

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**DEGRADACION AEROBICA DE RASTROJO DE TRIGO CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE DIGESATO**

PIETRO VINCENZO DELUCCHI SQUIRRELL

**Santiago, Chile**

**2016**

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**DEGRADACION AEROBICA DE RASTROJO DE TRIGO CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE DIGESATO**

**AEROBIC DEGRADATION ON WHEAT STUBBLE WITH DIFFERENT  
CONCETRATION OF DIGESTATE**

PIETRO VINCENZO DELUCCHI SQUIRRELL

**Santiago, Chile**

**2016**

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO

**DEGRADACION AEROBICA DE RASTROJO DE TRIGO CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE DIGESATO**

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

**PIETRO VINCENZO DELUCCHI SQUIRRELL**

**Calificaciones**

**Profesor Guía**

María Teresa Varnero M. 6,8  
Químico-Farmacéutico.

**Profesores Evaluadores**

Ian Homer B. 6,8  
Ingeniero Agrónomo, Dr.

Manuel Paneque C. 6,8  
Bioquímico, Dr.

**Santiago, Chile  
2016**

*A mi familia y a todos mis amigos*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer y valorar el apoyo que me ha entregado mi familia, en especial a mis padres Roberto y Elizabeth, que con su ayuda y amor, fueron fundamentales en esta etapa de mi vida.

A todos los funcionarios de Antumapu por su carisma y entrega en su labor diario. Al equipo de Agrimed por facilitarme las herramientas para el desarrollo de mi proyecto de tesis, en especial al profesor Hugo Percy por su constante apoyo.

A la profesora María Teresa Varnero, por su cariño, consejos y conocimientos, que fueron fundamentales para mi formación personal y profesional. Destacar también el apoyo recibido por Renzo Espinosa por su ayuda en terreno, en la localidad de Placilla, San Fernando.

Por último, agradecer a todos mis amigos por su apoyo incondicional y por las experiencias únicas vividas a lo largo de mi carrera universitaria.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	1
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
Objetivo General .....	5
Objetivo Específicos.....	5
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	6
Lugar de Estudio .....	6
Materiales .....	6
Residuos orgánicos .....	6
Materiales de laboratorio .....	6
Métodos .....	7
Caracterización bioquímica. ....	8
pH.....	8
Conductividad eléctrica (CE).....	8
Fitotoxicidad .....	8
Sólidos totales .....	9
Sólidos volátiles (MO).....	9
Carbono orgánico.....	9
Nitrógeno total (N).....	10
Relación carbono nitrógeno (C/N).....	10
Ensayo respirometría. ....	10
Resumen parámetros a medir.....	12
Diseño experimental y análisis estadístico.....	13
<b>RESULTADOS</b> .....	14
Análisis y caracterización de materias primas y tratamientos.....	14

Caracterización bioquímica. ....	14
pH.....	14
Conductividad eléctrica (CE).....	15
Sólidos Totales.....	16
Materia orgánica (MO) y carbono orgánico.....	16
Nitrógeno total (N).....	16
Relación C/N.....	17
Fitotoxicidad .....	18
Ensayo de respirometría.....	18
Evolución diaria de carbono orgánico como CO <sub>2</sub> .....	20
Tasa Mineralización Carbono .....	23
<b>CONCLUSIONES</b> .....	26
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	27
<b>APÉNDICES</b> .....	31
Apéndice I. Registro datos de desprendimiento diario de CO <sub>2</sub> en 30 días.....	31
Apéndice II. Registro datos de desprendimiento acumulado de CO <sub>2</sub> en 30 días. ....	32
Apéndice III. Desprendimiento acumulado de CO <sub>2</sub> .....	33
Apéndice IV. Desprendimiento diario de CO <sub>2</sub> .....	36

## RESUMEN

En Chile una de las mayores actividades agrícolas, corresponde a la producción de cereales como el maíz, trigo, avena y cebada. El aumento en la producción de estos cereales, ha traído consigo un incremento en la cantidad de rastrojos post cosecha, el que corresponde a más del 50% de la biomasa producida. El manejo tradicional como la quema agrícola, genera problemas de contaminación atmosférica y gases efecto invernadero que afectan la salud de las personas. Esto también produce el deterioro de los recursos naturales, generando la pérdida de nutrientes, y la eliminación de poblaciones microbianas que actúan en beneficio de la formación de suelo. Las externalidades negativas asociadas a esta práctica, dejan planteado el desafío de buscar nuevas alternativas de manejo de los residuos agrícolas como el rastrojo de trigo.

El estudio plantea una solución a la quema de rastrojo de trigo, utilizando digestato, que es un coproducto generado en la digestión metanogénica de guano bovino, como un acelerador en la degradación de la materia orgánica resistente. El objetivo del ensayo es establecer la dinámica de biodegradación de rastrojo de trigo de la variedad Pantera-INIA al inocular con diferentes dosis de digestato. Para cuantificar el aporte como inoculante del digestato, se realizó un ensayo de laboratorio, durante 30 días de incubación, en condiciones de temperatura y humedad controladas, para cinco tratamientos con concentraciones de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de digestato, con el fin de evaluar la evolución de la actividad microbiológica diaria de los distintos tratamientos, medida a través del desprendimiento de C-CO<sub>2</sub>.

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de digestato como inoculante, en una concentración de un 75% y 100%, influye significativamente en el proceso de degradación del material, en comparación a aquellos tratamientos con una concentración del 25% o sin tratar con digestato. Las pérdidas acumuladas del carbono orgánico como CO<sub>2</sub>, demuestran que la utilización de este inoculante acelera el tiempo de degradación y mineralización del carbono del rastrojo de trigo, obteniendo un material estabilizado y con ausencia de metabolitos fitotóxicos en comparación con el material sin tratar. La aplicación de digestato sería un aporte para el agricultor al acelerar el proceso de incorporación de materia orgánica al suelo, y como una alternativa a la quema de rastrojo, evitando así, los efectos negativos de esta práctica agrícola.

Palabras Clave: quema de rastrojo, digestato, rastrojo de trigo, biodegradación, inoculante, desprendimiento de C-CO<sub>2</sub>, mineralización, carbono orgánico.

## ABSTRACT

In Chile one of the biggest agriculture activity, corresponds to the production of cereals such as corn, wheat, oats and barley. The increased production of these crops has brought an increase in the number of post harvest stubble, which is more than 50% of biomass produced. The traditional management in agriculture is burning the stubble, it generates pollution problems and greenhouse gases that affect people health. This also causes natural resources deterioration, nutrients losses and the elimination of microbial populations which act in benefit of soil formation. The negative externalities associated with this practice, let posed the challenge to find new ways of managing agricultural wastes such as wheat stubble.

This study suggests a solution to wheat stubble burning, using digestate, which is a byproduct generated in the methanogenic digestion of bovine manure, as an accelerator in the degradation of organic matter resistant. The objective is to establish the dynamics of biodegradation on wheat straw Pantera-INIA variety, applying different doses of digestate. To quantify the contribution of the digestate as an inoculant, a laboratory test was performed during 30 days of incubation under controlled conditions of temperature and humidity in five treatments with concentrations of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of digestate, in order to evaluate the evolution of daily microbiological activity of different treatments, as measured by the C-CO<sub>2</sub> evolution.

The results show that the application of digestate as inoculant in a concentration of 75% and 100%, significantly affects the degradation of the material, compared to those treatments with concentration of 25% or untreated with digestate. The accumulated losses of organic carbon as CO<sub>2</sub>, show that the use of this inoculant accelerates degradation time and mineralization of carbon on wheat stubble, obtaining a stabilized product, with absence of phytotoxic metabolites compared to untreated material. The application of digestate would be a contribution to the farmer to accelerate the incorporation of organic matter to soil, and as an alternative to burning stubble, avoiding the negative effects of this agriculture practice.

Keywords: stubble burning, digestate, wheat straw, biodegradation, inoculant, C-CO<sub>2</sub> evolution, mineralization, organic carbon.

## INTRODUCCIÓN

Chile debido a las condiciones climáticas y geográficas que posee, es un lugar propicio para el cultivo y desarrollo de una matriz agraria heterogénea, que abarca desde el cultivo de hortalizas, frutales y cereales, tanto para el consumo nacional, como para exportación. La superficie total del 2013 de siembras de cereales en Chile, llegó a 580.678 hectáreas, el trigo fue el cultivo más importante, con 253.627 hectáreas, seguido del maíz y la avena con 142.826 y 126.833 hectáreas, respectivamente (INE, 2013).

El trigo, además de ser el cereal más sembrado en Chile, tiene una gran importancia socioeconómica. Es cultivado mayoritariamente por pequeños productores y se utiliza en la elaboración del pan, principal alimento de consumo masivo. En Chile existen aproximadamente 45 mil explotaciones con cultivo de trigo. De ellas, el 87% tienen menos de 50 hectáreas de superficie y producen el 22% del trigo nacional. El 76% de los productores que forman parte de este segmento, tiene baja escolaridad (sin escolaridad o básica incompleta) y el 50% son mayores a 60 años; por lo tanto, corresponden mayoritariamente a explotaciones con bajos niveles de innovación tecnológica y baja productividad (ODEPA, 2012). En la Región de O'Higgins, la superficie sembrada con trigo en el período 2012/2013 fue de 11.513 hectáreas de grano seco, con una producción de 650.050 qqm, obteniendo un rendimiento de 56,5 qqm·ha<sup>-1</sup> (INE, 2012).

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), los que al poseer una alta relación C/N, demoran en descomponerse, generando dificultades en 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. Dicha práctica se realiza 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, debido a la contaminación y a la reducción de los niveles de materia orgánica y de nutrientes, respectivamente. Lindh (2004) menciona que la quema de rastrojo, contribuye a la contaminación atmosférica y genera a largo plazo, daños irreversibles en la fertilidad de los suelos.

Según antecedentes del estudio “Apoyo en formulación de Plan de Descontaminación Valle Central Región de O'Higgins” (SINIA, 2008), se realizó una actualización del inventario de emisiones con base en el año 2006, concluyendo que para la zona saturada del valle central la combustión residencial de leña y las quemas agrícolas son las fuentes

principales de las emisiones directas de "MP10" a la atmósfera. Se ha estimado para el año 2009 un total de 4.888 hectáreas quemadas, un 52% corresponde a las comunas de San Fernando, Chimbarongo y Placilla que componen la zona saturada (SINIA, 2012). El área de la zona saturada, al igual que a nivel regional, basa su economía esencialmente en el sector agroindustrial. La importancia de la actividad agrícola queda demostrada si se analiza este sector (considerando agrícola, caza y silvícola) como fuente de trabajo, el cual emplea cerca del 27,1% de la población de esta zona (SINIA, 2012). Según el informe de quema incontrolada de biomasa de PNUMA (2005), la práctica de quema de rastrojo o biomasa agrícola, genera impactos tanto en el suelo como a las personas; la combustión de biomasa con herbicidas y reguladores de crecimiento aplicados en cereales inmediatamente antes de la cosecha, contienen cloro en su molécula activa, lo que a altas temperaturas, podría provocar emisiones de dioxinas y furanos.

Debido a las malas prácticas del manejo de estos residuos agrícolas y la urgencia de cooperar con la disminución de la contaminación del aire y de suelos, el objetivo de esta investigación fue desarrollar una técnica para acelerar la descomposición del rastrojo de trigo, con el uso de inóculos provenientes del digestato de un biodigestor. Un biodigestor ayuda a estabilizar la materia orgánica disponible, mediante digestión anaeróbica, proceso biológico en ausencia de oxígeno. Este proceso tiene como productos finales la generación de biogás y de digestato. El biogás, es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, además de gases traza; la composición de este biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso anaeróbico. El digestato es un material estabilizado, el cual se puede encontrar en estado líquido o sólido dependiendo del tipo de biodigestor utilizado (del tipo continuo, semi continuo u estacionario). Este digestato cual sea su estado físico, contiene poblaciones de bacterias que permitirán degradar la materia orgánica lábil más rápidamente que en condiciones normales, permitiendo al agricultor, que los rastrojos o residuos post cosecha, se incorporen al suelo de forma de abono y sin provocar los efectos secundarios de la quema, como son los gases efecto invernadero y la pérdida de nutrientes.

### **Objetivo General**

Establecer “in vitro” la dinámica de biodegradación de rastrojo de trigo cuando se inocula con diferentes dosis de digestato proveniente de un biodigestor.

### **Objetivo Específicos**

- Evaluar las concentraciones de digestato óptimas para favorecer la degradación de rastrojo de trigo.
- Descripción y comparación de la evolución del CO<sub>2</sub> acumulado, desprendido como reflejo de la actividad biológica en la degradación del rastrojo de trigo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Lugar de Estudio**

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Reciclaje Orgánico de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, y en el Módulo Docente para Análisis Ambiental Proyecto MECESUP UCH 303 perteneciente al Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

### **Materiales**

#### **Residuos orgánicos**

Para la realización de este estudio se utilizaron muestras de rastrojo de trigo cosechado durante el mes de Diciembre de 2014, de la variedad Pantera-INIA, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Rayentué (Centro Experimental Hidango).

Como material acondicionador, se utilizó digestato líquido, proveniente de un proceso de digestión anaeróbica de guano de bovino, de un biodigestor piloto del tipo semi continuo, (proyecto “Biogás y aplicaciones”, 2010), ubicado en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

#### **Materiales de laboratorio**

- Balanza analítica con capacidad para 400g a 0,001g de precisión.
- Tamiz de 1mm y 0,5mm.
- Estufa de secado.
- Conductivímetro y pHmetro
- Incubadora
- Mufla.
- Reactivos (NaOH 0,3N, HCl 0,15N, BaCl<sub>2</sub> 20% y timolftaleína 0,5%)

## Métodos

Se realizó un ensayo de incubación “in vitro” durante 30 días, bajo condiciones controladas de temperatura (28°C) y de humedad. Se utilizó envases plásticos de polietileno de alta densidad como muestra la Figura 1, donde se incorporó rastrojo de trigo triturado fino (0,5mm – 1mm), con tratamientos de diferentes concentraciones de digestato para evaluar la actividad microbiológica aeróbica, a través del desprendimiento de CO<sub>2</sub>.

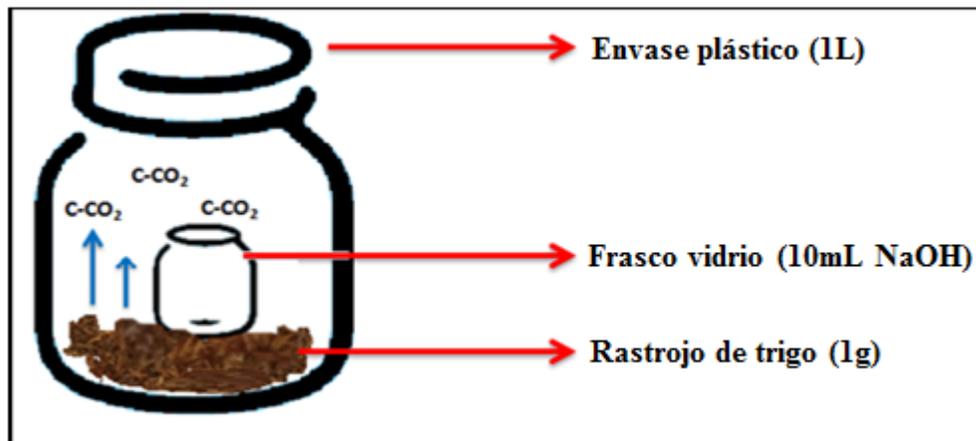


Figura 1. Ejemplo gráfico de los tratamientos en incubadora.

El estudio contempló un ensayo de 5 tratamientos, con 3 repeticiones cada uno, más 3 blancos de control (sin rastrojo y sin digestato), correspondiendo a un total de 18 muestras para el análisis de actividad microbiológica global durante 30 días. Cada tratamiento contiene 1g de rastrojo de trigo, al cual se le incorporaron 3,4mL de mezcla de digestato líquido con agua destilada en sus respectivas concentraciones (Cuadro 1). Para mantener una humedad aprovechable del 70-80% del residuo, se incorporó periódicamente dosis de digestato a cada tratamiento, en función de la diferencia de peso de este, con el inicial.

Cuadro 1. Concentración de digestato de los tratamientos.

Tratamiento	Concentración
T1	0% digestato
T2	25% digestato
T3	50% digestato
T4	75% digestato
T5	100% digestato

### Caracterización bioquímica.

Para evaluar la degradación aeróbica de rastrojo de trigo, se utilizó parámetros en base a la caracterización química y biológica de las materias primas que se utilizaron en este estudio (rastrojo de trigo y digestato líquido), como también de los tratamientos finales, con el objetivo de conocer las variables que influyen directamente en el proceso de degradación. Las variables relevantes para la caracterización del estudio, fueron las siguientes:

- pH
- Conductividad eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ )
- Fitotoxicidad (%)
- Sólidos Totales (Biomasa) (%)
- Sólidos Volátiles (MO) (%)
- Relación C/N.

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

**Conductividad eléctrica (CE).** Se midió utilizando un conductivímetro previamente calibrado, de acuerdo al método presentado por TMECC (2004).

**Fitotoxicidad.** Se determinó utilizando semillas de rabanito (*Raphanus sativus*). Esta especie será evaluada debido a su sensibilidad, rápido crecimiento, fácil manejo y su carácter de uso establecido según Norma Chilena de Compost (INN, 2015). Se utilizó el método de Varnero (2005), con el cual se indicará la existencia de sustancias fitotóxicas dentro de la muestra mediante el cálculo de la germinación y posterior crecimiento radicular de las semillas incubada. Para ello se utilizarán las siguientes ecuaciones:

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 testigo con agua destilada

Y, largo de radícula relativo (ER)

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

Donde,

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

LT: Largo promedio de radículas en el testigo (cm) con agua destilada

Finalmente se utilizará el índice de germinación (IG)

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

Cuadro 1. 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

Fuente: Zucconi, *et al*, 1981

**Sólidos totales.** Para determinar el porcentaje de sólidos totales se colocó una muestra del material dentro de la estufa de secado a 65°C hasta peso constante. Cuando el material presento un peso constante, respecto al peso anterior, se calculó la diferencia entre la masa inicial, previa al secado, y la masa final del material que queda luego del proceso.

**Sólidos volátiles (MO).** La cantidad de sólidos volátiles (materia orgánica), se estimó mediante la metodología planteada por TMECC (2004). Ésta consiste en poner una muestra del material dentro de una mufla a 600°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 quedan luego del proceso.

**Carbono orgánico.** Obtenido a partir del valor de materia orgánica. El método utilizado considera que la materia orgánica tiene en promedio, un 55% de carbono orgánico (Adams et al., 1951, citado por Santibáñez 2002). Por lo tanto, para determinar el contenido de carbono orgánico se dividió por 1,8 el contenido de materia orgánica de la muestra.

**Nitrógeno total (N).** Se enviaron las muestras al laboratorio Agrolab, con el fin de determinar el nitrógeno total del rastrojo utilizado utilizando la metodología descrita por TMECC (2004).

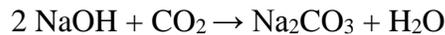
**Relación carbono nitrógeno (C/N).** La relación entre el contenido de carbono orgánico y nitrógeno total presente en las muestras se obtuvo de la división entre estos valores.

### **Ensayo respirometría.**

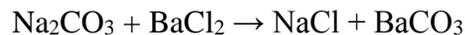
Para el ensayo de actividad microbiológica global, se midió el desprendimiento de CO<sub>2</sub> periódicamente de acuerdo al método de incubación de Varnero (1990), mediante el uso de solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,3M, para que reaccione con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La reacción produce carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y agua. El carbonato de sodio, se hace reaccionar con 2mL de cloruro de bario (BaCl<sub>2</sub>), seguido de 3 gotas de timolftaleína, para que la solución adquiera un tono azul.

Luego, se titula la solución con ácido clorhídrico HCl 0,15M, hasta que la solución de color azul cambie de tono a incolora, que es el punto final de titulación. Finalmente con los mililitros de HCl gastado, se puede calcular el exceso de NaOH sin carbonatar (que no reaccionó con el CO<sub>2</sub>).

Las siguientes ecuaciones muestran la metodología que se aplicará;



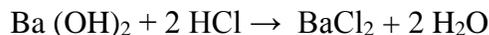
Se agrega la solución de BaCl<sub>2</sub>;



El exceso de NaOH (que no reaccionó con el CO<sub>2</sub>);



Al titular, se forma;



Una vez realizada la titulación se procede a calcular el NaOH utilizado;

$$\text{ X mL de HCl 0.15M gastado} = \text{ X/2 mL NaOH 0,3M (que no reaccionó con CO}_2\text{)}$$

Una vez determinada la cantidad de NaOH que reacciona con el CO<sub>2</sub>, se puede obtener la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera por acción de los microorganismos.

1 mL NaOH 0,3M equivalente a 1.8 mg de C- CO<sub>2</sub>

Con la cantidad de miligramos de CO<sub>2</sub> liberado, puedo calcular el carbono liberado como desprendimiento de CO<sub>2</sub>, mediante la siguiente ecuación.

$$C - CO_2 = CO_2 \cdot 12 / 44$$

Los valores diarios obtenidos de C-CO<sub>2</sub> son corregidos con la materia orgánica y el factor de humedad de los tratamientos (mg C-CO<sub>2</sub>· g<sup>-1</sup> MO· d<sup>-1</sup>).

La evolución del carbono orgánico desprendido como CO<sub>2</sub> en función del tiempo se ajustó al modelo potencial propuesto por Lammermann y Weissmann (1924); citado por Dommenrgues (1968):

$$C = K \cdot t^m$$

Donde,

C: pérdidas acumuladas de C orgánico como CO<sub>2</sub> en función del tiempo, expresada en mg C- CO<sub>2</sub>/ g de material orgánico seco a 65°C.

K: constante que corresponde a la emisión del primer día, expresada en mg C- CO<sub>2</sub>/ g de material orgánico seco a 65°C.

T: tiempo, en días.

m: constante, que determina la forma de curva

La tasa de mineralización del carbono orgánico, se calculó en base al porcentaje, que representa las cantidades acumuladas de carbono orgánico desprendido como CO<sub>2</sub>, respecto al contenido inicial del carbono orgánico de las muestras (Dommergues, 1968).

$$T_m = \left( \sum_{i=0 \text{ día}}^{i=30 \text{ día}} C - CO_2 / C_{org} \right) \cdot 100$$

Donde,

T<sub>m</sub>: tasa de mineralización, expresada en porcentaje.

C-CO<sub>2</sub>: carbono desprendido como CO<sub>2</sub>, expresado en mg·g<sup>-1</sup> de material orgánico seco a 65°C. (30 días)

C<sub>org</sub>: carbono orgánico presente al inicio del experimento, expresado en mg·g<sup>-1</sup> de material orgánico seco a 65°C.

### Resumen parámetros a medir.

El Cuadro 2, muestra en resumen los parámetros que se midieron con el fin de obtener datos en base a la composición bioquímica iniciales del rastrojo de trigo y digestato, como también de los tratamientos al término de la incubación. La medición de desprendimiento de CO<sub>2</sub> de los tratamientos se realizó periódicamente para la toma de datos del ensayo de respirometría.

Cuadro 2. Cuadro resumen de parámetros bioquímicos de materias primas y tratamientos.

<b>Parámetro</b>	<b>Rastrojo</b>	<b>Digestato</b>	<b>Tratamientos</b>
<b>pH</b>	X	X	X
<b>CE (dS·m<sup>-1</sup>)</b>	X	X	X
<b>Sólidos Totales (%)</b>	X	X	X
<b>Sólidos Volátiles (%)</b>	X	X	X
<b>Carbono orgánico (%)</b>	X	X	X
<b>Nitrógeno total (%) <sup>1</sup></b>	X	-	X
<b>Relación C/N</b>	X	-	X
<b>Fitotoxicidad (IG) (%)</b>	X	X	X
<b>Desprendimiento CO<sub>2</sub> (mg C-CO<sub>2</sub>· g<sup>-1</sup> MO· d<sup>-1</sup>)</b>	-	-	X

### **Diseño experimental y análisis estadístico**

Para evaluar la emisión acumulada de CO<sub>2</sub> en el experimento, se utilizó un diseño completamente al azar, el cual consta de cinco tratamientos, con tres repeticiones, más tres muestras de control o “blancos”, generando un total de 18 muestras.

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia de 5% ( $\alpha=0,05$ ) para determinar si existen diferencias significativas entre los valores medios de cada tratamiento. También se realizó el test de Sahpiro-Wilks para evaluar la normalidad de los datos utilizados y para saber entre que tratamientos existen diferencias significativas, se aplicó el test de Tuckey.

Para cuantificar la actividad microbiológica global, las mediciones de CO<sub>2</sub> acumuladas de cada tratamiento, se ajustarán al modelo potencial propuesto por Lammermann y Weissmann (1924), citado por Dommergues (1968).

## RESULTADOS

### Análisis y caracterización de materias primas y tratamientos.

#### Caracterización bioquímica.

Cuadro 3. Variables bioquímicas de las materias primas y tratamientos

Parámetro	Rastrojo	Digestato	Tratamientos				
			T1	T2	T3	T4	T5
<b>pH</b>	5,6	7,1	8,29	8,19	8,15	8,05	7,99
<b>CE (dS·m<sup>-1</sup>)</b>	2,83	2,61	1,07	1,08	1,16	1,25	1,43
<b>Sólidos Totales (%)</b>	94,2	0,44	29,47	28,87	25,3	27,24	26,2
<b>Sólidos Volátiles (%)</b>	93,1	46,5	89,49	89,42	89,3	88,85	88,2
<b>Carbono orgánico (%)</b>	51,7	25,8	49,71	49,67	49,6	49,36	49
<b>Nitrógeno total (%)</b>	0,55	-	0,94	0,96	0,77	0,8	0,85
<b>Relación C/N</b>	94,08	-	52,89	51,74	64,4	61,7	57,7
<b>Fitotoxicidad (I.G) (%)</b>	7,88	86,75	125,4	149,4	84	173,7	99,8

**pH.** Tanto en los tratamientos como en las materias primas se midió el pH, obteniendo valores que se situaron entre 5.6 y 8.5, estos niveles de pH, según la NCh 2880 (INN, 2015) los establece como normal para compost. El pH puede tener importancia en la retención de las bacterias en el suelo, según lo observado experimentalmente por Bitton et al. (1974), la mayor parte de bacterias y actinomicetos se desarrollan mejor a pH neutro y ligeramente alcalino.

En los tratamientos, el pH fue descendiendo levemente a medida que aumentaban la concentración de digestato, estableciéndose en rango neutro a ligeramente alcalino. Esto puede deberse a que como menciona Aguilera (2000), la materia orgánica presente afecta la reacción del suelo y pH debido a los diversos grupos activos que aportan grados de acidez, a las bases de cambio y al contenido de nitrógeno presente en los residuos orgánicos aportados al suelo. Este descenso puede ser atribuible también a la respiración de microorganismos, puesto que los procesos metabólicos generan CO<sub>2</sub> y ácidos orgánicos solubles acidificantes (Zapata, 2006). La materia orgánica en suelos, tiene grupos carboxílicos y fenólicos que se comportan como ácidos débiles y tienden a disminuir el pH

del suelo (Carrasco, 1992, citado por Martínez et al., 2008). Al término de la incubación, la incorporación de digestato en el rastrojo de trigo estaría produciendo ácidos orgánicos, que generarían un cambio en los parámetros de pH para todos los tratamientos.

**Conductividad eléctrica (CE).** Los tratamientos fueron medidos en base a una suspensión de 1:10, encontrándose en un rango menor a los 1,5 ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), menor a los 2,83 ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) presentes en el rastrojo de trigo inicial. La conductividad eléctrica entre los tratamientos fue aumentando a mayor concentración de digestato, esto puede deberse a que la materia orgánica contenida en el digestato contiene sales provenientes del afluente, que en este caso corresponde a una mezcla de agua con guano bovino.

Según la Nch 2880 (INN, 2015), la tasa de aplicación de compost o material estabilizado máxima ( $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}$ ), para un rango de conductividad eléctrica de 1 – 2 ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), es de  $<15$  ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ ), para no plantas sensibles, y de  $<60$  ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ ), para plantas tolerantes. Según la escala establecida por Richards (1954, citado por Viteri et al., 2008), en el rango de 0 a 2  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  los efectos de salinidad son despreciables, por lo que no existiría restricciones para la elección de cultivos al ocupar el producto terminado.

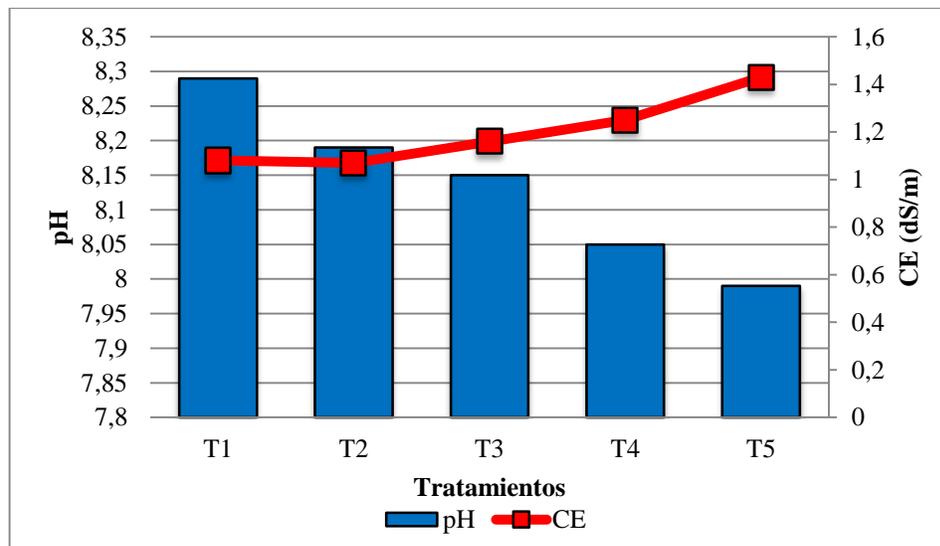


Figura 2. Gráfico de pH v/s conductividad eléctrica.

El gráfico de la Figura 2, muestra que a medida que se aumenta la concentración de digestato en los tratamientos, el pH disminuye y la conductividad eléctrica aumenta. Esto coincide con el estudio realizado por Roca-Pérez et al. (2009), donde determina la relación entre pH y conductividad eléctrica en suelos francos arcillosos y arenosos, con la aplicación de distintas dosis de materia orgánica estabilizada. Los autores concluyen, que la incorporación de compost o un material orgánico estabilizado en el suelo, el pH decrece y aumenta la CE, en un período de 30 días de incubación.

**Sólidos Totales.** El rastrojo de trigo que se utilizó para la incubación, tuvo un porcentaje de sólidos totales cercano al 94,2% similar a lo descrito para la paja de trigo por Varnero y Arellano (1990), y en el caso del digestato se obtuvo un valor promedio de un 0,44% de sólidos totales.

Para el montaje del ensayo de incubación se diluyó el material a un 25% de sólidos totales para todos los tratamientos. Santibáñez (2002), menciona que es importante mantener un contenido de humedad óptimo para generar una mayor actividad microbiana aeróbica y degradación del material tratado. Según lo descrito por Delphin (1986), citado por Mascayano (2001), un porcentaje de humedad de 70% - 80%, es propicio para el desarrollo de la actividad de microorganismos aeróbicos, esto incide también en que se alcanza un óptimo en la mineralización del carbono orgánico, apreciado por la producción de CO<sub>2</sub>. Al término de la incubación, en todos los tratamientos (rastrojo de trigo tratado con distintas dosis de digestato), los sólidos totales se encontraron en un rango del 25% - 30%.

**Materia orgánica (MO) y carbono orgánico.** Se determinó la materia orgánica de las materias primas y los tratamientos en base a la metodología de calcinación. Para el rastrojo de trigo se obtuvo un valor de 93,1%, similar a los valores establecidos para paja de trigo por Varnero y Arellano (1990). Para el caso del digestato, según Varnero (2001), un material estabilizado por reducción biológica debería contener un 58% de MO, en este caso se obtuvo un valor de 46,5% de MO, lo que es menor, debido a que el digestato utilizado es líquido, el cual contiene una menor concentración de materia orgánica que en su forma sólida.

Para los tratamientos, se obtuvo que los valores más altos de MO, se encuentran en T1 (89,48%), T2 (89,42%) y T3 (89,36%), los que corresponden a los tratamientos con una menor concentración de digestato. En el caso de los tratamientos T4 (88,85%) y T5 (88,21%), la menor presencia de MO respecto a los otros tratamientos, se atribuye a las pérdidas o mineralización del carbono orgánico en forma de CO<sub>2</sub> para el período de incubación de 30 días. La mayor disponibilidad de carbono lábil en T4 y T5 generó que los organismos descomponedores, mineralizaran más rápidamente el carbono orgánico en comparación con los tratamientos con una menor concentración de digestato.

**Nitrógeno total (N).** Los valores entregados por el laboratorio, corresponden a 0.55% para el rastrojo de trigo lo que es similar a 0.59% de nitrógeno total planteado por Varnero y Arellano (1990) para la paja de trigo. En el caso de los tratamientos al ser sometidos a distintas dosis de digestato en condiciones de humedad y temperatura controladas, generó una mayor disponibilidad de N, que en caso del rastrojo de trigo sin tratar. Al respecto Fließbach et al. (1998) señala que una mayor descomposición y una elevada actividad microbiana mejoran el potencial de entrega de N por mineralización.

Al comparar los valores de N del rastrojo de trigo con los obtenidos en los tratamientos, se aprecia que existe un efecto favorable al proceso de mineralización, con las distintas concentraciones de digestato. Sin embargo entre tratamientos, los valores de N total no entregan una tendencia al utilizar el inoculante. Esto puede deberse a una fase de inmovilización del N mineral, que en la parte inicial de descomposición, actúan residuos con altos contenidos relativos de carbono en relación al N total (Dommergues y Mangnot, 1970). Los microorganismos se presentan más activos durante la incubación, y necesitan mayor cantidad de N para la elaboración de proteínas, el que se encuentra en menor cantidad en relación al carbono, esto se ve reflejado en la relación de C/N inicial del rastrojo de trigo utilizado.

**Relación C/N.** Para la relación de C/N se obtuvieron de los resultados del porcentaje de carbono orgánico y del nitrógeno total del rastrojo de trigo y tratamientos, que se muestra en la Figura 3. A medida que se incorporó mayor concentración de digestato, esto influyó con la disminución del porcentaje de carbono orgánico presente y en el aumento también del porcentaje N total. Para el rastrojo de trigo se obtuvo una relación de C/N de 94.08, lo que muestra un alto contenido de carbono orgánico en relación a la disponibilidad de N total del material orgánico. En los tratamientos se generó una mayor disponibilidad de N, provocando una estabilización en la relación C/N, los valores obtenidos son de 52.89 (T1), 51.74 (T2), 64.4 (T3), 61.7 (T4) y 57.65 (T5). Robin y Le Quellec (1997) señalan que la relación C/N no es un criterio fiable para determinar el uso agrícola de un producto orgánico y que la aplicación de una caracterización bioquímica a los materiales orgánicos permitiría una mejor clasificación agronómica de estos, de acuerdo al objetivo que persiga su aplicación. Respecto a la relación C/N, Uribe (1993) sostiene que esta solo indica la proporción en que están ambos elemento, pero no sugiere la susceptibilidad de los compuestos orgánicos a la degradación biológica.

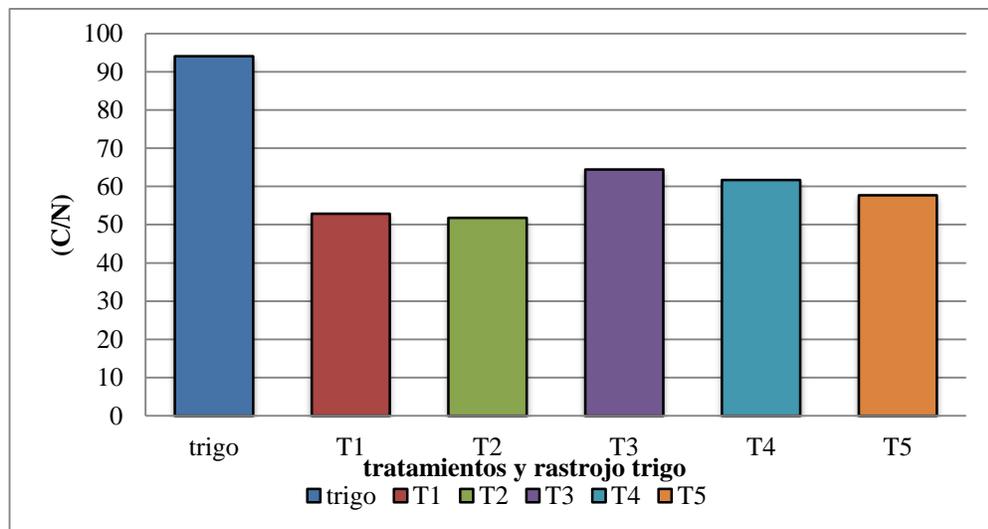


Figura 3, Gráfico relación C/N del trigo y tratamientos T1, T2, T3, T4, T5.

**Fitotoxicidad.** Con el fin de medir la toxicidad de las materias primas y los tratamientos, se realizaron ensayos utilizando semillas de rabanito (*Raphanus sativum*), para analizar su sensibilidad en la germinación de esta. En el Cuadro 4 se muestran tanto el porcentaje de germinación, el crecimiento de radícula relativo y el índice de germinación de las materias primas y de los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5.

Cuadro 4. Porcentaje de germinación, crecimiento de radícula relativo, índice germinación de materias primas y tratamientos al término de incubación.

Materias Primas	Rabanito		
	PGR	CRR	IG
	%	%	
<b>Rastrojo trigo</b>	77,7	10,1	7,8
<b>Digestato</b>	88,8	97,6	86,7
<b>T1</b>	111	112	125
<b>T2</b>	100	149	149
<b>T3</b>	100	84,0	84,0
<b>T4</b>	100	173	173
<b>T5</b>	111	89,7	99,7

Esto implica que tanto los tratamientos como el digestato no presentaron toxicidad para rabanito según la escala propuesta por Zucconi *et al.* (1981) y la NCh 2880 (INN, 2015), ya que con índices de germinación mayores a 80% se considera que el material no contiene sustancias tóxicas o que ellas están en muy baja concentración. No así la prueba con rastrojo de trigo, que arrojo con una dilución de 1:5, que es un material fitotóxico para la germinación de rabanito, lo que en estudios con el trigo de Wu *et al.* (2000), también demuestran que hay variación en la actividad alelopática que inhiben el desarrollo de otras especies vegetales. La inclusión digestato en los tratamientos, podría disminuir metabolitos tóxicos presentes, generando mejores condiciones para la germinación de nuevos cultivos y especies vegetales.

### Ensayo de respirometría.

Este ensayo se realizó durante 30 días, obteniendo los valores diarios del desprendimiento de C-CO<sub>2</sub> de los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y control, todos con tres repeticiones. Los valores obtenidos del desprendimiento de C-CO<sub>2</sub> de los tratamientos se corrigieron con el desprendimiento del control que da cuenta del CO<sub>2</sub> presente en el medio ambiente o de incubación.

Para determinar que no existiesen errores en la toma de datos del ensayo, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) del desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de los cinco

tratamientos. Con los resultados de este análisis se puede afirmar con un 95% de confianza, que no existen diferencias significativas entre las repeticiones de cada tratamiento, lo que muestra que las repeticiones de cada uno se comportaron con una distribución normal. En el Apéndice IV, Figura 7, 8, 9, 10 y 11, se puede observar el desprendimiento acumulado de CO<sub>2</sub> de las tres repeticiones (A, B y C), las cuales se distribuyen de forma similar en cada tratamiento.

Entre el desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de los tratamientos (T1, T2, T3, T4 y T5), el análisis de varianza arrojó que si existen diferencias significativas entre alguno de ellos, debido al valor p que resultó menor a 0.05. Para evaluar la normalidad de los datos se utilizó el test de Shapiro-Wilks, que arrojó un valor p (0.4842) mayor a 0.05, lo que se puede afirmar que los datos se distribuyen normalmente.

Para saber entre qué tratamientos existen diferencias significativas se realizó el Test de Tuckey, el cual arrojó que con un 95% de confianza, que existen diferencias significativas entre los tratamientos T1-T4, T1-T5, T2-T4 y T2-T5; como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Desprendimiento acumulado de carbono mineral, emitido como C-CO<sub>2</sub> durante los 30 días de incubación.

Tratamientos	mg C-CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> MO	
<b>T1</b>	167,07	A
<b>T2</b>	168,63	A
<b>T3</b>	179,91	AB
<b>T4</b>	197,13	B
<b>T5</b>	201,15	B

Tratamientos con una letra en común no son significativamente diferentes (> 0,05).

Las emisiones de carbono mineral desprendido como CO<sub>2</sub>, reflejan una mayor actividad microbiológica dentro de los tratamientos con mayor aporte de digestato (T4 y T5). Esta mayor actividad microbiológica se debería a que, existe una mayor degradación del rastrojo de trigo utilizando digestato, es decir, la incorporación de este inoculante, afecta positivamente la biodegradación oxidativa de los tratamientos para el periodo de 30 días. En el caso de T1-T2, T2-T3, T3-T4 y T4-T5 no existen diferencias significativas entre estos tratamientos, lo cual indica que no existirían cambios al aumentar la concentración de digestato en un 25% entre un tratamiento respecto a otro. No así, una concentración sobre un 50% de digestato, en donde sí se pueden apreciar resultados significativos en el incremento de la actividad microbiológica y degradación de materia orgánica resistente como el rastrojo de trigo.

**Evolución diaria de carbono orgánico como CO<sub>2</sub>.** En los primeros días de incubación, todos los tratamientos presentan las mayores emisiones de C-CO<sub>2</sub> registradas del experimento. Esto se puede atribuir, a la mayor disponibilidad de C orgánico lábil al inicio de las incubaciones, que permitiría incrementar la mineralización inicial del carbono (Borie et al., 1995). Las altas intensidades iniciales de mineralización, de los materiales orgánicos, reflejarían la presencia de carbono de disponibilidad inmediata proveniente de compuestos fácilmente degradables, seguidas de intensidades más bajas que reflejarían la gran resistencia al desdoblamiento de los complejos ligno-celulósicos (Levi-Minzi et al., 1990). Como menciona Havlin et al. (1999), durante las etapas iniciales de la descomposición de los materiales orgánicos recientemente incorporados hay un rápido aumento en el número de organismos heterótrofos, acompañado por la emisión de grandes cantidades de CO<sub>2</sub>.

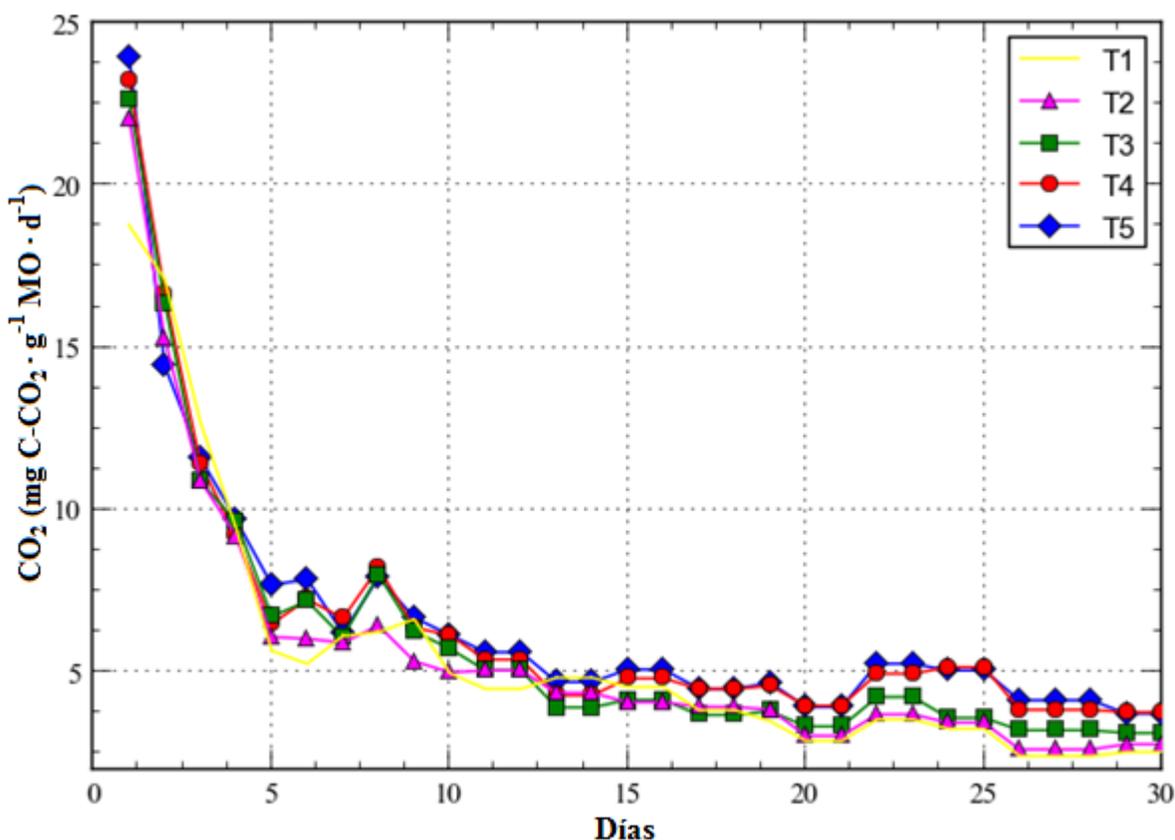


Figura 4. Desprendimiento de C-CO<sub>2</sub> diario de T1, T2, T3, T4 y T5. Datos utilizados se encuentran en el Apéndice I.

La menor actividad microbológica de los tratamientos, se encuentra en los aquellos con una baja concentración de digestato. En promedio de los 30 días de incubación se obtuvo entre 5.56 y 5.62 mg C-CO<sub>2</sub> · g<sup>-1</sup> MO · d<sup>-1</sup> respectivamente para los tratamientos T1 y T2, y para el tratamiento T3 se obtuvo 6.02 mg C-CO<sub>2</sub> · g<sup>-1</sup> MO · d<sup>-1</sup>. En cambio aquellos tratamientos con una concentración mayor de digestato, como T4 y T5 se obtuvieron

valores de 6.61 y 6.57 mg C-CO<sub>2</sub>· g<sup>-1</sup> MO· d<sup>-1</sup> promedio respectivamente. Con los promedios diarios de la incubación, se desprende también, que los tratamientos con una mayor actividad microbiológica son el T4 y T5.

Al término de la incubación, el desprendimiento de CO<sub>2</sub> (mg C-CO<sub>2</sub>· g<sup>-1</sup> MO· d<sup>-1</sup>) de los tratamientos, fue de 2.54 (T1), 2.78 (T2), 3.14 (T3), 3.79 (T4), 3.72 (T5), esto muestra que en los ensayos existe aún actividad microbiológica pero que se considera en niveles estables, debido a que los valores obtenidos son inferiores a los exigidos para establecer si el material orgánico degradado se encuentra estable. ( $\leq 8$  mg CO<sub>2</sub>· g<sup>-1</sup> MO· d<sup>-1</sup>) según la NCh 2880 (INN, 2015). Posterior a la disminución de las fuentes alimenticias, la actividad microbiana desciende en forma gradual y se establece nuevamente una quietud relativa (Buckman y Brady, 1977). Ayuso et al. (1996), indican que mientras más estable es la materia orgánica, la emisión de CO<sub>2</sub> y la actividad microbiana son menores ya que existe menos material de fácil descomposición lo que impide la degradación por parte de los microorganismos.

El nivel de humedad establecido al inicio de la incubación, fue controlado en función de la pérdida de peso respecto al peso inicial de cada tratamiento, mediante la incorporación de las distintas dosis, realizada los días 7, 15 y 22 del período de incubación. Respecto a lo anterior, en la Figura 4 se puede observar, que se generaron puntos de inflexión en la curva de desprendimiento de CO<sub>2</sub> que coinciden con las aplicaciones, este aumento de la actividad microbiológica no se prolonga por mucho tiempo, al perder las fuentes de energía aportadas por el digestato al ser incorporado en los recipientes incubados. En el Apéndice III, Figuras 12, 13, 14, 15 y 16, se puede observar esta tendencia entre las repeticiones de cada tratamiento, en donde la aplicación del inoculante genera un aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las pendientes de la curva de desprendimiento acumulado, son menores en el transcurso del tiempo, debido fundamentalmente a la disminución en la disponibilidad de carbono lábil, agotamiento de las fuentes nitrogenadas, resistencia a los materiales complejos o estabilización del material orgánico (Borie *et al.*, 1995). En este sentido también, esta baja actividad biológica se debe probablemente a que las fracciones orgánicas que persisten en el material bioprocesado son muy resistentes y por lo tanto poco biodegradables lo que no permite sustentar una población microbiana mesofílica activa (Varnero *et al.*, 2007).

En el tratamiento con un mayor porcentaje de digestato (T5), se observaron los mayores valores de desprendimiento acumulado de CO<sub>2</sub>, esto se debe como menciona Levi-Minzi et al. (1990), que los rangos de descomposición, como desprendimiento de CO<sub>2</sub> se incrementan al incorporar un material orgánico, en este caso el digestato. Rivero y Hernández (2001), indicaron que las diferencias significativas en la descomposición de residuos, sólo son detectables como máximo hasta treinta días posteriores a la incorporación de los materiales orgánicos. El desprendimiento acumulado de CO<sub>2</sub> se muestra gráficamente en la Figura 5, en donde se observan las curvas acumuladas para los 30 días de incubación de los 5 tratamientos.

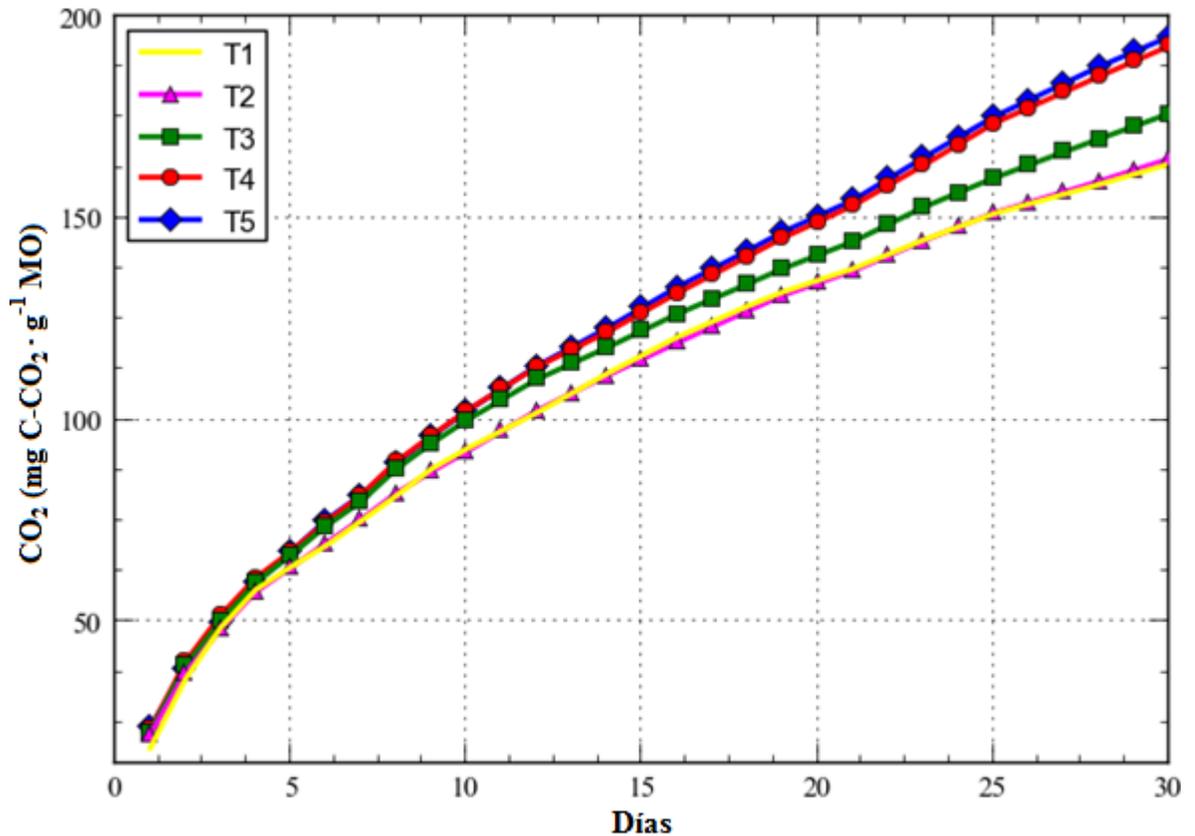


Figura 5. Desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de T1, T2, T3, T4 y T5. Datos utilizados se encuentran en el Apéndice II.

La evolución del C orgánico desprendido como CO<sub>2</sub> en función del tiempo se ajustó al modelo potencial propuesto por Lammermann y Weissmann (1924), citado por Dommergues (1968).

Al derivar el modelo  $C = K \cdot t^m$ , se obtiene la expresión  $dC/dt = K \cdot m \cdot t^{(m-1)}$ , lo que corresponde a la intensidad respiratoria (Chase y Gray, 1957; citados por Dommergues, 1968). En donde los valores de los coeficientes  $K \cdot m$  y  $(m-1)$  representan la actividad biológica y la magnitud de la tasa de pérdida del carbono orgánico en función del tiempo, respectivamente (Levi-Minzi *et al.*, 1990).

Se generó una ecuación lineal, de las curvas acumuladas de desprendimiento de CO<sub>2</sub> de los tratamientos. Obtenida la ecuación lineal se realizó una regresión lineal simple y se obtuvieron los valores de la pendiente (m) correspondientes para cada tratamiento.

Cuadro 6. Valores de constantes para actividad microbiológica.

Tratamientos	K	m	K·m
	mg C-CO <sub>2</sub> · g <sup>-1</sup> MO		
<b>T1</b>	18,75	4,46	83,62
<b>T2</b>	22,04	4,45	98,07
<b>T3</b>	22,72	4,71	107,01
<b>T4</b>	23,38	5,2	121,57
<b>T5</b>	23,94	5,4	129,27

Los valores de K, indican que en el primer día de incubación los tratamientos con mayor desprendimiento de C-CO<sub>2</sub> fueron aquellos con una concentración de digestato de 75% y 100%. El bajo valor de K para los tratamientos sin digestato o con una concentración de 25%, se puede deber a que las poblaciones de microorganismos autóctonas, poseen una adaptación más lenta que las del inoculante incorporado, en condiciones iguales de temperatura y humedad para todos los tratamientos. El valor del coeficiente (m-1) es positivo para todos los tratamientos, reflejando un aumento en la tasa de pérdida de carbono orgánico en el transcurso del periodo de incubación.

Los valores de K·m aumentan con la aplicación de digestato. La incorporación del inoculante para la degradación del rastrojo de trigo, incrementa la actividad microbiológica por sobre los tratamiento con una menor concentración. Como se mencionó anteriormente, aquellos tratamientos con una concentración mayor al 75% favorecen significativamente la actividad microbiológica, incrementando la degradación del residuo agrícola tratado.

**Tasa Mineralización Carbono.** En el Cuadro 7, se muestran el promedio diario de la tasa mineralización para los tratamientos, durante los 30 días de incubación.

Cuadro 7. Tasa mineralización diaria.

Tratamiento	Tasa Mineralización (%)
<b>T1</b>	0,96
<b>T2</b>	0,97
<b>T3</b>	1,03
<b>T4</b>	1,13
<b>T5</b>	1,14

La tasa de mineralización en cada tratamiento corresponde al desprendimiento acumulado de carbono mineral al término de la incubación en forma de  $\text{CO}_2$ , respecto al carbono orgánico inicial del rastrojo de trigo. La tasa de mineralización de los tratamientos aumenta a medida que se incorporó digestato, tanto los tratamientos T4 y T5 fueron aquellos con una mayor tasa de mineralización de carbono orgánico, que se relaciona también con la mayor actividad microbiológica antes descrita.

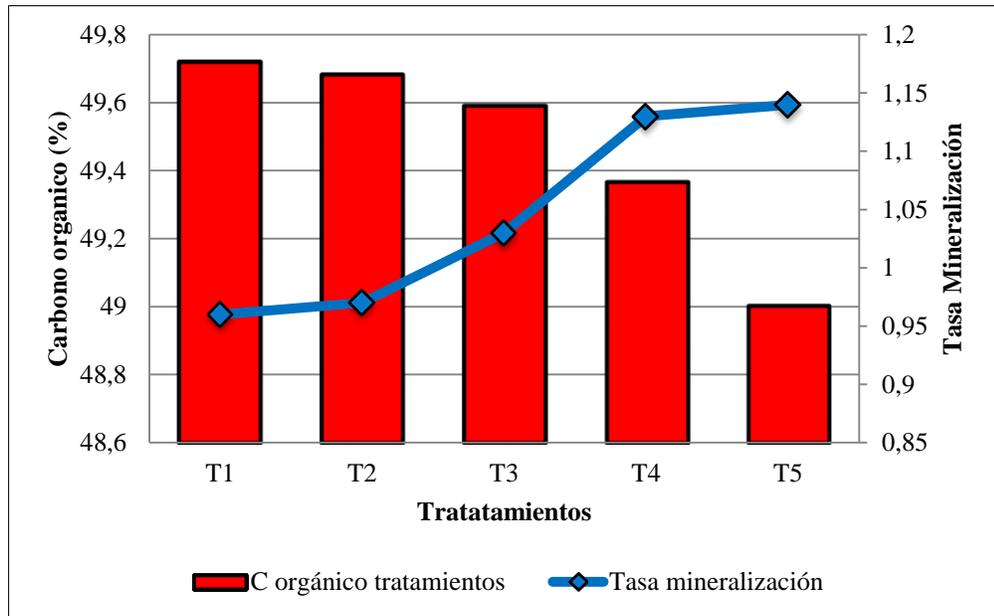


Figura 6. Tasa Mineralización v/s carbono orgánico de los tratamientos (%)

La Figura 6 muestra que al término de la incubación, aquellos tratamientos con una mayor concentración de carbono orgánico (T1 y T2), la tasa de mineralización es baja debido a que la fracción de carbono orgánico lábil es menor comparada a la encontrada en los tratamientos con el aporte del inoculante (T4 y T5).

Se observó que la velocidad de mineralización de carbono orgánico en el periodo de 30 días de incubación, es mayor durante la primera semana, obteniendo así la mayor tasa de mineralización para este periodo. Después de la primera semana, los tratamientos entraron en una etapa de estabilización, lo que es generado como se menciona anteriormente, por el agotamiento de fuentes de carbono orgánico de fácil degradación, que al agotarse, disminuyen los consorcios de microorganismo presentes, reflejo también por el desprendimiento de  $\text{C-CO}_2$  acumulado en el experimento. Acosta et al. (2006), menciona que en la mineralización del carbono orgánico, cuando comienza un proceso de degradación de materia orgánica fresca, se presenta una etapa muy activa, que corresponde a la liberación de materiales orgánicos lábiles (azúcares, amino-azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos), seguida de una segunda etapa en la que la actividad biológica es decreciente.

Para describir la evolución del carbono orgánico, según Guerrero-Ortiz et al. (2012), debe entenderse, en dos etapas; la primera de ellas corresponde al incremento en la actividad biológica y a la degradación por parte de los microorganismos de sustancias fácilmente biodegradables tales como azúcares, lípidos, fenoles, ácidos orgánicos, los cuales estimulan tanto el crecimiento como la respiración de un gran número de microorganismos, ya que son fuente de carbono y energía, de rápida utilización. La segunda etapa está descrita por la disminución en el desprendimiento de C-CO<sub>2</sub>, la cual define también un decrecimiento en la actividad biológica, como consecuencia de la disminución de las sustancias fácilmente biodegradables, provocando así su estabilización al final del proceso.

En este estudio se pudo reflejar el efecto que genera la incorporación de digestato en la degradación de rastrojo de trigo. Una mayor concentración generará un impacto positivo en los tiempos de degradación del material resistente, alcanzando su estabilización, junto con la eliminación de metabolitos fitotóxicos, observados en el rastrojo de trigo sin tratar.

## CONCLUSIONES

La incorporación de digestato como inoculante incide significativamente en la actividad microbiológica, acelerando el proceso de degradación de rastrojo de trigo, reflejado a través del desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub>. Se puede apreciar que en todos los tratamientos que se incorporó digestato, independiente de su concentración, generó una mayor actividad microbiológica y biodegradación del rastrojo de trigo; siendo más favorable para las concentraciones de 75% y 100% de digestato.

Esto incide en la tasa de mineralización de carbono orgánico del rastrojo de trigo, la cual aumenta a mayor concentración de digestato. Este proceso de mineralización del rastrojo de trigo, implica una disminución de carbono orgánico en los tratamientos y la estabilización del material tratado, sin la presencia de metabolitos fitotóxicos.

El manejo de rastrojo de trigo con la incorporación de digestato es beneficioso para el agricultor como una alternativa a la quema, porque acelera el proceso de degradación de materia orgánica resistente, aporta nutrientes y mejora de la estructura química del suelo. Al evitar las malas prácticas como la quema agrícola, se pueden reducir las emisiones de material particulado y de contaminantes efecto invernadero, con ello generar un impacto en el cuidado de la salud de las personas y en la conservación de los recursos naturales como el suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

Acosta, Y., J. Cayama, E. Gómez, N. Reyes, D. Rojas y H. García. 2006. Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias* 6(1): 220-227.

Aguilera, S. 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. [en línea]. Valdivia, Chile: Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo Boletín.Nº 14. 8p. Recuperado en: <[http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/121065/Suelos\\_AGUILERA\\_2000.pdf?sequence=1](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/121065/Suelos_AGUILERA_2000.pdf?sequence=1)> Consultado el: 20 Mayo de 2015.

Ayuso, M., Pascual, J. A., García, C., and Hernández, T. 1996. Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil science and plant nutrition*, 42(1), 105-111.

Bitton, G., Lahav, N., & Henis, Y. 1974. Movement and retention of Klebsiella aerogenes in soil columns. *Plant and Soil*, 40(2), 373-380.

Borie, G.; Aguilera, S. M.; Peirano, P. and Caiozzi, M. 1995. "Pool" lábil de carbono en suelos volcánicos chilenos. *Agricultura Técnica (Chile)*, 55(3-4), 262-266.

Buckman, H. y Brady, N. 1977. Naturaleza y propiedades de los suelos. México, Unión Tipografica Editorial Hispano Americana. 590p.

Dommergues, Y. 1968. Dégagement tellurique de CO<sub>2</sub>: Mesure et signification. *Annales de l'Institut Pasteur*. 4 (115): 626 – 656

Dommergues, Y, Mangenot, F. 1970. Ecologie microbienne du sol. Masson Editorial, Paris, France.

Evans, L.T. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 501p

Fließbach, A.; Mäder, P.; Wolewinski, K. and Niggli, U. (1998). Carbon and nitrogen dynamics in soils of organic and conventional agricultural systems. World Congress of Soil Science (26, August 1998, Montpellier, France). Proceedings of the conference, Montpellier, France ISSS, ed. 20p.

Fundación Chile. 2011. Manual de recomendaciones cultivo de trigo. [en línea]. Santiago, Chile: Fundación Chile. Recuperado en: <[http://www.fch.cl/wp-content/uploads/2013/06/ManualTrigo\\_baja7853253.pdf](http://www.fch.cl/wp-content/uploads/2013/06/ManualTrigo_baja7853253.pdf)>. Consultado el: 12 de Octubre de 2015.

Guerrero-Ortiz, P. L., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G. S., y de Jesús Sánchez-Colín, M. 2012. Respiración de CO<sub>2</sub> como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos De lupinus. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 355-362.

Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. 1999. Soil fertility and fertilizers. 6<sup>a</sup>. Ed. *NJ Prentice Hall*. 503p.

Hetz H, Edmundo, de la Cerda A, Janette, & López R, Marco. 2006. Disponibilidad de Paja en los Rastrojos de Trigo en Tres Provincias de Chile. *Agricultura Técnica*, 66(4), 393-401

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2012. Agropecuarias: Informe Anual 2012. [en línea]. Santiago, Chile: INE. 163p. Recuperado en: <[http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario\\_de\\_publicaciones/pdf/agropecuarias\\_informe\\_anual\\_2012.pdf](http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/agropecuarias_informe_anual_2012.pdf)>. Consultado el: 13 de Octubre de 2014

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2013. Compendio Estadístico 2013. [en línea]. Santiago, Chile: INE. 511p. Consultado en: <[http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario\\_de\\_publicaciones/pdf/COMPE\\_NDIO\\_2013.pdf](http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/COMPE_NDIO_2013.pdf)>. Consultado el: 13 de Octubre de 2014

INN (Instituto Nacional de Normalización). 2015. Norma Chilena de Compost pr2880-2015 (NCh 2880-2015): Clasificación y Requisitos. Santiago, Chile: INN. 17 pp.

Levi-Minzi, R., Riffaldi, R., & Saviozzi, A. 1990. Carbon mineralization in soil amended with different organic materials. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 31(4), 325-335.

Lindh, D. 2004. Degradación de paja de trigo adicionada de una fuente de carbono o nitrógeno por tres cepas de hongos. [en línea]. 171p. Valdivia, Chile: Universidad Austral. Recuperado en: <<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/fal745d/html/index-frames.html>>. Consultado en: 13 de Octubre de 2014

Martínez, H.; J. Fuentes, J.; Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.

Mascayano, C. 2001. Establecimiento de un índice de Actividad Biológica Global del suelo en ecosistemas áridos de la IV región. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 61p.

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2012. Mercado del trigo en Chile: Producción y comercialización en la temporada 2011/12. [en línea]. Santiago, Chile: ODEPA, Ministerio de Agricultura. 9p. Recuperado en: <<http://www.odepa.cl/odepaweb/publicaciones/doc/6105.pdf>>. Consultado en: 14 de Octubre de 2014.

PNUMA (Programa para las Naciones Unidas por el Medio Ambiente). 2005. Productos Químicos: Emisiones de dioxinas y furanos por quema incontrolada de biomasa. Ginebra, Diciembre 2005. 32p. (Programa Interinstitucional para el Manejo Adecuado de los Productos Químicos (IOMC))

Rivero, C. y E. Hernández. 2001. Efecto de la aplicación de dos tipos de compost en la evolución de CO<sub>2</sub> y la actividad de fosfatasa en un suelo inceptisol. *Venezuelos* 9(1): 24-32.

Robin, D. and Le Quellec, S. 1997. Evaluation et classification des fertilisants organiques: Intérêt de la caractérisation biochimique de la matière organique. Extrait de Phytoma, La Défense des Végétaux, N° 495. 4p.

Roca-Pérez, L., Martínez, C., Marcilla, P., & Boluda, R. (2009). Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on the soil-plant system. *Chemosphere*, 75(6), 781-787.

Santibañez, C. 2002. Diseño y evaluación de una planta piloto de compostaje para tratamiento de residuos de origen vegetal. Memoria Químico Ambiental. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. 106p.

SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental). 2012. Anteproyecto del plan de descontaminación atmosférica para el valle central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. [en línea]. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente. 38p. Recuperado en: <[http://www.sinia.cl/1292/articles-52311\\_AnteproyectoPlan.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-52311_AnteproyectoPlan.pdf)>. Consultado el: 14 de Octubre de 2014.

TMECC (Test methods for the Examination of Composting and Compost). 2004. The composting council research and education foundation. U.S: Composting Council Research and education Foundation. [en línea]. Recuperado en: <<http://www.tmecc.org>>. Citado en: 30 de Mayo de 2014.

Uribe, J. M. 1993. Evaluación de la producción de biogás en material vegetativo de tuna, sometido a un proceso de fermentación mecánica. Tesis Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. 47 p.

Varnero M. T. 2005. Principios básicos del proceso de compostaje: aspectos técnicos, legales y desafíos. V Taller de producción de compost. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 25p.

Varnero, M. T. 1990. Microbiología de suelos: Evaluación de la actividad microbiana. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos, Universidad de Chile. 10p.

Varnero, M.T. 2001. Desarrollo de substratos: Compost y Bioabonos. En: Experiencias Internacionales en la Rehabilitación de Espacios Degradados. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Publicaciones Misceláneas Forestales N° 3, 21 –30. 123p.

Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos: informe Técnico. Ministerio de Agricultura (FIA). Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. 98p.

Varnero, M.T., C. Rojas y R. Orellana. 2007. Indices de fitotoxicidad de residuos orgánicos durante el compostaje. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 7(1): 28-37.

Varnero, M.T., C. Rojas., R. Orellana y E. Sotomayor. 2005. Fitotoxicidad de extractos de residuos orgánicos y su efecto sobre el índice de germinación de rabanito y pepino. Revista *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 5(2): 61-66.

Viteri, S.; Granados, M; González, A. 2008. Potencial de los caldos rizósfera y súper cuatro como biofertilizantes para la sostenibilidad del cultivo de cebolla de bulbo (*Allium cepa*). *Agronomía Colombiana*, 26 (3): 517-524.

Wu, H., Pratley, J., Lemerle, D., & Haig, T. 2000. Evaluation of seedling allelopathy in 453 wheat (*Triticum aestivum*) accessions against annual ryegrass (*Lolium rigidum*) by the equal-compartment-agar method. *Crop and Pasture Science*, 51(7), 937-944.

Zapata, R. 2006. Acidificación por nutrición de plantas: acidificación y pérdidas de base (pp. 192-207). Química de los procesos pedogenéticos. [en línea]. Medellín, Colombia: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. 358 p. Recuperado en:< <http://unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/Quimica%20de%20los%20procesos%20pedogeneticos.pdf>>. Consultado el: 20 de julio de 2015.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldi, M. 1981. Evaluating Toxicity of Immature Compost. *Biocycle* 22: 54-57.

## APÉNDICES

### Apéndice I. Registro datos de desprendimiento diario de CO<sub>2</sub> en 30 días.

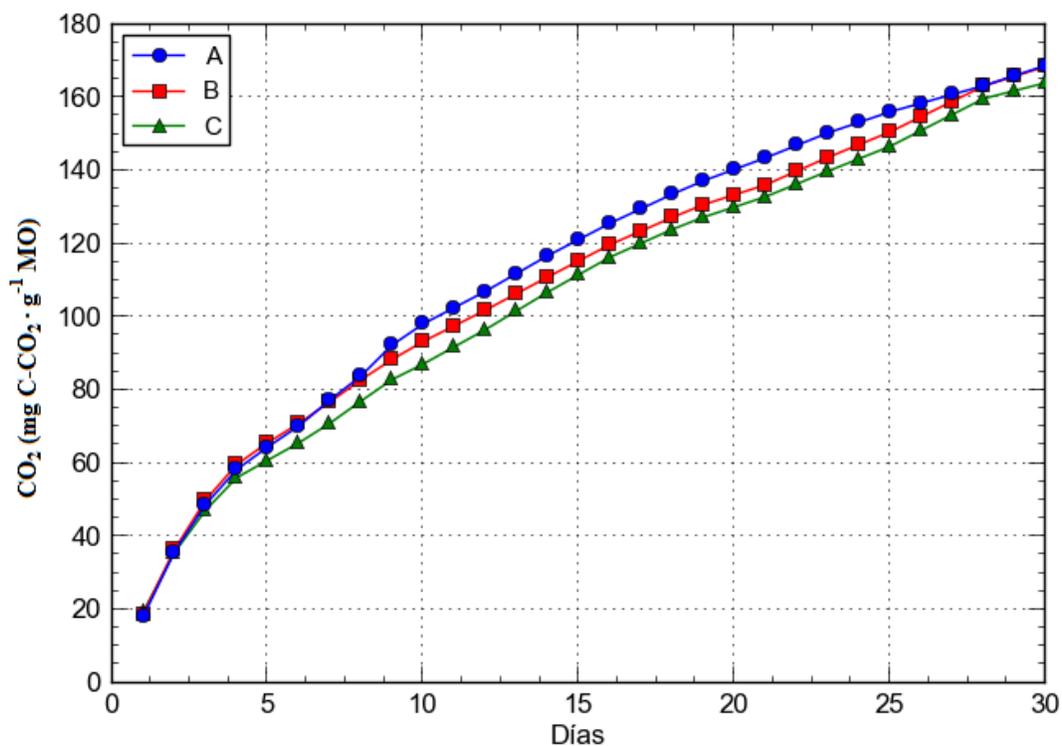
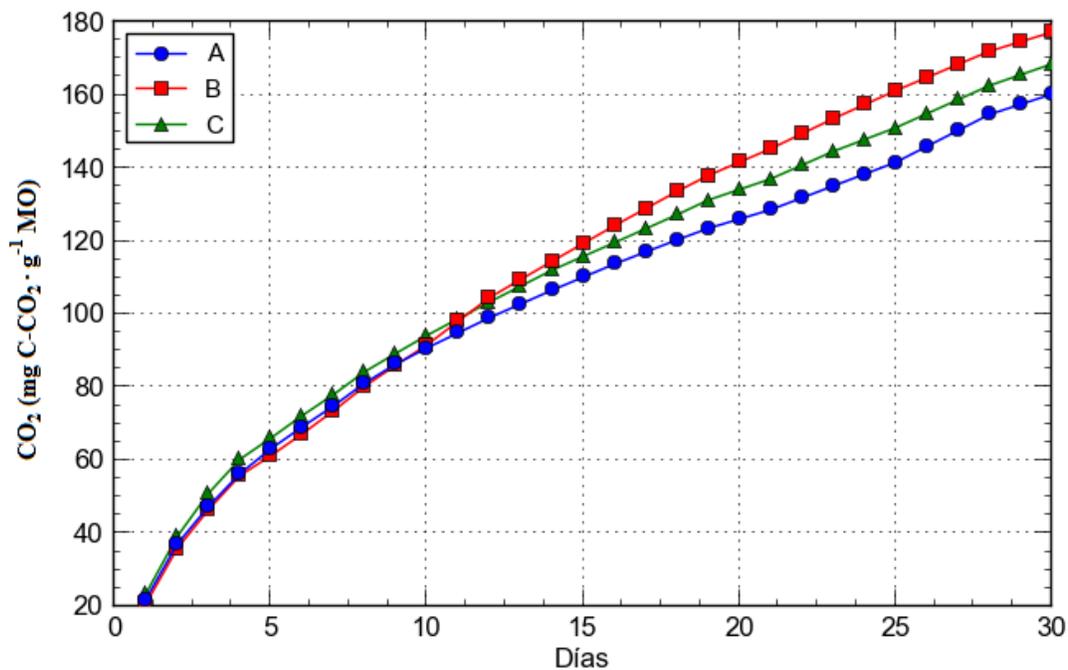
Cuadro 8. Datos corregidos de desprendimiento diario de CO<sub>2</sub>.

Día	Tratamientos				
	T1	T2	T3	T4	T5
	(mg C-CO <sub>2</sub> · g <sup>-1</sup> MO · d <sup>-1</sup> )				
1	18,75	22,05	22,62	23,23	23,94
2	17,09	15,27	16,36	16,63	14,42
3	12,69	10,91	10,87	11,41	11,59
4	9,43	9,19	9,64	9,21	9,69
5	5,66	6,09	6,72	6,49	7,68
6	5,26	6,03	7,19	7,24	7,86
7	6,12	5,91	6,08	6,66	6,21
8	6,23	6,43	8,01	8,23	7,92
9	6,63	5,34	6,25	6,37	6,68
10	4,97	4,99	5,73	6,14	6,15
11	4,49	5,05	5,06	5,39	5,62
12	4,49	5,05	5,06	5,39	5,62
13	4,83	4,36	3,92	4,29	4,7
14	4,83	4,36	3,92	4,29	4,7
15	4,54	4,08	4,15	4,81	5,08
16	4,54	4,08	4,15	4,81	5,08
17	3,83	3,93	3,68	4,49	4,49
18	3,83	3,93	3,68	4,49	4,49
19	3,49	3,85	3,8	4,58	4,67
20	2,89	3,04	3,33	3,97	3,93
21	2,89	3,04	3,33	3,97	3,93
22	3,54	3,7	4,24	4,95	5,26
23	3,54	3,7	4,24	4,95	5,26
24	3,26	3,44	3,59	5,16	5,05
25	3,26	3,44	3,59	5,16	5,05
26	2,42	2,62	3,21	3,84	4,14
27	2,42	2,62	3,21	3,84	4,14
28	2,42	2,62	3,21	3,84	4,14
29	2,54	2,78	3,13	3,77	3,72
30	2,54	2,78	3,13	3,77	3,72

**Apéndice II. Registro datos de desprendimiento acumulado de CO<sub>2</sub> en 30 días.**

Cuadro 9. Datos corregidos de desprendimiento acumulado de CO<sub>2</sub>.

Día	Tratamientos				
	T1	T2	T3	T4	T5
	(mg C-CO <sub>2</sub> · g <sup>-1</sup> MO)				
1	18,75	22,05	22,72	23,39	23,94
2	35,84	37,32	39,16	40,13	38,36
3	48,53	48,22	50,08	51,62	49,95
4	57,97	57,41	59,77	60,89	59,64
5	63,63	63,49	66,52	67,43	67,33
6	68,89	69,52	73,74	74,72	75,19
7	75	75,44	79,85	81,42	81,4
8	81,23	81,87	87,89	89,71	89,32
9	87,87	87,2	94,17	96,12	96
10	92,84	92,2	99,93	102,31	102,15
11	97,33	97,25	105,01	107,73	107,76
12	101,81	102,3	110,08	113,15	113,38
13	106,65	106,67	114,02	117,47	118,08
14	111,48	111,03	117,95	121,79	122,78
15	116,02	115,11	122,12	126,63	127,86
16	120,57	119,18	126,29	131,47	132,94
17	124,4	123,11	129,99	135,99	137,44
18	128,23	127,05	133,69	140,51	141,93
19	131,71	130,89	137,5	145,12	146,6
20	134,6	133,94	140,85	149,11	150,53
21	137,49	136,98	144,2	153,11	154,46
22	141,03	140,68	148,45	158,1	159,72
23	144,58	144,38	152,71	163,08	164,98
24	147,83	147,83	156,32	168,27	170,04
25	151,09	151,27	159,93	173,46	175,09
26	153,51	153,9	163,16	177,33	179,23
27	155,93	156,52	166,39	181,2	183,37
28	158,35	159,14	169,62	185,07	187,5
29	160,9	161,92	172,76	188,86	191,23
30	163,44	164,71	175,9	192,65	194,95

Apéndice III. Desprendimiento acumulado de CO<sub>2</sub>.Figura 7. Desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T1 (A, B, C).Figura 8. Desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T2 (A, B, C).

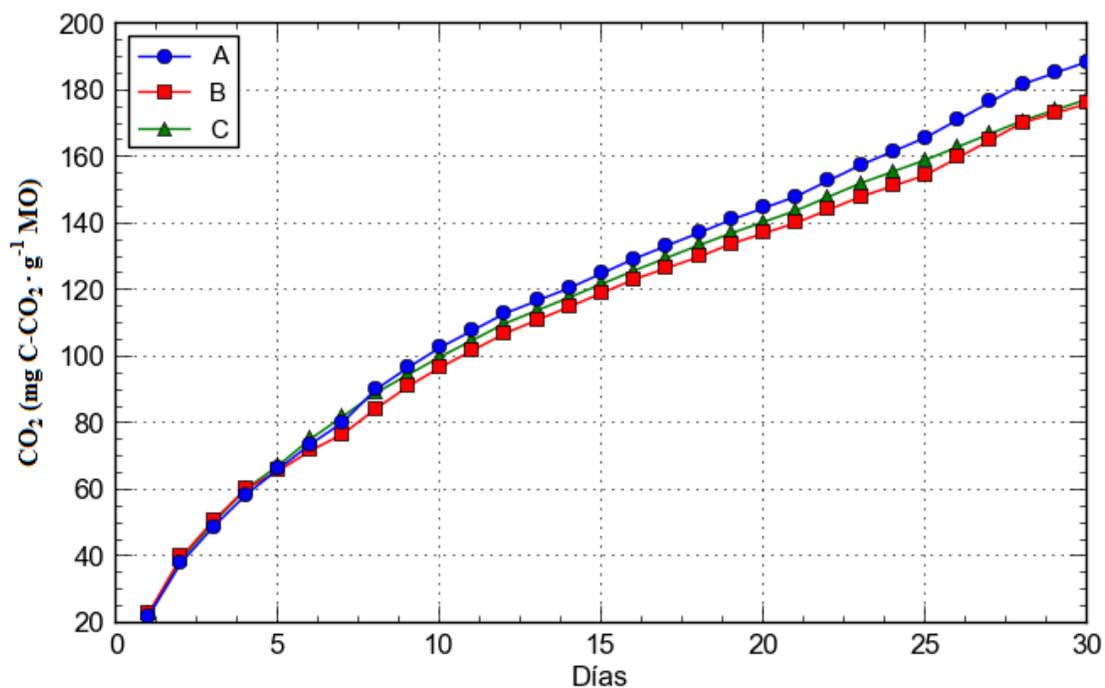


Figura 9. Desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T3 (A, B, C).

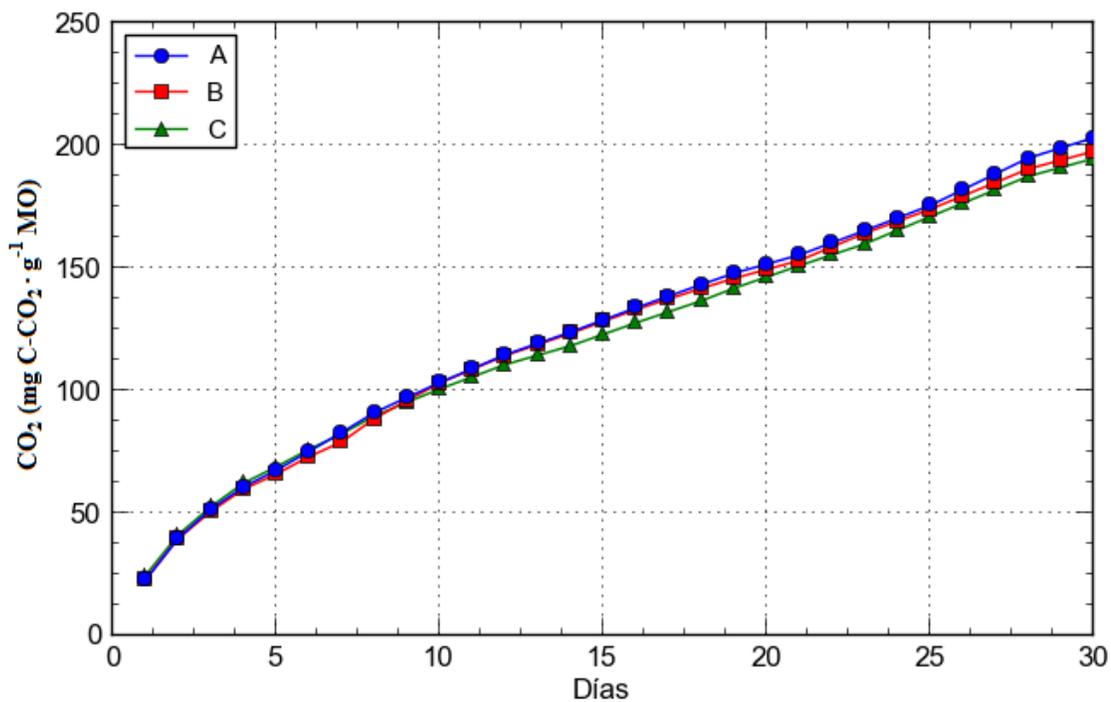


Figura 10. Desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T4 (A, B, C).

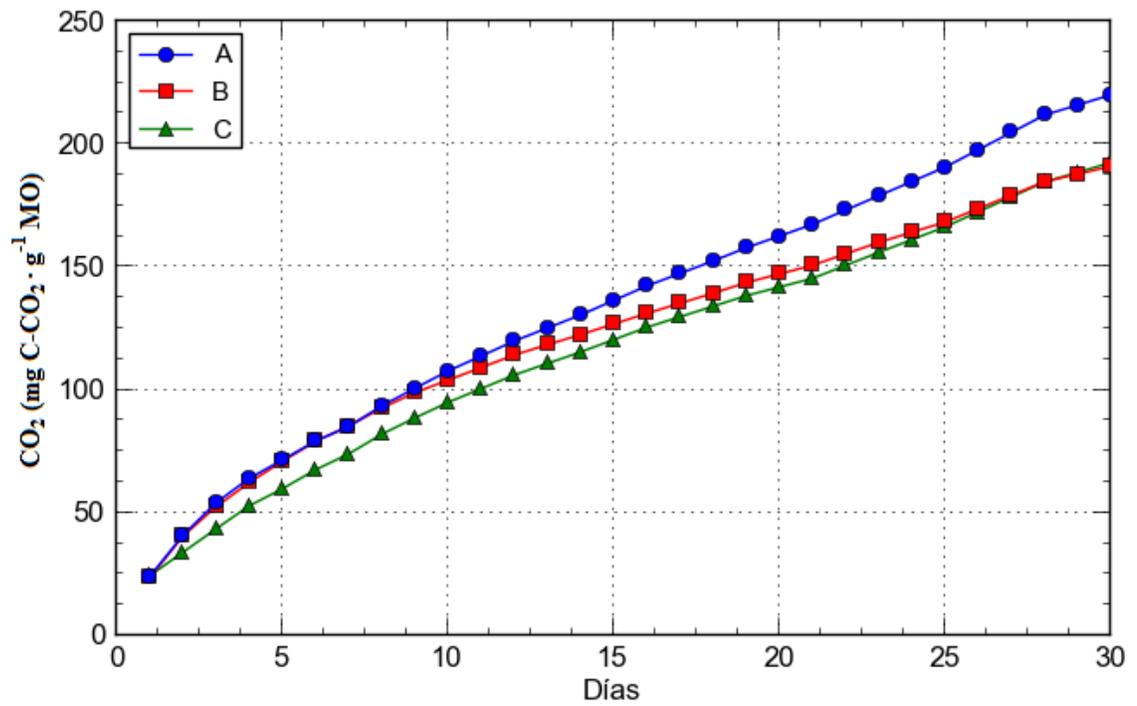
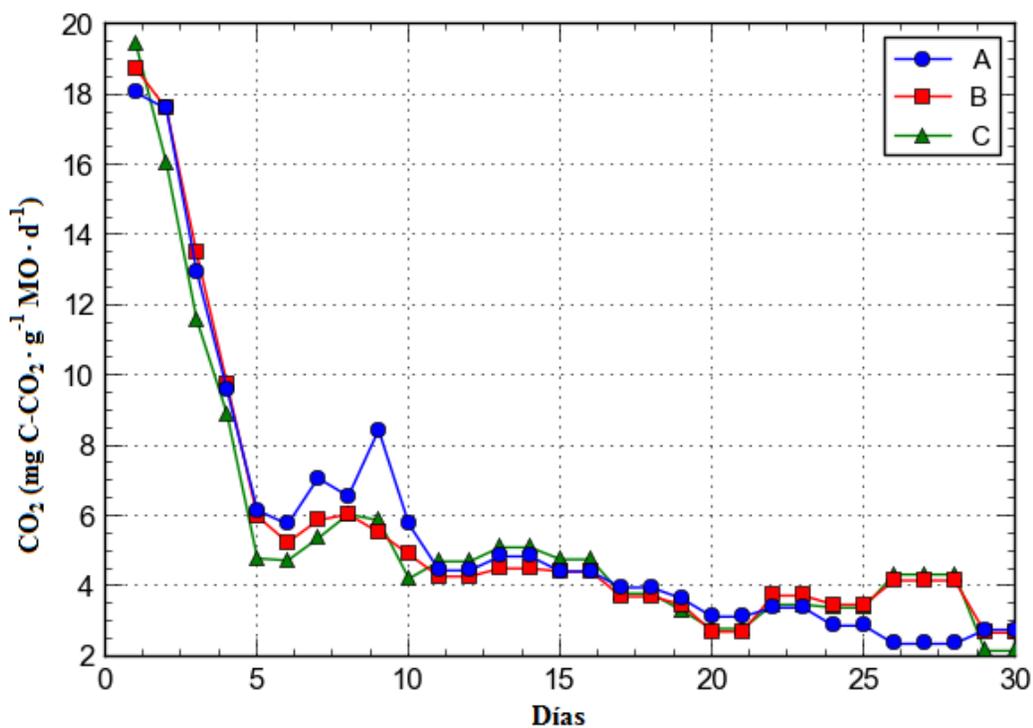
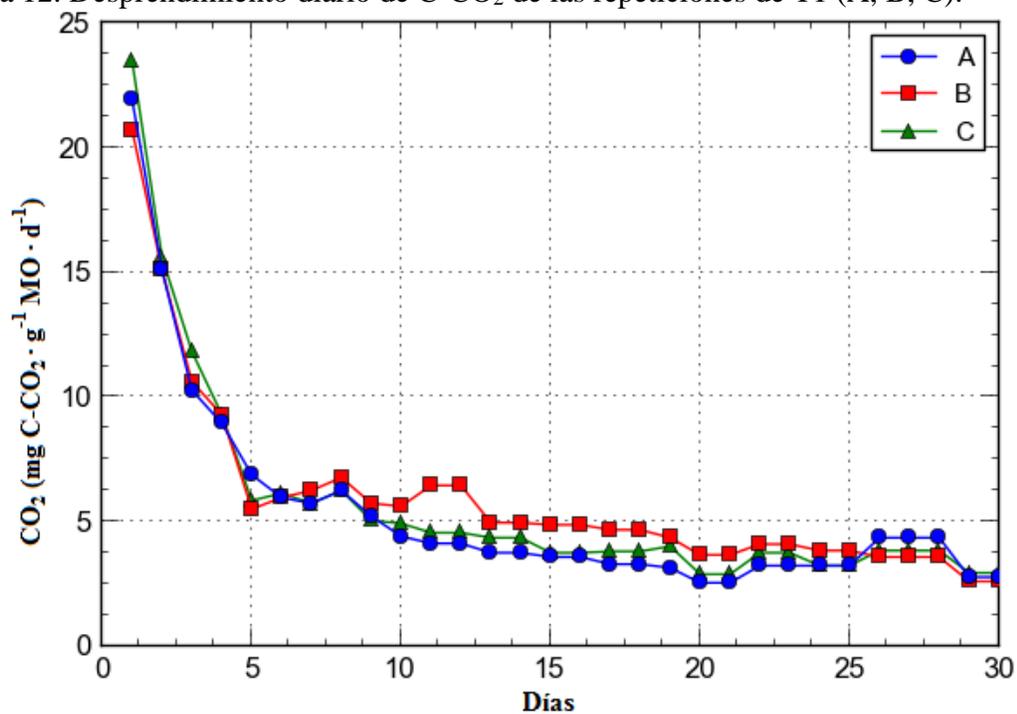


Figura 11. Desprendimiento acumulado de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T5 (A, B, C).

Apéndice IV. Desprendimiento diario de CO<sub>2</sub>.Figura 12. Desprendimiento diario de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T1 (A, B, C).Figura 13. Desprendimiento diario de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T2 (A, B, C).

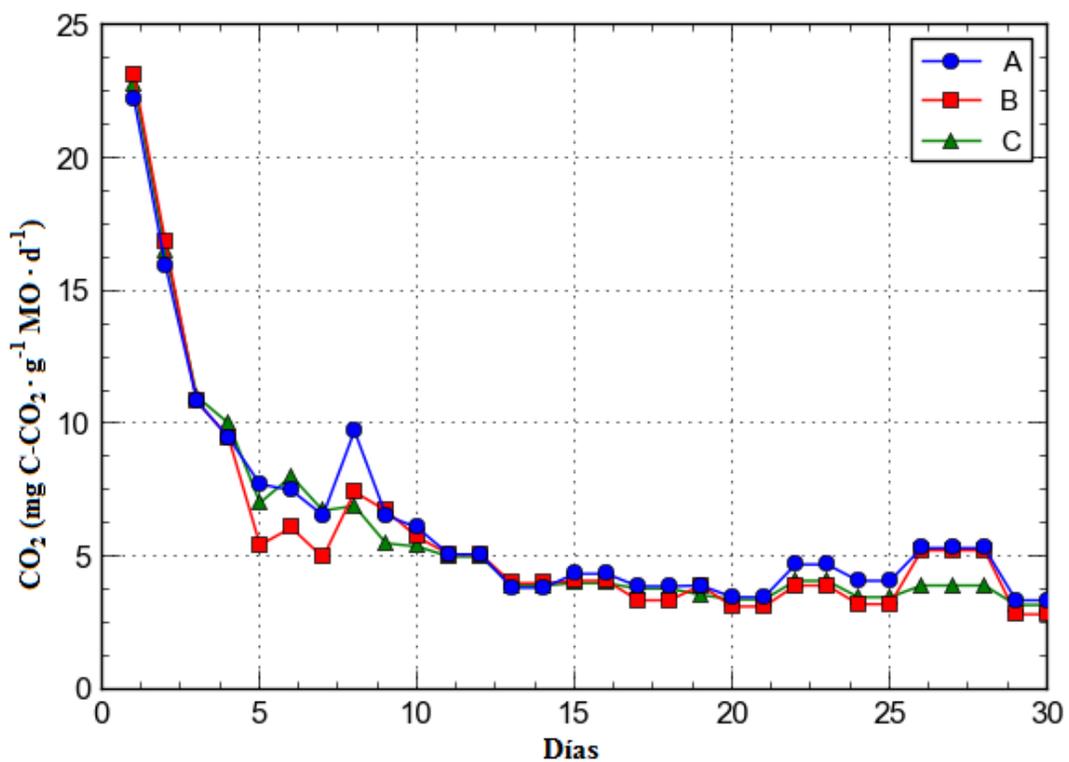


Figura 14. Desprendimiento diario de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T3 (A, B, C).

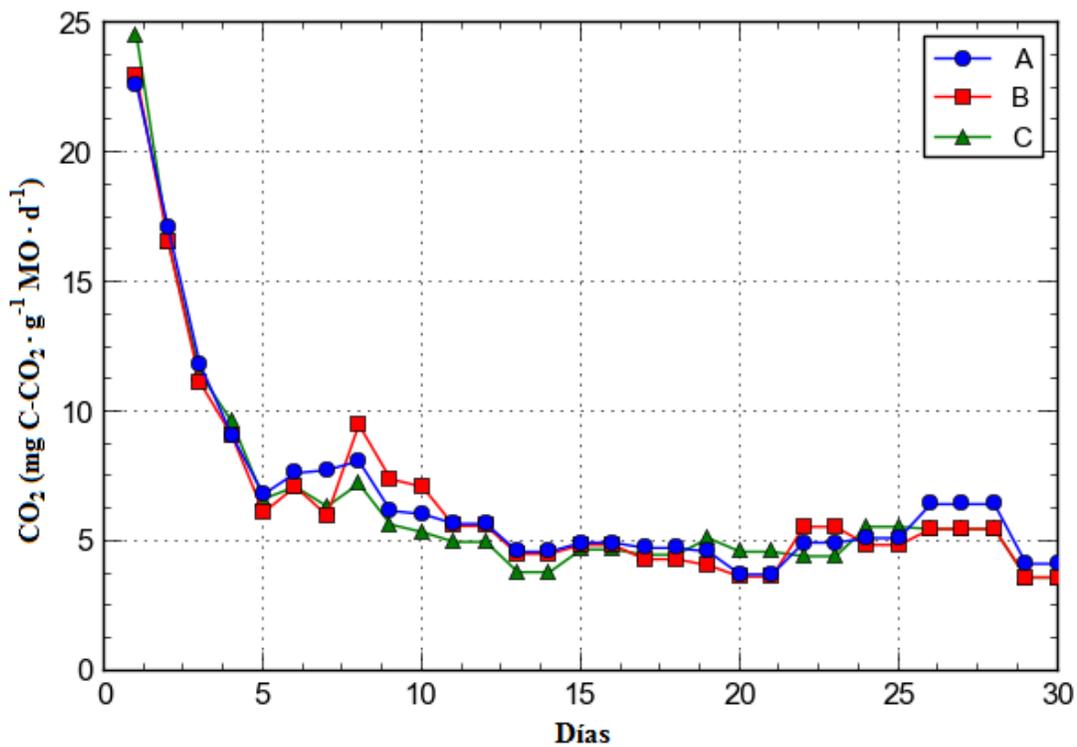


Figura 15. Desprendimiento diario de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T4 (A, B, C).

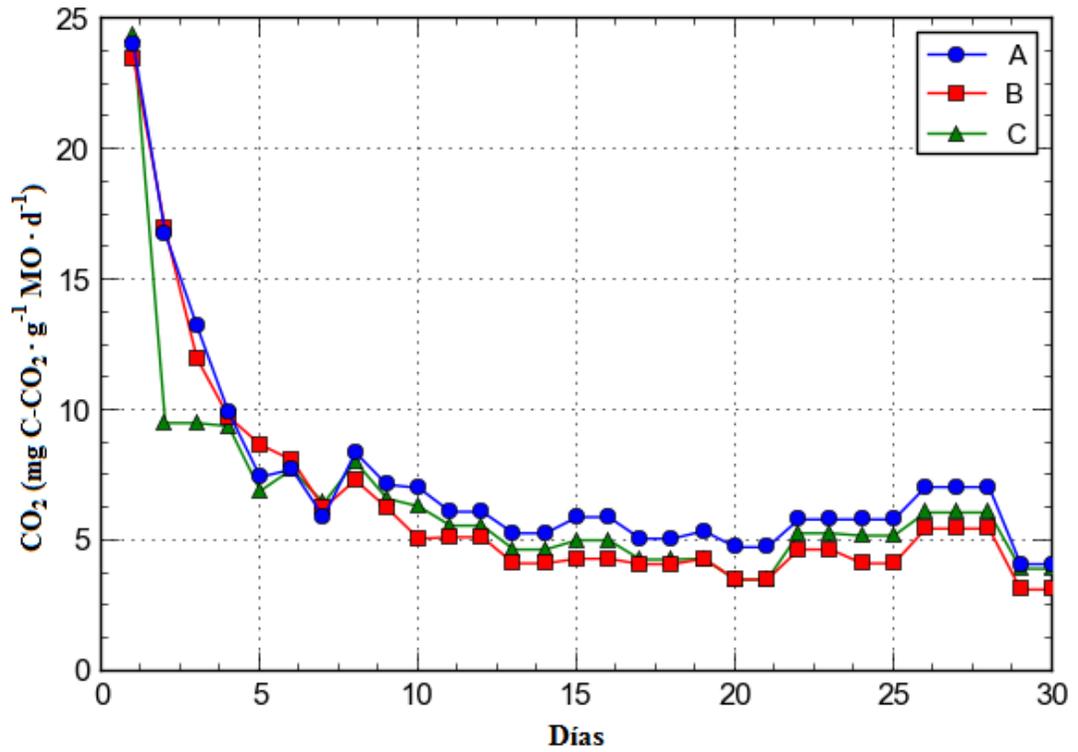


Figura 16. Desprendimiento diario de C-CO<sub>2</sub> de las repeticiones de T5 (A, B, C).