

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## MICROORGANISMOS BENÉFICOS PARA EL COMPOSTAJE DE MACRÓFITAS INVASORAS DE LA LAGUNA COLOMBIANA DE FÚQUENE

\* Patricia Martínez-Nieto<sup>1</sup>  
Beatriz Chaparro-Rico<sup>2</sup>

*BENEFICIAL MICROORGANISMS FOR POLLUTING  
MACROPHYTES COMPOSTING OF A COLOMBIAN LAKE  
FÚQUENE*

*Recibido el 4 de enero de 2013; Aceptado el 22 de marzo de 2013*

### Abstract

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes* C. Mart.) and Brazilian elodea (*Egeria densa* Planch.) are non-native aquatic macrophytes in Lake Fúquene (Colombia) that cover more than 70% of the water body. As a control technique, the macrophytes are harvested by mechanical means and they can be exploited by composting using native beneficial microorganisms to accelerate the process and also to improve the final product quality. In this research, from five composting treatments with these macrophytes, 159 microbial strains were isolated and by testing antagonism, 16 bacteria, 24 fungi and 21 actinomycetes were chosen to produce three inoculants by submerged fermentation. The microbial inoculants were added in a second composting, using the best first composting treatments. By inoculating the microorganisms, the degradation process was accelerated between 23 to 35%. The assay conducted on radish seedlings (*Raphanus sativus* L.), using as treatments, compost with microbial inoculants (T2i, T4i and T5i) and chicken manure at 33% mixed with soil (control), showed no significant differences ( $P < 0.05$ ) with respect to growth, bulb formation and bulb weight. However, compost inoculated treatments showed significant increases in leaf nutrients compared with chicken manure. The use of microorganisms showed to be an efficient technique for the aquatic invasive plant management of Lake Fúquene using composting to obtain a very high quality agricultural product with good nutritional and biological quality.

**Key words:** Water hyacinth, Brazilian elodea, Lake Fúquene, Endogenous microbial inoculants, composting.

<sup>1</sup> Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, Ciencia y la Cultura (OEI), Colombia

<sup>2</sup> Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible. CAR, Colombia

\* Autor correspondiente: Calle 142 No 13-49 interior 2. Conjunto Residencial "El Pórtico", Bogotá, Colombia.  
Email: [patingli@yahoo.com](mailto:patingli@yahoo.com)

## Resumen

Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes* C. Mart.) y elodea brasilera (*Egeria densa* Planch.) son macrófitas acuáticas introducidas en la Laguna colombiana de Fúquene que cubre más del 70 % del espejo de agua. Las macrófitas son cosechadas mecánicamente como técnica de control y pueden ser aprovechadas mediante compostaje utilizando microorganismos benéficos nativos para acelerar el proceso y mejorar la calidad del producto final. En esta investigación a partir de cinco tratamientos de compostaje con estas macrófitas, se aislaron 159 cepas microbianas escogiendo mediante pruebas de antagonismo 16 bacterias, 24 hongos y 21 actinomicetos para la producción de tres inóculos mediante fermentación sumergida. Estos inoculantes microbianos fueron agregados en un segundo proceso de compostaje utilizando los mejores tratamientos del primer compostaje. El proceso de degradación se aceleró entre 23 a 35 % con la inoculación de los microorganismos. El ensayo realizado en plántulas de rabanito (*Raphanus sativus* L.), utilizando como tratamientos compost inoculados (T2i, T4i y T5i) y suelo con gallinaza al 33 % (control), no mostraron diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) con relación al crecimiento, formación y peso de los bulbos. Sin embargo, los tratamientos con compost inoculados presentaron incrementos significativos en el contenido de nutrientes foliares en comparación con la gallinaza. El uso de microorganismos demostró ser una alternativa eficiente para manejar estas plantas acuáticas invasoras de la Laguna de Fúquene mediante compostaje y obtener un producto de buena calidad nutricional y biológica promisorio para la agricultura.

**Palabras claves:** Jacinto de agua, elodea brasilera, Laguna de Fúquene, inoculantes microbianos endógenos, compostaje.

---

## Introducción

La cuenca de la laguna de Fúquene es un ecosistema estratégico para el desarrollo económico de 17 municipios ubicados en los departamentos colombianos de Boyacá y Cundinamarca. Sin embargo, la fuerte presión antrópica ejercida sobre la laguna ha generado varios problemas ambientales entre los que se encuentra el crecimiento exagerado de las plantas acuáticas invasoras, jacinto de agua (*Eichhornia crassipes* C. Mart.) y elodea brasilera (*Egeria densa* Planch.). Estas macrófitas han desplazado especies nativas, producido inundaciones e impedido el drenaje, la navegación y pesca (Maya *et al.*, 2004; Andrade y Franco, 2007).

En Colombia estas plantas acuáticas invasoras son extraídas mecánica y manualmente de las fuentes de agua contaminadas y se han realizado estudios para tratarlas mediante compostaje utilizando diferentes inoculantes biológicos como el hongo comestible *Pleurotus ostreatus*, microorganismos celulolíticos, proteolíticos y amilolíticos (MCPA) y microorganismos eficientes (EM, por sus siglas en inglés) (Alomía *et al.*, 2011; Martínez-Nieto *et al.*, 2011a, 2011b). La utilización de bio-preparados comerciales en el compostaje ha generado ciertas controversias, debido a que algunos investigadores no han encontrado diferencias significativas con la inoculación (California Integrated Waste Management Board, 2001; Acevedo *et al.*, 2005); mientras que otros si reportan incrementos en rendimiento, eliminación de patógenos y contenido de nutrientes (Barrena *et al.*, 2006; Kavitha y Subramanian, 2007; Ming *et al.*, 2009). Tratando de superar esta problemática se ha experimentado con microorganismos autóctonos obteniendo buenos resultados en la aceleración del proceso de compostaje por incremento en

la degradación de lignina y rápida disminución de la relación carbono/nitrógeno en el tiempo (Vargas-García *et al.*, 2007; Cariello *et al.*, 2007; Sarkar *et al.*, 2010).

Con base en lo anterior en esta investigación se aislaron microorganismos endógenos del proceso de compostaje de las macrófitas acuáticas invasoras de la laguna de Fúquene, jacinto de agua y elodea brasilera, para evaluar su efecto en la aceleración del proceso de degradación y en el crecimiento vegetal.

## Materiales y métodos

### Residuos para el proceso de compostaje

Se utilizaron como sustratos base, jacinto de agua y elodea brasilera extraídos mecánicamente de la laguna de Fúquene. Adicionalmente se recolectaron residuos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y estiércol bovino en la zona rural del municipio de Fúquene, con el fin de nivelar las relaciones carbono/nitrógeno, carbono/fósforo y el contenido de humedad dentro de los rangos ideales para compostaje: 20-30/1, 75-175/1 y 40-60 % respectivamente (Abaunza *et al.*, 2008; Washington State University, 2009). La composición nutricional de los residuos vegetales que se usaron en el proceso de compostaje se observan en la tabla 1. Sustancias nocivas como metales pesados se encuentran dentro de los límites exigidos por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 expedida por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC, 2004). Concentraciones entre 0- 0.027 mg kg<sup>-1</sup>, 0.2-0.37 mg kg<sup>-1</sup>, 0.37-0.94 mg kg<sup>-1</sup>, 2.58-7.78 mg kg<sup>-1</sup> y 2.38-2.92 mg kg<sup>-1</sup>, fueron encontradas para arsénico, cadmio, cromo, níquel y plomo, respectivamente. Mercurio no se detectó en ninguno de los residuos vegetales.

**Tabla 1.** Análisis foliares realizados a los residuos de macrófitas acuáticas y frijol en el municipio de Fúquene

SUSTRATOS	ELEMENTO												
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Jacinto de agua	40.2	0.9	0.1	3.1	1.4	0.5	0.3	0.3	9422.0	390.0	4.0	65.6	15.2
Elodea brasilera	37.8	2.8	0.4	3.9	1.9	0.4	0.9	0.9	5076.0	1970.0	6.7	38.2	41.4
Frijol	49.2	0.6	0.03	0.4	0.6	0.3	0.02	ND	46.0	31.0	46.0	64.9	10.3

ND: No detectado

### Compostaje de macrófitas acuáticas invasoras bajo condiciones de invernadero

Con base en el contenido de nutrientes y humedad se estableció un diseño experimental con cinco tratamientos y dos repeticiones para un total de diez unidades experimentales. En los tratamientos se utilizaron mezclas diferentes de los sustratos (Tabla 2) más melaza (3%) y cal (0,4%). El montaje se realizó bajo condiciones de invernadero en diez cajas de madera de 1m<sup>3</sup>

con tapa de plástico negro calibre 6, agregando inicialmente cascarilla de arroz, después las mezclas de residuos de acuerdo al tratamiento y al final la tierra.

**Tabla 2.** Tratamientos utilizados en el diseño experimental en el municipio de Fúquene bajo condiciones de invernadero

Tratamiento	Sustrato (kg)						Total
	Cascarilla arroz	Jacinto de agua	Elodea brasilera	Frijol	Estiércol bovino	Tierra	
1	1	69	41	0	0	28	139
2	1	37	37	64	0	28	167
3	1	69	0	69	0	28	167
4	1	0	97	69	0	28	194
5	1	37	37	64	28	28	195

Todas las unidades experimentales fueron monitoreadas durante tres meses, registrando temperatura, pH y humedad. Cuando los tratamientos alcanzaron la etapa de curado, se tamizaron y se les realizó diferentes análisis como el test de fitotoxicidad en rabanito, relaciones carbono/nitrógeno, pH, humedad, densidad aparente, nitrógeno total, impurezas, metales pesados, recuento de microorganismos (bacterias, hongos y actinomicetos) y *Salmonella* sp. Adicionalmente se realizaron Coliformes totales y *Escherichia coli* al tratamiento 5 por contener estiércol bovino. Los resultados permitieron establecer la calidad de los compost producidos con base en la normatividad colombiana y la internacional consultada (Washington State Department of Ecology, 1994; Hogg *et al.*, 2002; ICONTEC, 2004; Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2005; Ge *et al.*, 2006).

#### Cultivo y aislamiento de microorganismos involucrados en el compostaje

En las diferentes etapas del compostaje (mesófila, termófila, enfriamiento y maduración) de los cinco tratamientos y sus repeticiones, se realizaron recuentos de hongos, bacterias y actinomicetos usando los medios, agar Rosa de Bengala, agar Topping y agar caseína almidón suplementado con ácido nalidixico ( $50 \text{ mg L}^{-1}$ ) respectivamente. A partir del crecimiento en los diferentes medios se aislaron los microorganismos presentes por siembras sucesivas en estos medios y en agar nutritivo hasta su purificación (Gbolagade, 2006; Majumder *et al.*, 2008; Rebolledo *et al.*, 2008).

#### Pruebas de antagonismo

Siguiendo la metodología propuesta por Martínez *et al.* (2003) se llevaron a cabo tres técnicas de antagonismo: anillos, enfrentamiento y estrías de acuerdo a los grupos microbianos a investigar: bacterias, hongos y actinomicetos, respectivamente. La selección de los microorganismos para la producción de los tres inóculos se realizó con las cepas que no

presentaron inhibición del crecimiento entre cada grupo de bacterias, hongos o actinomicetos (Cariello *et al.*, 2007).

#### Identificación de los microorganismos escogidos por antagonismo

Las cepas microbianas escogidas para la producción de inoculantes fueron identificadas mediante características microscópicas, macroscópicas, micro-cultivos y pruebas bioquímicas (Barnett y Hunter, 1972; Samson *et al.*, 2000; Miyadoh *et al.*, 2002; Brenner *et al.*, 2005). En el caso de las bacterias se utilizaron los sistemas comerciales BBL Cristal Gram positive ID System y BBL Cristal Enteric/Non fermenter ID System (Becton Dickinson).

#### Producción de inóculos microbianos mediante fermentación sumergida

Las fermentaciones de las bacterias, hongos y actinomicetos escogidos por antagonismo se realizaron por duplicado, en fermentadores de 5 L que trabajaron durante 48 horas para bacterias y 5 días para hongos y actinomicetos, a 28 ° C, 150 rpm y con aire suministrado mediante un motor de pecera, para producir 2250 mL de cada inóculo en fase líquida. En cada proceso se realizó recuento en placa estimando UFC mL<sup>-1</sup> y medición de valores del pH.

#### Evaluación de los inóculos microbianos en procesos de compostaje

Se montó un diseño experimental completo al azar por triplicado con los tres mejores tratamientos escogidos en el compostaje inicial e inoculados al 5 % con los preparados microbianos para un total de 9 unidades experimentales. La calidad de los abonos producidos se llevó a cabo de la forma descrita para el primer diseño y se compararon los resultados de los dos diseños experimentales para observar diferencias entre los compost con y sin inoculación microbiana. El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza de una sola vía ( $P < 0,05$ ) y prueba de Rango Múltiple de Duncan para determinar diferencias significativas entre las medias.

#### Ensayo in vivo para determinar capacidad estimuladora de crecimiento vegetal de los abonos producidos por inoculación microbiana

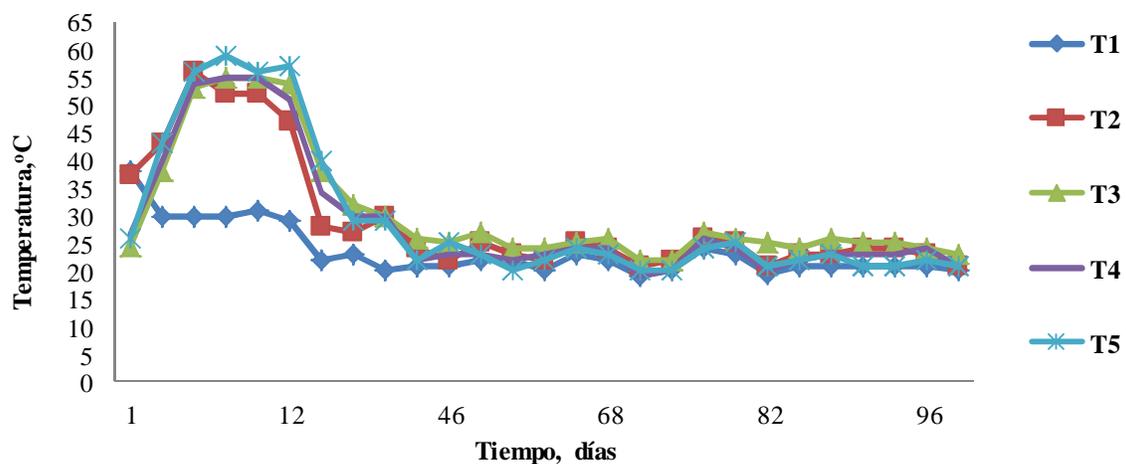
Los compost obtenidos a partir de la inoculación microbiana se probaron como estimuladores del desarrollo vegetal de rabanito mediante un diseño completo al azar con cuatro tratamientos, tres repeticiones y tres unidades experimentales por repetición, para un total de 36 unidades experimentales. Los parámetros vegetales que se evaluaron fueron biomasa aérea, área foliar, peso de bulbo, porcentaje de formación de bulbo, nitrógeno total en los sustratos y contenido de nutrientes foliares. Las plántulas de rabanito se obtuvieron de semillas comerciales y se trasplantaron cuando alcanzaron altura promedio de 5 cm en bolsas plásticas con 250 g de los diferentes tratamientos (los tres compost inoculados con los consorcios microbianos y suelo con gallinaza al 33 % como control). Los datos obtenidos se trataron estadísticamente mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía ( $P < 0,05$ ) y con la

prueba de Rango Múltiple de Duncan, para determinar diferencias significativas entre las medias.

## Resultados y discusión

### Compostaje de macrófitas acuáticas invasoras bajo condiciones de invernadero

Todos los tratamientos presentaron las etapas típicas de un proceso de compostaje, a excepción del tratamiento 1 (T1) que no presentó etapa termófila (figura 1), debido posiblemente a la infiltración de agua de lluvia a través del plástico negro al inicio del proceso que aumentó su humedad por encima de 75 % e incidió en la duración del proceso. Porcentajes de humedad altos producen baja eficiencia en el proceso de degradación por ausencia de una verdadera fase termófila en las partes superiores y capas medias de las pilas de compostaje (Luo *et al.*, 2008). Este hecho limita el contenido de oxígeno haciendo lenta la degradación (Kroner *et al.*, 2003).



**Figura 1.** Dinámica de temperatura presentada por los tratamientos montados en el municipio de Fúquene bajo condiciones de invernadero

El mayor incremento de temperatura lo presentó el tratamiento cinco (T5) con un promedio de 59°, seguido por T2, T3 y T4 con 55° y por último T1 con 38°. Los tratamientos que presentaron temperaturas iguales o mayores a 55°, la mantuvieron durante tres días cumpliendo con lo exigido por la normativa internacional consultada. Países como Chile, Australia y Canadá recomiendan que si se aplica el método de compostaje por apilamiento con volteos manuales,

la temperatura debe ser mayor o igual a 55 ° por 72 horas como mínimo, para lograr la reducción de patógenos (Hogg *et al.*, 2002; Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2005; Ge *et al.*, 2006).

Al final del proceso de degradación, T2 obtuvo el pH más alto (8.3), seguido en orden decreciente por T5 (7.9), T3 y T4 con 7.8 y por último T1 (7.0). En Colombia se exigen valores en un rango de 4 a 9; mientras que en otros países contemplan como normal entre 5 y 8 (Washington State Department of Ecology, 1994; Hogg *et al.*, 2002; ICONTEC, 2004).

En la etapa de enfriamiento y maduración las pilas presentaron humedades entre 40 y 70 %, lo que hizo necesario extender todas las pilas y proceder a volteos cada tres días hasta obtener humedades por debajo de 35 %, de acuerdo con lo exigido por la norma técnica colombiana (ICONTEC, 2004).

En los procesos de degradación hay grupos que se incrementan en determinados periodos pero su presencia es transitoria y da paso a otros grupos y así sucesivamente, lo que conlleva a la consolidación de las reacciones bioquímicas que hacen del compost tan rico en elementos que permiten la recuperación de los suelos (Ryckeboer *et al.*, 2003; University of Idaho, 2010). Estas fluctuaciones se hicieron evidentes en las poblaciones bacterianas, fúngicas y de actinomicetos evaluadas en los diferentes tratamientos, con recuentos entre  $10^6$ - $10^9$  UFC g<sup>-1</sup>,  $10^6$ - $10^7$  UFC g<sup>-1</sup> y  $10^5$ - $10^8$  UFC g<sup>-1</sup> respectivamente. En todos los tratamientos, a excepción del uno, las bacterias se incrementaron progresivamente a partir de los 20 días, los hongos entre los 53 a 60 días de montado el proceso y los actinomicetos presentaron aumentos en su número a partir del segundo mes. Esto concuerda con lo encontrado por otros investigadores donde el mayor número de bacterias y hongos se encuentran en la etapa mesófila y los actinomicetos predominan en la etapa de maduración (Majumder *et al.*, 2008; Rebolledo *et al.*, 2008).

Con relación a los análisis de calidad realizados a los compost solo T2, T4 y T5 cumplieron con todos los parámetros evaluados (tabla 3) y por tanto fueron escogidos para la evaluación con los inóculos microbianos y el ensayo *in vivo*. T1 y T3 presentaron en el test de fitotoxicidad porcentajes de germinación por debajo de los límites permitidos por la normatividad internacional consultada ( $\geq 90\%$ ) (Washington State Department of Ecology, 1994; Hogg *et al.*, 2002; Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2005; Ge *et al.*, 2006) y adicionalmente T3 presentó una relación carbono/nitrógeno y un porcentaje de nitrógeno por fuera de los límites exigidos (tabla 3).

Aunque los contenidos de metales pesados en los compost de los diferentes tratamientos se encuentran dentro de los valores permitidos por la norma técnica colombiana (tabla 3), es interesante observar que presentan concentraciones superiores a las encontradas por las mezclas de residuos al inicio del proceso, esto concuerda con lo reportado por Singh y

Kalamdhad (2013) que hallaron incrementos de las concentraciones de todos los metales pesados en el proceso de compostaje de jacinto de agua en la India; sin embargo, estos metales pesados en los compost maduros se encontraban en formas estables no asimilables por las plantas. Estos autores explican que el aumento de las concentraciones de metales pesados y su distribución durante el compostaje se deben a la mineralización de la materia orgánica durante el proceso de descomposición, disminución de pH, biosorción por la biomasa microbiana y formación de complejos con los ácido húmicos producidos durante la etapa de curado.

**Tabla 3.** Evaluación de la calidad fisicoquímica y microbiológica de los compost obtenidos en los diferentes tratamientos de compostaje

Composición	Unidad	Tratamientos (T)					NTC 5167
		1	2	3	4	5	
pH		7.0	8.3	7.8	7.8	8.1	4-9
Humedad	%	74.88	56.20	26.89	15.36	54.73	< 35 %
Test de fitotoxicidad	%	83	100	67	100	100	PND
Densidad Aparente	g mL <sup>-1</sup>	0.19	0.24	0.16	0.17	0.27	< 0,6
Reducción material	%	60	66	53	75	60	PND
C/N		13.1	14.0	37.0	16.2	14.0	< 25
Carbono orgánico	%	20.3	19.24	32.2	19.8	19.2	> 15
Nitrógeno	%	1.5	1.4	0.9	1.2	1.4	Declarar si es > 1%
<b>Metales pesados</b>							
Arsénico	mg/kg	0.108	0.299	0.088	0.327	0.255	0-41
Cadmio	mg/kg	0.45	0.57	0.4	0.5	0.9	0-39
Cromo	mg/kg	29.37	27.46	15.47	24.01	36.28	0-1200
Mercurio	mg/kg	0	0	0	0	0	0-17
Níquel	mg/kg	10.16	24.24	9.53	11.23	13.6	0-420
Plomo	mg/kg	22.76	36.86	12.28	20.87	21.97	0-300
<b>Impurezas</b>							
Plástico, metal, caucho > 2 mm	%	0	0	0	0	0	< 0,2
Vidrio > 2 mm	%	0	0	0	0	0	<0,02
Piedras > 5 mm	%	0.002	0.001	0.001	0.004	0.003	< 2
Vidrio > 16 mm	Detección	No	No	No	No	No	No
<b>Patógenos humanos</b>							
<i>Salmonella</i> sp.	UFC g <sup>-1</sup>	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausencia 25 g
Coliformes totales	UFC g <sup>-1</sup>	PND	PND	PND	PND	340	< 1000 UFC g <sup>-1</sup>
<i>E. coli</i>	UFC g <sup>-1</sup>	PND	PND	PND	PND	Negativo	PND

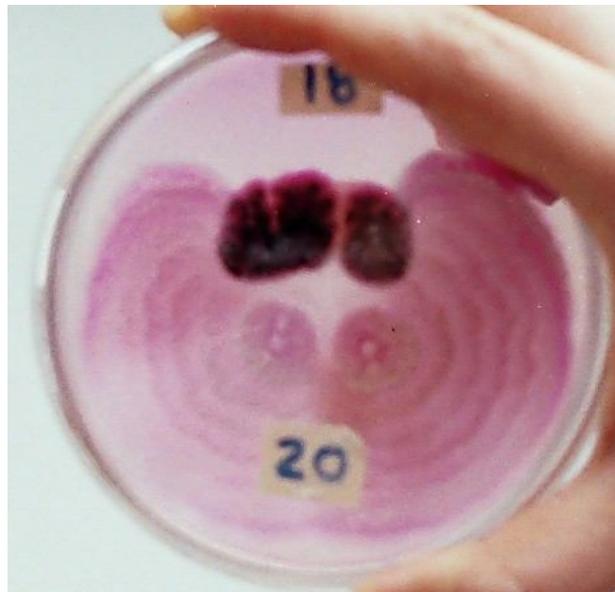
NTC 5167: Norma Técnica Colombiana 5167 (ICONTEC, 2004).

PND: Parámetro no determinado

Cultivo y aislamiento de microorganismos involucrados en el compostaje

Se aislaron 159 cepas microbianas correspondientes a 64 bacterias (40 %), 57 hongos (36 %) y 38 actinomicetos (24 %) durante todo el proceso de compostaje. Algunos autores han encontrado mayor número de bacterias y hongos que actinomicetos al igual que esta investigación; mientras que otros estudios recuperaron más bacterias y actinomicetos que hongos (Ashraf *et al.*, 2007; Rebollido *et al.*, 2008; Novinscak *et al.*, 2009). La diversidad microbiana encontrada en diferentes procesos de compostaje están determinados por la técnica de compostaje empleada, la evolución de los parámetros fisicoquímicos y los residuos utilizados, esto es muy importante en la medida que la población microbiana presente en el compost determina la calidad y campo de aplicación industrial (Ashraf *et al.*, 2007; Rebollido *et al.*, 2008).

Pruebas de antagonismo. Al enfrentar cada grupo microbiano se observó que 16, 24 y 21 cepas de bacterias, hongos y actinomicetos respectivamente no presentaron antagonismo entre sí. Estos microorganismos fueron escogidos para la producción de los tres inóculos microbianos. Por tanto los biopreparados bacteriano, fúngico y actinomicetal quedaron compuestos por 16, 24 y 21 cepas de bacterias, hongos y actinomicetos, respectivamente. En la figura 2 se observa una prueba de antagonismo positivo por inhibición de crecimiento al enfrentar dos cepas fúngicas.



**Figura 2.** Antagonismo por inhibición de crecimiento al enfrentar las cepas fúngicas 18 y 20

### Identificación de los microorganismos escogidos por antagonismo

Las 16 bacterias que no presentaron antagonismo entre sí fueron cercanas a *Pseudomonas* sp., *P. alcaligenes*, *Sphingomonas* sp., *S. paucimobilis*, *Alcaligenes* sp., *Stenotrophomonas maltophilia*, *Bacillus megaterium*, *B. circulans*, *B. mycoides*, *Arthrobacter* sp., *Pimelobacter* sp., *Enterobacter sakazakii*, *Pigmentiphaga kullae*, *Agromonas* sp., *Providencia* sp. y *Corynebacterium* sp. Los hongos escogidos pertenecen a los géneros *Aspergillus* sp. (*A. fumigatus*, *A. clavatus*, *A. flavus*, *A. terreus*, *A. oryzae*, *A. versicolor*, *A. glaucus*, *A. wentii*, *A. tamaris* y *A. parasiticus*), *Rhizopus* sp. (*R. stolonifer*, *R. oryzae*, *R. microsporus*, *R. nigricans*), *Scopulariopsis* sp. (*S. candida*, *S. fusca*), *Rhizomucor* sp., *Mucor racemosus*, *Absidia corymbifera*, *Syncephalastrum* sp., *Scedosporium* sp., *Sepedonium* sp., *Memnoniella* sp. y *Penicillium* sp. Los actinomicetos fueron cercanos a *Actinomadura* sp. (cepas ACM1 y ACM2), *Streptomyces* sp. (cepas ACS1, ACS2, ACS3, ACS4, ACS5 y ACS6), *S. avermilitis*, *S. griseus*, *Nocardiosis* sp. (cepas ACN1 y ACN2), *Nocardiodes* sp., *Kineosporia* sp., *Pseudonocardia thermophila*, *Pseudonocardia* sp., *Nonomuraea* sp., *Actinobispora* sp., *Actinokineospora* sp., *Actinosynnema* sp. y *Dactylosporangium vinareum*. Al igual que en esta investigación, en diferentes procesos de compostaje se han aislado en la etapa termófila géneros bacterianos pertenecientes a los filos Firmiculites (Principalmente *Bacillus* sp.) y Actinobacteria; mientras que en la fase de enfriamiento y maduración bacterias pertenecientes a los filos Proteobacteria y Actinobacteria (Ashraf *et al.*, 2007; Vaz-Moreira *et al.*, 2008; Novinscak *et al.*, 2009).

### Producción de inóculos microbianos mediante fermentación sumergida

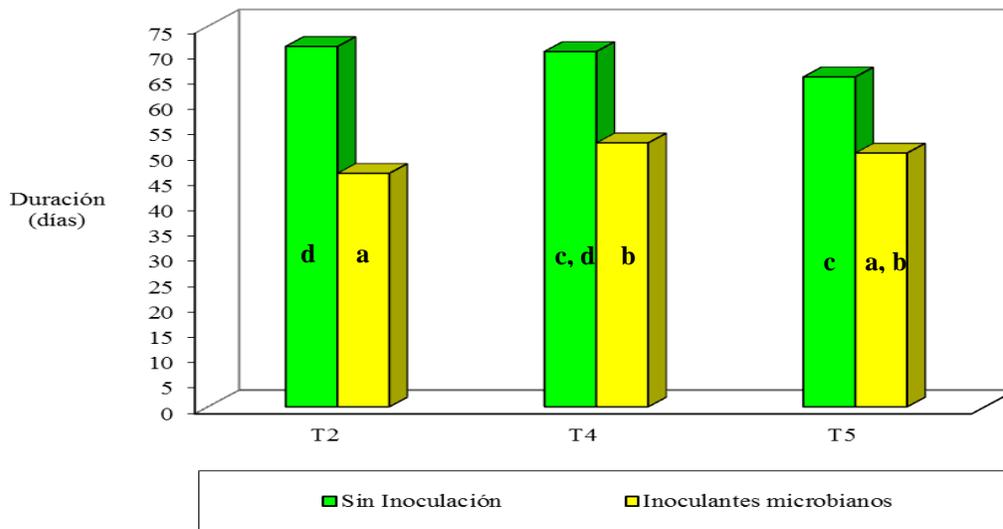
A las 48 horas se obtuvo un recuento bacteriano de  $5 \times 10^9$  UFC mL<sup>-1</sup> y a los cinco días de  $4 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> y  $2,9 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, para hongos y actinomicetos respectivamente. Estas concentraciones están dentro de las adecuadas para ser utilizadas en el compostaje y es así que un inóculo microbiano compuesto por microorganismos aislados del compostaje de residuos municipales y preparado a una concentración final de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> aceleró el proceso de degradación de estos residuos en comparación con un control sin inocular (Cariello *et al.*, 2007).

### Evaluación de los inóculos microbianos en procesos de compostaje

Los tratamientos inoculados escogidos presentaron disminuciones significativas en el tiempo de degradación alcanzando en menor tiempo la maduración, con porcentajes de reducción entre un 23 y 35 % comparado con los tratamientos sin inocular. Los tratamientos inoculados con menor duración ( $P=0.00018$ ) fueron T2i y T5i (figura 3). Varios estudios han encontrado aceleración en el proceso de compostaje de residuos sólidos municipales utilizando inóculos microbianos, reduciendo en algunos casos a la mitad el tiempo total del proceso comparado con pilas sin inocular (Ichida *et al.*, 2001; Cariello *et al.*, 2007).

Comparando las concentraciones promedio de nitrógeno en los compost sin inoculación microbiana (T2=1.4%, T4=1.2% y T5=1.4%) y a los que se les agregó microorganismos (T2i=1.0%, T4i=1.0% y T5i=1.1%) se observa disminución de este nutriente en las inoculadas, posiblemente

debido al incremento de humedad que presentaron las pilas inoculadas ya que se ha reportado aumento en la pérdida de amonio cuando los porcentajes iniciales de humedad son altos (Trautmann y Krasny, 1997; Petric *et al.*, 2009). Sin embargo, no se hallaron diferencias estadísticamente significativas ( $P=0.5787$ ) entre los tratamientos inoculados y sin microorganismos. En una investigación de compostaje utilizando residuos de elodea, cebolla y gallinaza, el tratamiento con microorganismos celulolíticos, proteolíticos y amilolíticos con una humedad alrededor de 40% durante todo el proceso mostró mayor concentración de nitrógeno que el control no inoculado (Martínez-Nieto *et al.*, 2011b).



**Figura 3.** Duración del proceso de compostaje de los tratamientos escogidos con y sin inoculación, montados bajo condiciones de invernadero en el municipio de Fúquene.  $P=0.00018$ . Los datos representan los promedios de las tres replicas. Las letras indican los niveles de la prueba de rango múltiple de Duncan, donde letras iguales indican promedios estadísticamente iguales. El primer nivel está representado por la letra a

Los valores de pH de los tratamientos inoculados fueron 6.9, 7.4 y 7.9 para T2i, T4i y T5i respectivamente, lo que indica que presentaron una disminución hacia la neutralidad comparados con los no inoculados (tabla 3). Fernández y Castellá (2010) recomiendan que el pH del compost se mantenga cercano a la neutralidad ya que valores mayores o menores pueden resultar muy alcalinos o ácidos para algunos cultivos.

Los otros parámetros de calidad exigidos por la norma colombiana se cumplieron (ICONTEC, 2004) y presentaron valores similares con los tratamientos no inoculados.

Ensayo in vivo para determinar capacidad estimuladora de crecimiento vegetal de los abonos producidos por inoculación microbiana

Los análisis de varianza no mostraron diferencias significativas entre tratamientos con relación al área ( $P=0.105$ ) y biomasa foliar ( $P=0.468$ ), formación ( $P=0.752$ ) y peso de los bulbos ( $P=0.334$ ), contenido foliar de potasio ( $P=0.281$ ) y magnesio ( $P=0.351$ ); mientras que si se presentaron diferencias significativas con relación al contenido de los otros nutrientes en las plantas (tabla 4).

**Tabla 4.** Parámetros vegetales evaluados a los diferentes abonos en el ensayo *in vivo* con plantas de rabanito

Análisis	Unidad	Tratamientos			
		Compost T2i	Compost T4i	Compost T5i	Suelo + gallinaza 33%
Área foliar ( $P=0.105$ )	cm <sup>2</sup>	66.03	66.13	51.81	63.95
Biomasa foliar ( $P=0.539$ )	g	10.11	8.11	7.99	11.74
Formación bulbo ( $P=0.752$ )	%	78	67	56	78
Peso bulbo ( $P=0.334$ )	g	6.14	2.57	3.96	6.08
Nutrientes foliares					
Nitrógeno ( $P= 0.003$ )	%	3.38 A	2.96 b	2.72 b, c	2.39 c
Fósforo ( $P=0,033$ )	%	0.43 a	0.26 c	0.4 a, b	0.31 b, c
Potasio ( $P=0.281$ )	%	1.09	1.09	1.16	0.88
Calcio ( $P=0.003$ )	%	1.47 A	1.06 b, c	0.9 c	1.28 a, b
Magnesio ( $P=0.351$ )	%	0.28	0.18	0.20	0.22
Azufre ( $P=0.009$ )	%	1.16 A	0.67 b	0.76 b	0.53 b
Manganeso ( $P=0.002$ )	mg kg <sup>-1</sup>	109 A	68 b	41 c	81 b
Zinc ( $P=0.0002$ )	mg kg <sup>-1</sup>	67 A	34 b	60 a	37.5 b
Cobre ( $P= 4 \times 10^{-6}$ )	mg kg <sup>-1</sup>	28.8 A	6 c	9.4 c	16 b
Hierro ( $P=0.0004$ )	mg kg <sup>-1</sup>	254 A	154 b, c	187 b	160 b, c
Boro ( $P=3 \times 10^{-6}$ )	mg kg <sup>-1</sup>	54.5 A	27.4 b	31.1 b	16.9 c

$P < 0.05$ . Los datos representan los promedios de las tres replicas. Las letras indican los niveles de la prueba de rango múltiple de Duncan, donde letras iguales indican promedios estadísticamente iguales. El primer nivel está representado por la letra a.

Los contenidos de nitrógeno, azufre, manganeso, cobre, hierro y boro fueron mayores en las plantas abonadas con compost proveniente del tratamiento 2 inoculado (T2i), siendo el mejor tratamiento de acuerdo con la prueba de rango múltiple de Duncan (tabla 4). Con relación al fósforo y zinc, las plantas sembradas en compost T2i y T5i fueron los mejores tratamientos (tabla 4).

Es interesante observar que aunque no se presentan diferencias significativas en el peso de los bulbos de rabanito entre los tratamientos y el control (gallinaza al 33%), si en el contenido de nutrientes en las plantas, lo que indica una mayor asimilación de estos elementos químicos por cada 100 g de biomasa vegetal. Al analizar el flujo de nitrógeno entre los sustratos y las plantas, se observa un mayor porcentaje de asimilación en el tratamiento con compost T2i (14.2 %) con menor pérdida de nitrógeno del suelo (6 %); mientras que el suelo con gallinaza al 33 % mostró la segunda asimilación de este elemento pero la mayor pérdida de este elemento (24.6 %) (Tabla 5). Estos resultados dan una aproximación del porcentaje de nitrógeno mineralizado asimilado por las plantas y adquieren importancia en la medida que un suelo más sano y fértil es aquel donde el mayor porcentaje de nitrógeno mineralizado de la materia orgánica es absorbido por las plantas (Orozco-Jaramillo y Martínez-Nieto, 2009).

**Tabla 5.** Porcentajes promedio de asimilación y pérdida del nitrógeno a partir de los contenidos de nitrógeno edáfico y foliar en el ensayo *in vivo*

Tratamiento	Biomasa foliar (g)	Nitrógeno Total (g)			Asimilación %	Permanencia en suelo %	Pérdida %
		Sustrato		Foliar			
		Inicial	Final				
Compost T2i	10.11	2.41	1.93	0.342	14.2	79.8	6.0
Compost T4i	8.11	2.56	1.96	0.240	9.4	76.6	14.0
Compost T5i	7.94	2.86	2.23	0.216	7.6	77.7	14.7
Suelo + gallinaza 33%	11.74	2.26	1.43	0.281	12.4	63.0	24.6

Al contrario de esta investigación, Ozores-Haptom y Asmad (2010) encontraron resultados negativos en el crecimiento de hortalizas cuando el medio fue compost 100 %, principalmente si este tenía un alto contenido de sales solubles o si era un compost todavía inestable. Por otro lado, Bayani (2011) observó incrementos en el desarrollo vegetal de plantas de frijol verde chino (*Vigna radiata* L. Wilczek) y nabo (*Brassica napus* L.), al agregar compost inoculado con *Azotobacter spp.* y *Trichoderma harzianum* en comparación con las plantas que crecieron en

compost no inoculado. Se debe seguir investigando para hallar las cantidades ideales de compost que se deben agregar para estimular el crecimiento del rábano y otras hortalizas de importancia comercial, con el fin de disminuir costos de fertilización.

### Conclusiones

Los microorganismos aislados y evaluados como inoculantes microbianos reducen el tiempo de degradación de las plantas acuáticas jacinto de agua y elodea brasilera. Además los compost obtenidos de la inoculación de estos microorganismos promueven la asimilación de nutrientes por las plantas siendo una alternativa eficiente para el manejo de macrófitas acuáticas invasoras de la Laguna de Fúquene mediante compostaje y en la obtención de un producto de buena calidad nutricional y biológica promisorio para la agricultura.

### Referencias bibliográficas

- Abaunza, C.A., García, G., Martínez-Nieto, P. y Pinto, C.O. (2008) *Incorporación de prácticas agroecológicas en los principales sistemas de producción de la localidad de Santa Fe, Distrito Capital*, Produmedios, Bogotá, 125pp.
- Acevedo, M., Acevedo, L., Restrepo-Sánchez, N. and Peláez, C. (2005) The inoculation of microorganisms in composting processes: need or commercial strategy?, *Livestock Research for Rural Development*, **17**(12). Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd17/12/acev17145.htm>.
- Andrade, G. y Franco, L. (2007) El complejo de humedales de Fúquene, Cucunubá y Palacio: Un ecosistema estratégico bajo tensión, en *Fúquene, Cucunuba y Palacio: Conservación de la biodiversidad y manejo sostenible de un ecosistema lagunar andino*, Franco L. y Andrade G. editores, Ediprint, Bogotá, 43 – 60.
- Alomía, Y. A., Peña, E. J., Bolaños, A. C. y Pedraza, G. X. (2011) Efecto de la actividad del hongo *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. en la calidad de compost elaborado a partir de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach y estiércol bovino, *Livestock Research for Rural Development*, **23** (134). Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd23/6/alom23134.htm>
- Ashraf, R., Shahid, F. and Tasneem, A. (2007) Association of fungi, bacteria and actinomycetes with different Composts, *Pakistan Journal of Botany*, **39**(6), 2141 - 2151.
- Barnett, H.L., Hunter, B.B. (1972) *Illustrated Genera of imperfect fungi*, Burges Publishing Company, Minneapolis, 241pp.
- Barrena, R., Pagans, E., Faltys, G. and Sánchez, A. (2006) Effect of inoculation dosing on the composting of source-selected organic fraction of municipal solid wastes, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **81**(3), 420 - 425.
- Bayani, M.E. (2011) Use compost with microbial inoculation in container media for mugbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) and pechay (*Brassica napa* L.), *Journal of International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences*, **17**(1), 160 - 168.
- Brenner, D.J., Krieg, N.R., Garrity, G.M. and Staley, J.T. (2005) *The Proteobacteria : Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Vol. II, Springer, New York, 1388 pp.
- California Integrated Waste Management Board. (2001) Compost Microbiology and the Soil Food Web. Disponible en: <http://www.calrecycle.ca.gov/publications/Organics/44200013.doc>.
- Cariello, M.E., Castañeda, L., Riobo, I. y González, J. (2007) Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **7**(3), 26 - 37.

- Fernández, J. y Castellá, M. (2010) El compost, temperatura y humedad. Disponible en: <http://www.compostadores.com/v3/castellano/articulos/detalles.asp?ArticulosID=31>.
- Gbolagade, J.S. (2006) Bacteria associated with compost used for cultivation of Nigerian edible mushrooms *Pleurotus tuber-regium* (Fr.) Singer, and *Lentinus squarrosulus* (Berk.), *African Journal of Biotechnology*, **5**(4): 338 - 342.
- Ge, B., McCartney, D. and Zeb, J. (2006) Compost environmental protection standards in Canada, *Journal of Environmental Engineering and Science*, **5**, 221 – 234.
- Hogg, D., Barth, J., Favoino, E., Centemero, M., Caimi, V., Amlinger, F., Devliegher, W., Brinton, W. and Antler, S. (2002) *Review of Compost Standards in Australia*, The Waste and Resources Action Programmer (WRAP), Banbury, 11pp.
- Ichida, J. M., Krizova, L., Lefevre, C.A., Keener, H.M., Elwel, D.L. and Burt, E.H. (2001) Bacterial inoculum enhances keratin degradation and biofilm formation in poultry compost, *Journal of Microbiological Methods*, **74**, 199 - 208.
- ICONTEC. (2004) *Norma Técnica Colombiana 5167: Productos para la industria agrícola: Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo*, ICONTEC, Bogotá, 40pp.
- Instituto Nacional de Normalización de Chile. (2005) *Norma Chilena Oficial NCh 2880: Compost, clasificación y requisitos*, INN, Santiago, 19pp.
- Kavitha, R. and Subramanian, P. (2007) Bioactive Compost-A value added compost with Microbial Inoculants and Organic Additives, *Journal of Applied Sciences*, **7**(17), 2514 - 2518.
- Kroner, I., Braukmeier, J., Herreklage, J., Leikam, K., Ritzkowski, M., Schlegelmich, M., Stegmann, R. (2003) Investigation and optimization of composting processes-test systems and practical examples, *Waste Management*, **23**, 17 - 26.
- Luo, W., Chen, T.B., Zheng, G.D., Gao, D., Zhang, Y.A. and Gao, W. (2008) Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, **52**, 635 - 642.
- Majumder, M., Shukla, A.K. and Arunachalam, A. (2008) Nutrient release and fungal succession during decomposition of weed residues in a shifting cultivation system, *Communications in Biometry and Crop Science*, **3**(1): 45 – 59.
- Martínez, M.M., Martínez, P., Franco, M. and Cárdenas, M. (2003) *Manual de Laboratorio: Microbiología Ambiental*, Centro Editorial Javeriano, Bogotá, 184pp.
- Martínez- Nieto, P., Bernal-Castillo, J., Calixto- Díaz, M., Del Basto- Riaño, M.A. and Chaparro- Rico, B. (2011a) Biofertilizers and Composting Accelerators of Polluting Macrophytes of a Colombian Lake, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **11** (2), 47-61.
- Martínez- Nieto, P., García-González, D., Silva-Bonilla, P.S., Vargas-Chaparro, G. y Valderrama-Escallón, F. (2011b) Manejo de residuos generados directa o indirectamente por el cultivo de cebolla en Aquitania (Boyacá-Colombia), *Revista AIDIS*, **4**(2), 23 - 34.
- Maya, D.L., Castillo, D., Ramos, P.A. y Roldán, A.M. (2004) Análisis de la acción colectiva para el Manejo de cuencas: Estudio piloto-cuenca de la Laguna de Fúquene. Disponible en: [http://www.condesan.org/cuencasandinas/Documentos/AnalisisAccionColectiva\\_Fuquene.pdf](http://www.condesan.org/cuencasandinas/Documentos/AnalisisAccionColectiva_Fuquene.pdf)
- Ming, G., Li, H., Lian, D., Zhong, X., Qing, R., Yu, M., Yan, H., Chao, J., You, R. and Lan, X. (2009) Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes, *Process Biochemistry*, **44**(4), 396 - 400.
- Miyadoh, S., Tsuchizaki, N., Ishikawa, J. and Hotta, K. (2002) *The atlas of actinomycetes*, The Society for Actinomycetes Japan, Tokyo, 244pp.
- Novinscak, A., De Coste, N.J., Surette, C. and Fillion, M. (2009) Characterization of bacterial and fungal communities in composted biosolids over a 2 year period using denaturing gradient gel electrophoresis, *Canadian Journal of Microbiology*, **55**, 375 – 387.

- Orozco-Jaramillo, C. y Martínez-Nieto, P. (2009) Evaluación de la inoculación con microorganismos fijadores de nitrógeno asimbióticos aislados de la rizósfera de *Pinus patula* en Colombia, *Bosque*, **30**, 70 - 77.
- Ozores-Hampton, M. y Asmad B. (2010) Guía para la utilización exitosa del compost en la producción de hortalizas. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/HS/HS40600.pdf>.
- Petric, I., Šestan, A. and Šestan, I. (2009) Influence of initial moisture content on the composting of poultry manure with wheat straw. *Biosystems Engineering*, **104**(1), 125 - 134.
- Rebollido, R., Martínez, J., Aguilera, Y., Melchor, K., Koerner, I. and Stegmann R. (2008) Microbial populations during composting process of organic fraction of municipal solid waste, *Applied Ecology and Environmental Research*, **6**(3), 61 - 67.
- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K. and Swings, J. (2003) Microbiological aspects of biowaste during composting in monitored compost bin, *Journal of Applied Microbiology*, **94**, 127 – 137.
- Samson, R.A., Hoekstra, E.S., Frisvad, J.C. and Filtenborg, O. (2000) *Introduction to food and airborne fungi*, CBS, Utrecht, 389pp.
- Sarkar, S., Banerjee, R., Chanda, S., Das, P., Ganguly, S. and Pal, S. (2010) Effectiveness of inoculation with isolated *Geobacillus* strains in the thermophilic stage of vegetable waste composting, *Bioresource Technology*, **101**(8), 2892 - 2895.
- Singh, J. and Kalamdhad, A. S. (2013) Bioavailability and leachability of heavy metals during water hyacinth composting, *Chemical Speciation and Bioavailability*, **25**(1), 1 - 14.
- University of Idaho. (2010) Compost: Production, Quality and Use in commercial agriculture. Disponible en: <http://www.cals.uidaho.edu/edcomm/pdf/CIS/CIS1175.pdf>.
- Trautmann, N. and Krasny, M.E. (1997) *Composting in the classroom: Scientific Inquiry for High School Students*, Nature Science Foundation, Cornell Waste Management Institute and Cornell Center for the Environment, Ithaca, 116pp.
- Vargas-García, M.C., Suárez-Estrella, F., López, M.J. and Moreno, J. (2007) Effect of inoculation in composting processes: Modifications in lignocellulosic fraction, *Waste Management*, **27**(9), 1099 - 1107.
- Vaz-Moreira, I., Silva, M.E., Manaia, C.M. and Nunes, O.C. (2008) Diversity of bacterial isolates from commercial and homemade composts, *Microbial Ecology*, **55**(4), 714 - 722.
- Washington State Department of Ecology. (1994) Interim guidelines for compost quality. Disponible en: <http://mie.esab.upc.es/ms/informacio/legislacio/EPA/Guidelines%20Compost%20quality%20TYLER.pdf>.
- Washington State University. (2009) Compost Fundamentals. Disponible en: [http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals/needs\\_carbon\\_nitrogen.htm](http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals/needs_carbon_nitrogen.htm).