concentración de partículas < 2 mm superior al 80%.

Los tratamientos T1 y T5, los cuales fueron tratados con agua de riego, obtuvieron los porcentajes más bajos con respecto a la distribución de partículas entre los tamices pequeños y medianos. La diferencia en la distribución de partículas menor a 2 mm entre T1 y T4 (ambos pertenecientes al grupo de tratamientos con un largo de rastrojo menor a 8 cm) alcanzó el 24 %, en tanto la diferencia entre T5 y T8 (ambos pertenecientes al grupo de tratamientos con un largo de rastrojo mayor a 20 cm) alcanzó el 75% (Figura 12) (Apéndice 11 y 12).

El tamaño de las partículas del material es una importante variable, dado que indica la optimización del proceso de degradación, debido a que mientras mayor sea la superficie de contacto para el ataque de los microorganismos, más rápido y completo es la descomposición del material (Haug, 1993).

De acuerdo a lo mencionado en el párrafo anterior, se desprende que aquellos tratamientos que tuvieron una mayor distribución de partículas entre los tamices medianos y pequeños, fueron los que tuvieron un proceso de degradación más óptimo, encontrándose los valores más altos en los tratamientos T3, T4, T7 y T8.

CONCLUSIONES

El uso de digestato favorece la degradación del rastrojo de trigo, incrementándose la actividad respiratoria y el contenido total de nitrógeno, acelerándose la descomposición natural del material, generando un producto estable, sin metabolitos fitotóxicos.

La biodegradación se incrementa a mayor concentración de digestato y no se ve afectada por el tamaño de partícula inicial del rastrojo. Esto permitiría omitir el proceso de chipiado, debido al costo económico que conlleva el realizar esta acción.

La utilización de agua de riego en los tratamientos T1 y T5 para la degradación del rastrojo de trigo, no fue eficiente, observándose resultados que dan cuenta de una actividad biológica disminuida, reflejada en la mínima degradación que alcanzaron estos tratamientos al término del ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

Avendaño, M. 2002. Avance genético en parámetros de calidad panadera en trigo (*Triticum aestivum* L.) combinando mejoramiento convencional y selección asistida por marcadores moleculares en poblaciones segregantes. Memoria Licenciado Agrónomo. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. 97p.

Chávez, E. y F. Gordillo. 2010. Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Centro de Investigación Científica y Tecnológica. Guayaquil, Ecuador. 10p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripción de suelos, Materiales y símbolos. (Doc. Tec. N° 115), Santiago, Chile: Centro de Información de Recursos Naturales. 425p.

CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica), Chile. 2010. Región del Libertador Bernardo O'Higgins: Diagnóstico de las Capacidades y Oportunidades de Desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Santiago, Chile: CONICYT. 73p.

Evans, L. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 500p.

Frioni, L. 1990. Ecología microbiana del suelo. Montevideo, Uruguay: Departamento de publicaciones y ediciones de la Universidad de la República. 519p.

FundacionChile. 2011. Cropcheck Chile: Manual de recomendaciones cultivo de trigo. Santiago, Chile: FundacionChile. 46p.

Garrido, S. 1994. Interpretación de Análisis de Suelos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 5(93): 40p.

Guerrero, P.; R. Quintero; V. Espinoza; G. Benedicto y M. Sánchez. 2012. Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de lupinus. Chapingo, Mexico: Terra Latinoamericana. 30(4): 355-362.

Haug, R. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering. Florida, EEUU: Lewis Publishers. 752 p.

Heal, O.; J. Anderson and M. Swift. 1997. Plant Litter Quality and Decomposition: An Historical Overview. Wallingford, UK: CAB International. 30p.

Hetz, E.; J. de la Cerda y M. López. 2006. Disponibilidad de paja en los rastrojos de trigo en tres provincias de Chile. *Chillán, Chile: Agricultura Técnica* 66(4): 393-401.

Hogg, D.; J. Barth; E. Favoino; M. Centemero; V. Caimi; F. Amlinger. et al. 2002. Comparison of compost standards within the EU, North America and Australasia. *The Waste and Resources Action Programme*. 96p.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas), Chile. 2012. Agropecuarias, Informe anual 2012. [En línea]. Santiago, Chile: INE. 161p. Recuperado en: http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/agropecuarias_informe_anual_2012.pdf Consultado el: 05 de mayo de 2014.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. Versión en Estudio Final Comité – prNCh3375 Of 2015a. Calidad de digestato. Santiago, Chile: INN, 2015. 9p.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. Nch2880 Of 2015b. Compost, Clasificación y Requisitos. Santiago, Chile: INN, 2015. 17p.

Jenkinson, D. 1992. Soil organic matter and its dynamics. pp: 595-640. In: Wild, A. (Ed.). *Russell soil conditions and plant growth*. Madrid, España: Mundi Prensa. 1045p.

Jobet, C. 2003. Avances y perspectivas en calidad industrial del trigo. Temuco, Chile: INIA. 47p. (Serie Actas N°21).

Kumar, K. and M. Goh. 2000. Crop residues and management practices. Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. Canterbury, New Zealand: Soil, Plant, and Ecological Sciences Division, Lincoln University. 68: 197-319.

Lindh, D. 2004. Degradación de paja de trigo adicionada de una fuente de carbono o nitrógeno por tres cepas de hongos. Memoria Licenciado Agrónomo. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. 151p.

Matus, F. 1994. Crop residue decomposition, residual soil organic matter and nitrogen mineralization in arable soils with contrasting textures. Wageningen, Holland: Instituut voor Agrobiologisch. 141p.

Ocampos, C.; S. Fischer; C. Parra y G. Wells. 2008. Pre-tratamiento de paja de trigo para la producción de bioetanol en sistema batch. Memoria Ingeniero Agrónomo. Chillán, Chile: Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. 122p.

SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental), Chile. 2012. Anteproyecto del plan de descontaminación atmosférica para el valle central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. [En línea]. Santiago, Chile: SINIA. 19p. Recuperado en:

<http://www.sinia.cl/1292/articles-54805_folio_1773_1784.pdf> Consultado el: 06 de mayo de 2014.

Suárez, J. 2012. Compostaje del coproducto (digestato) que se genera en la digestión metanogénica del alperujo (residuo de olivo). Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 37p.

Suarez, M. 1993. Degradación de los ácidos 3- y 4- Hidroxibenzoico en *Klebsiella pneumoniae*: Purificación, caracterización y propiedades de las hidroxilasas. Memoria para optar al Grado de Doctor en Ciencias Biológicas. Madrid, España: Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid. 182p.

TMECC (The Composting Council Research and Education Foundation). 2004. Test methods for the Examination of Composting and Compost. [En línea]. New York, USA: U.S. Composting Council Research and Education Foundation. 15p. Recuperado en: <<http://www.tmecc.org>> Consultado el: 6 de mayo de 2014.

Varnero, M. 1992. El suelo como sistema biológico. pp: 197-214 In: Vera, W. (ed). Suelos una visión actualizada del recurso. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 345p.

Varnero, M. 2005a. V Taller de producción de compost. Aspectos técnico legales y desafíos. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 25p.

Varnero, M. 2005b. Proceso de compostaje. Guía de V Curso-Taller “Producción de compost”. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 22p.

Varnero, M.; C. Rojas y R. Orellana. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. Santiago, Chile: Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal 7(1): 28-37.

Williams, S. and T. Gray. 1974. Decomposition of litter on the soil surface. In: Biology of plant litter decomposition. London, England: Academic Press. 2: 611-632.

Wild, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Madrid, España: Mundi Prensa. 1045p.

ANEXOS Y APÉNDICES

Apéndice 1. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto al pH.

| Análisis de Varianza | | | | | |
|----------------------|------|----|----------|--------|----------|
| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
| Tratamiento | 8,14 | 8 | 1,02 | 288,69 | < 0,0001 |
| Error | 0,06 | 18 | 5,00E-03 | | |
| Total | 8,2 | 26 | | | |

| Test de Tukey | | | | |
|---------------|--------|---|------|-----|
| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
| R. Inicial | 5,83 | 3 | 0,03 | a |
| T5 | 7,02 | 3 | 0,03 | b |
| T1 | 7,28 | 3 | 0,03 | c |
| T6 | 7,45 | 3 | 0,03 | c d |
| T2 | 7,49 | 3 | 0,03 | d e |
| T7 | 7,53 | 3 | 0,03 | d e |
| T3 | 7,56 | 3 | 0,03 | d e |
| T8 | 7,62 | 3 | 0,03 | e f |
| T4 | 7,74 | 3 | 0,03 | f |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 2. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto a la Conductividad eléctrica.

| Análisis de Varianza | | | | | |
|----------------------|------|----|----------|-------|----------|
| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
| Tratamiento | 4,79 | 8 | 0,6 | 22,13 | < 0,0001 |
| Error | 0,49 | 18 | 3,00E-02 | | |
| Total | 5,82 | 26 | | | |

Test de Tukey

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|-------|
| T1 | 1,46 | 3 | 0,09 | a |
| T5 | 1,9 | 3 | 0,09 | a b |
| T2 | 2,25 | 3 | 0,09 | b c |
| T3 | 2,33 | 3 | 0,09 | b c d |
| T6 | 2,43 | 3 | 0,09 | c d e |
| T7 | 2,55 | 3 | 0,09 | c d e |
| T4 | 2,68 | 3 | 0,09 | c d e |
| T8 | 2,76 | 3 | 0,09 | d e |
| R. inicial | 2,86 | 3 | 0,09 | e |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 3. Análisis de Varianza (ANDEVA) de los tratamientos con respecto a la Fitotoxicidad.

Análisis de Varianza

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|--------------|----|----------|------|---------|
| Tratamiento | 30372,69 | 7 | 4338,96 | 1,86 | 0,1431 |
| Error | 0,37242,3949 | 16 | 2,33E+03 | | |
| Total | 5,82 | 23 | | | |

Apéndice 4. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto a la actividad microbiana.

Análisis de Varianza

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|----------|------|---------|
| Tratamiento | 9,9 | 7 | 1,41 | 4,76 | 0,0047 |
| Error | 4,76 | 16 | 3,00E-01 | | |
| Total | 14,66 | 23 | | | |

Test de Tukey

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|-----|
| T5 | 0,58 | 3 | 0,31 | a |
| T1 | 0,63 | 3 | 0,31 | a |
| T6 | 0,81 | 3 | 0,31 | a |
| T2 | 1,07 | 3 | 0,31 | a b |
| T3 | 1,2 | 3 | 0,31 | a b |
| T7 | 1,34 | 3 | 0,31 | a b |
| T4 | 1,89 | 3 | 0,31 | a b |
| T8 | 2,6 | 3 | 0,31 | b |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 5. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto al Contenido de agua.

Análisis de Varianza

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|---------|----|----------|-------|----------|
| Tratamiento | 8643,5 | 7 | 1234,79 | 21,06 | < 0,0001 |
| Error | 938,24 | 16 | 5,86E+01 | | |
| Total | 9581,74 | 23 | | | |

Test de Tukey

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T1 | 10,08 | 3 | 4,42 | a |
| T2 | 11,24 | 3 | 4,42 | a |
| T5 | 11,42 | 3 | 4,42 | a |
| T6 | 12,69 | 3 | 4,42 | a |
| T7 | 41,52 | 3 | 4,42 | b |
| T8 | 45,14 | 3 | 4,42 | b |
| T3 | 52,05 | 3 | 4,42 | b |
| T4 | 55,28 | 3 | 4,42 | b |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 6. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto al Contenido de Materia orgánica.

| Análisis de Varianza | | | | | |
|----------------------|---------|----|----------|--------|----------|
| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
| Tratamiento | 7153,12 | 7 | 1021,87 | 126,26 | < 0,0001 |
| Error | 129,49 | 16 | 8,09E+00 | | |
| Total | 7282,61 | 23 | | | |

| Test de Tukey | | | | |
|---------------|--------|---|------|---|
| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
| T4 | 41,01 | 3 | 1,64 | a |
| T3 | 42,67 | 3 | 1,64 | a |
| T8 | 42,7 | 3 | 1,64 | a |
| T7 | 46,86 | 3 | 1,64 | a |
| T2 | 55,21 | 3 | 1,64 | b |
| T6 | 57,93 | 3 | 1,64 | b |
| T1 | 75,56 | 3 | 1,64 | c |
| T5 | 92,6 | 3 | 1,64 | d |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 7. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto al Contenido de Carbono orgánico.

| Análisis de Varianza | | | | | |
|----------------------|---------|----|----------|--------|----------|
| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
| Tratamiento | 3538,68 | 8 | 442,33 | 182,05 | < 0,0001 |
| Error | 43,74 | 18 | 2,43E+00 | | |
| Total | 3582,41 | 26 | | | |

| Test de Tukey | | | | |
|---------------|--------|---|------|-----|
| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
| T4 | 21,45 | 3 | 0,9 | a |
| T8 | 21,61 | 3 | 0,9 | a b |
| T3 | 23,7 | 3 | 0,9 | a b |

(Continúa)

Apéndice 7 (Continuación)

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T7 | 26,03 | 3 | 0,9 | b |
| T2 | 30,67 | 3 | 0,9 | c |
| T6 | 32,18 | 3 | 0,9 | c |
| T1 | 41,98 | 3 | 0,9 | d |
| T5 | 51,45 | 3 | 0,9 | e |
| R. inicial | 51,87 | 3 | 0,9 | e |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 8. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto a la Relación C/N.

Análisis de Varianza

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|----------|----|----------|---------|----------|
| Tratamiento | 30785,99 | 8 | 3848,25 | 1362,79 | < 0,0001 |
| Error | 50,83 | 18 | 2,82E+00 | | |
| Total | 30836,82 | 26 | | | |

Test de Tukey

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T4 | 11,47 | 3 | 0,97 | a |
| T3 | 12,74 | 3 | 0,97 | a |
| T8 | 17,57 | 3 | 0,97 | b |
| T2 | 18,37 | 3 | 0,97 | b |
| T7 | 24,1 | 3 | 0,97 | c |
| T6 | 33,88 | 3 | 0,97 | d |
| T1 | 60,84 | 3 | 0,97 | e |
| T5 | 98,94 | 3 | 0,97 | f |
| R. inicial | 99,76 | 3 | 0,97 | f |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 9. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto a la Densidad aparente.

| Análisis de Varianza | | | | | |
|----------------------|----------|----|----------|--------|----------|
| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
| Tratamiento | 0,22 | 8 | 0,03 | 116,07 | < 0,0001 |
| Error | 4,30E-03 | 18 | 2,40E-04 | | |
| Total | 0,23 | 26 | | | |

| Test de Tukey | | | | |
|---------------|--------|---|------|-----|
| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
| R. inicial | 0,02 | 3 | 0,01 | a |
| T5 | 0,05 | 3 | 0,01 | a b |
| T1 | 0,05 | 3 | 0,01 | a b |
| T6 | 0,09 | 3 | 0,01 | b |
| T7 | 0,17 | 3 | 0,01 | c |
| T8 | 0,2 | 3 | 0,01 | c |
| T2 | 0,21 | 3 | 0,01 | c |
| T3 | 0,25 | 3 | 0,01 | d |
| T4 | 0,29 | 3 | 0,01 | d |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 10. Análisis de Varianza (ANDEVA) y Test de Tukey de los tratamientos con respecto al Tamaño de partícula.

| Análisis de Varianza Tamiz Pequeño (<0,1-0,5 mm) | | | | | |
|--|----------|----|----------|------|---------|
| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
| Tratamiento | 0,22 | 7 | 0,09 | 9,48 | 0,0001 |
| Error | 1,50E-01 | 16 | 1,00E-02 | | |
| Total | 0,77 | 23 | | | |

| Test de Tukey Tamiz Pequeño (<0,1-0,5 mm) | | | | |
|---|--------|---|------|-----|
| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
| T5 | 0,02 | 3 | 0,06 | a |
| T1 | 0,12 | 3 | 0,06 | a b |
| T6 | 0,16 | 3 | 0,06 | a b |
| T2 | 0,31 | 3 | 0,06 | b c |
| T3 | 0,36 | 3 | 0,06 | b c |

(Continúa)

Apéndice 10 (Continuación)

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T4 | 0,44 | 3 | 0,06 | c |
| T7 | 0,44 | 3 | 0,06 | c |
| T8 | 0,48 | 3 | 0,06 | c |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Análisis de Varianza Tamiz Mediano (1-2 mm)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|----------|----|----------|------|---------|
| Tratamiento | 0,29 | 7 | 0,04 | 5,67 | 0,002 |
| Error | 1,20E-01 | 16 | 1,00E-02 | | |
| Total | 0,41 | 23 | | | |

Test de Tukey Tamiz Mediano (1-2 mm)

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T5 | 0,13 | 3 | 0,05 | a |
| T8 | 0,42 | 3 | 0,05 | b |
| T4 | 0,43 | 3 | 0,05 | b |
| T7 | 0,44 | 3 | 0,05 | b |
| T2 | 0,47 | 3 | 0,05 | b |
| T6 | 0,47 | 3 | 0,05 | b |
| T3 | 0,48 | 3 | 0,05 | b |
| T1 | 0,51 | 3 | 0,05 | b |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Análisis de Varianza Tamiz Grande (4,75-6,35 mm)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|------|----|----------|------|---------|
| Tratamiento | 0,04 | 7 | 0,01 | 3,09 | 0,0291 |
| Error | 0,03 | 16 | 1,80E-03 | | |
| Total | 0,07 | 23 | | | |

Test de Tukey Tamiz Grande (4,75-6,35 mm)

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T1 | 0,05 | 3 | 0,02 | a |
| T5 | 0,06 | 3 | 0,02 | a |

(Continúa)

Apéndice 10 (Continuación)

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|---|
| T4 | 0,43 | 3 | 0,05 | b |
| T7 | 0,44 | 3 | 0,05 | b |
| T2 | 0,47 | 3 | 0,05 | b |
| T6 | 0,47 | 3 | 0,05 | b |
| T3 | 0,48 | 3 | 0,05 | b |
| T1 | 0,51 | 3 | 0,05 | b |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Análisis de Varianza Tamiz Muy Grande (9,5-19 mm)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|------|----|----------|-------|----------|
| Tratamiento | 1,42 | 7 | 0,2 | 21,85 | < 0,0001 |
| Error | 0,15 | 16 | 1,00E-02 | | |
| Total | 1,57 | 23 | | | |

Test de Tukey Tamiz Muy Grande (9,5-19 mm)

| Tratamiento | Medias | n | E.E. | |
|-------------|--------|---|------|-----|
| T8 | 0,02 | 3 | 0,06 | a |
| T4 | 0,04 | 3 | 0,06 | a |
| T7 | 0,04 | 3 | 0,06 | a |
| T3 | 0,05 | 3 | 0,06 | a b |
| T2 | 0,13 | 3 | 0,06 | a b |
| T6 | 0,18 | 3 | 0,06 | a b |
| T1 | 0,32 | 3 | 0,06 | b |
| T5 | 0,79 | 3 | 0,06 | c |

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Apéndice 11. Efecto del digestato sobre el rastrojo de trigo menor a 8 cm. De izquierda a derecha: tratamiento con 0% digestato (T1); tratamiento con 30% digestato (T2); tratamiento con 60% digestato (T3); y tratamiento con 100% digestato (T4).



Apéndice 12. Efectos del digestato sobre el rastrojo de trigo mayor a 20 cm. De izquierda a derecha: tratamiento con 0% digestato (T5); tratamiento con 30 % digestato (T6); tratamiento con 60 % digestato (T7); y tratamiento con 100 % digestato (T8).



Anexo 1. Rango máximo de aplicación ($\text{Litros} \cdot \text{m}^{-2}$) de compost con distintos niveles de salinidad para plantas sensibles y plantas tolerantes a la salinidad (Hogg et al., 2002).

| Rango de conductividad eléctrica ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) | Plantas sensibles | Plantas tolerantes |
|--|-------------------|--------------------|
| 0-1 | Ilimitado | Ilimitado |
| 1-2 | <15 | <60 |
| 2-4 | <8 | <32 |
| 4-6 | <4 | <16 |
| 8-12 | <2.5 | <10 |
| >12 | <2 | <8 |