

El Compostaje, un aliado contra la Crisis Climática



*Con el apoyo del Ministerio de la Transición Ecológica
a través de la Fundación Biodiversidad*

INDICE

1. Sistematización de los resultados cuantitativos del análisis de los suelos y elaboración de conclusiones sobre el impacto de la aplicación de compost para la resiliencia frente al cambio climático en las 24 experiencias objetivo del proyecto, desglosado por territorios geográficos y las regiones climáticas.....
.....**pág. 2**

2. Efecto del compost sobre las propiedades generales de los suelo.....**pág. 16**

3. Valoración preliminar del potencial de mejora de los suelos en España de idénticas características que los del proyecto según los escenarios de cambio climático del quinto informe del IPCC, desglosado por territorios geográficos y las regiones climáticas.....
.....**pág. 18**

4. Estimación de la capacidad de aporte de compost procedente de residuos orgánicos municipales a los suelos españoles y conclusiones sobre su potencial contribución a la adaptación al cambio climático.....**pág. 23**

1. Sistematización de los resultados cuantitativos del análisis de los suelos y elaboración de conclusiones sobre el impacto de la aplicación de compost para la resiliencia frente al cambio climático en las 24 experiencias objetivo del proyecto, desglosado por territorios geográficos y las regiones climáticas.

Para la elaboración de esta parte del estudio de investigación hemos contado con la colaboración del departamento de edafología y química agrícola de la Universidad de Santiago de Compostela. A continuación reflejamos las diferentes fases del proceso.

Descripción de las muestras

Se analizaron 22 suelos antes y después de recibir 18 compost diferentes, para evaluar los efectos de la calidad del compost sobre las propiedades de los suelos. Los compost fueron añadidos al suelo a finales de septiembre o principios de octubre de 2018 y las muestras de suelo fueron recogidas en marzo de 2019, aproximadamente seis meses después. Los suelos y compost proceden de distintos lugares de España: en las tablas 1 y 2 se resume la información facilitada sobre las muestras de suelos y compost.

Tabla 1. Lista de muestras de compost analizados en el proyecto.

	Descripción compost	Clase	Material
M 1	Huerto comunitario. Compost procedente de restos de cocina de los usuarios del huerto y limpieza terreno huerto.	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
M 2	Dehesa Boyal Cerceda. Compost procedente de avicomposteros y compostadores comunitarios que recogen los biorresiduos procedentes del proyecto piloto Puerta a Puerta y de uno de los comedores escolares.	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
M 3	Madrid compost comunitario Alpedrete. Compost procedente de los biorresiduos y restos de jardinería que se tratan en el compostador comunitario.	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
M 4	Madrid compost comunitario colegio Clara Campoamor. Compost obtenido de los biorresiduos de la merienda y comida de niños y niñas.	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
M 5	Compost comunitario CEIP Rosalia de Castro (Móstoles)	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
M 6	Muestra Vermicompost EEII Osa Mayor, el pequeño Sauce	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
G1	Composteiro Comunitario Concello de Vilaboa	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales

G2	Miniplanta de Compostaxe Municipal Concello de Vilaboa	Planta	
G3	Composteiro Comunitario do Concello de Barro	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
G4	Composteiro Comunitario do Campus de Pontevedra	Doméstic o	Restos de cocina y vegetales
R1	Compost Montejurra		
R2	Pradejón 1		
R3	Pradejón 2		
C1	Cataluña		
B1	Mallorca. Compost de metanización con lodos de EDAR	Planta	RSU + lodos EDAR
Z1	Zaragoza. Humus industrial con restos vegetales.	Planta	
Z2	Zaragoza. Gallinaza con restos vegetales.	Planta	Gallinaza
Z3	Zaragoza. Gallinaza con residuos orgánicos.	Planta	Gallinaza
Z4	Zaragoza. Humus de lombriz.	Planta	

Tabla 2. Relación de suelos y compost añadido a cada uno.

Suelo	Localización	Uso	Compost
M1	Soto del Real	Huerto comunitario	M1
M2	Cerceda	Dehesa	M2
M3	Alpedrete	Huerto comunitario	M3
M4	Alpedrete	Huerto comunitario	M4
M5	Móstoles	Huerto comunitario	M5
G1	Pontevedra	Cultivo de hortalizas	Estiércol
G2	Barro	Viñedo	G3
G3	Pontevedra	Plantación de manzanos	G4
G4	Barro	Cultivo hortícola	G3
G5	Vilaboa	Huerta escolar	G1
G6	Vilaboa	Viñedo	G2
L1	Alto Derra - Arnedo		
L2	Prailas - Arnedo		
L3	Ausejo		
L4	Arnedo		
AR1	Nuez de Ebro	Agricultor ecológico	Z1
AR2	Monzalbarba	Huerta familiar	Z2
AR3	Zaragoza	Agricultor ecológico	Z3
AR4	Movera	Agricultor ecológico	Z4
Ba1	Reus		C1
Ma1	Biniaraix, Sóller	Frutales	B1
Ma2	Bunyola	Olivos y frutales	B1



Figura 1. Localización de los suelos estudiados

TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Las muestras se recibieron húmedas tal y como fueron muestreadas. Los análisis se realizaron sobre las muestras secas al aire (suelos) o en estufa a 60°C en el laboratorio (compost). Todos los resultados se refieren a materia seca.

Análisis de compost

Los compost se analizaron siguiendo las Normas UNE-EN para mejoradores del suelo y sustratos de cultivo.

	Norma UNE-EN
pH	13037
Conductividad eléctrica	13038
Materia orgánica y carbono total	13039
Nitrógeno total	13654-1, 13654-2
Metales pesados totales	13650

- **pH H₂O y conductividad eléctrica (CE):** Se midieron en una suspensión compost : agua (1:5 v/v).

- **Materia orgánica total (MO) y carbono total:** Se determinaron por calcinación a 450°C. Los resultados se expresan en porcentaje de MO y C.

- **Nitrógeno total (N):** Se determinó mediante digestión Kjeldhal y valoración por destilación a vapor. Los resultados se expresan en porcentaje de N.

- **Metales pesados totales (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd):** Se determinaron tras digestión con agua regia y posterior determinación por ICP. El resultado obtenido se expresa como mg de metal por kg de compost (mg/kg)

Análisis de suelos

- **pH H₂O:** Medido en una suspensión suelo : agua (10g : 25ml).

- **Carbono total (CT) y Nitrógeno total (N):** Se determinó por combustión de muestra molida en un analizador elemental. Los resultados se expresan en porcentaje de CT y N.

- **Carbono orgánico (CO):** Se obtuvo por medio de una oxidación de la materia orgánica del suelo con dicromato potásico y ácido sulfúrico, y posterior valoración con Sal de Mohr. Los resultados se expresan en porcentaje C. El contenido en materia orgánica se estima a partir del carbono, multiplicando por el factor empírico 1,724.

- **Distribución de tamaño de agregados:** La distribución del tamaño de los agregados se determinó mediante tamizado en seco (Burke et al., 1986).

Para ello se tomaron 300 g de muestra y se tamizaron durante 10 minutos en una torre formada por los siguientes tamices: 4 mm, 2mm, 1mm, 0,500 mm y 0,250 mm, en agitador mecánico. Cada fracción se recogió por separado y se pesó. Los resultados se expresan en porcentaje de cada fracción sobre el total.

- **Estabilidad de agregados:** La estabilidad de agregados se refiere a la capacidad de los agregados del suelo a la ruptura por el agua y por la manipulación mecánica. El método utilizado para su estimación se basa en el tamizado en húmedo de la fracción de 1-2 mm descrito por Kemper y Rosenau (1986). El resultado obtenido se expresa como porcentaje de estabilidad en agua.

- **Metales disponibles (Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Cr):** El contenido en metales pesados

biodisponibles se determinó mediante extracción con DTPA, siguiendo el método de Lindsay y Norvell (1978). Para ello, se tomaron 20 g de suelo seco y tamizado y se agitaron durante dos horas con 40 mL de

disolución 5 mM de ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA), 0,01 M de CaCl₂ y 0,1 M de trietanolamina, ajustada a pH 7,3. Los extractos se filtraron por Whatman nº 40 y se analizaron por espectroscopía de absorción atómica de llama.

RESULTADOS

1. Propiedades de los compost

Los resultados de los análisis, junto con los datos disponibles sobre el origen y materias primas de los compost y sobre el proceso de compostaje se incluyen la Tabla 3, al final de este informe. Observación: no se dispone de suficiente información sobre el origen y proceso de compostaje de algunos de los compost, que facilitaría la interpretación de los resultados.

Todos los compost presentaron pH alcalino, con valores en general dentro del rango habitual en este tipo de compost, entre 7-8. Sin embargo, hay un grupo de muestras con valores cercanos e incluso superiores a 9, que es excesivo, es el caso de los compost domésticos procedentes de la Comunidad de Madrid. Es posible que estos compost estén recibiendo cenizas de combustión. En cualquier caso, se recomienda mezclar con más cantidad de material vegetal.

En cuanto a la conductividad eléctrica, los compost presentan en general valores elevados. Más de la mitad de los compost superan el valor de 1,5 dS/m que se considera adecuado para su uso en sustratos de jardinería, y en concreto aquellos compost que presentan valores por encima de 4 dS/m deben usarse con precaución. Estos valores tan altos pueden deberse a un exceso de sales en los materiales de partida, y podrían reducirse regando el compost con más frecuencia o añadiendo más cantidad de materiales vegetales, como restos de poda. En general, es un problema que afecta menos a los compost domésticos que a los obtenidos en instalaciones industriales.

Los compost presentan un rango de contenidos en materia orgánica muy amplio (19-73%). Algunos son muy pobres en materia orgánica (M2-M5, G3, Z2-Z3): de acuerdo a la Ley de Fertilizantes, los compost con menos de un 35% de materia orgánica no se podrían comercializar con la denominación de compost, por lo que el proceso de obtención de los mismos debe ser revisado. En concreto, es posible que se esté añadiendo suelo u otros materiales inorgánicos a

los materiales durante el compostaje; en este caso, se recomienda añadir menores cantidades o compensar añadiendo más residuos orgánicos. Los valores de la relación C/N, indicador orientativo de la madurez del compost, son inferiores a 20 en todos los compost excepto en uno, lo que indica que el proceso de compostaje ha tenido una duración suficiente.

Metales pesados: en general, los compost presentan niveles bajos, especialmente los compost domésticos de la Comunidad de Madrid. Siete de los compost tendrían clasificación A, diez clasificación B, y dos clasificación C. En cuanto a los metales pesados presentes en los compost, Ni y Cr no representan un problema en ningún caso; los contenidos de Cd rebasan el nivel de la clase A en dos casos (R1 y B1) y los de Pb superan los valores de la clasificación A en cuatro casos (G2, R1, B1 y Z1). Los metales más problemáticos son Cu y Zn, como es habitual en compost de residuos urbanos.

Siete compost presentan concentraciones de Cu superiores al nivel A y ocho compost presentan niveles de Zn superiores a este nivel, de los cuales 2 superan también el valor permitido para compost de clase B, siendo clasificados como C. Globalmente, los compost domésticos presentan mayor calidad que los provenientes de planta, con menor salinidad y contenidos más bajos en metales pesados, aunque en algunos casos el pH es demasiado alto. En cualquier caso, ningún compost supera los límites de metales pesados establecidos en la Ley de Fertilizantes, por lo que podrían usarse como enmiendas agrícolas. La única limitación se daría para los compost B1 y Z1, con clasificación C, que no podrían ser utilizados en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por hectárea y año.

Tabla 3. Propiedades generales de los compost.

Descripción compost	Clase	Material	pH	CE (dS/m)	MO (%)	N (%)	C/N	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Clase
M1 Huerto comunitario. Compost procedente de restos de cocina de los usuarios del huerto y limpieza terreno huerto.	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	9,3	1,5	49	1,3	21	13	59	6	0,2	4	7	A
M2 Dehesa Boyal Cercada. Compost procedente de avicomposteros y compostadores comunitarios que recogen los biorresiduos procedentes del proyecto piloto Puerta a Puerta y de uno de los comedores escolares.	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	8,5	1,4	30	1,2	14	11	98	9	0,3	3	6	A
M3 Madrid compost comunitario Alpedrete. Compost procedente de los biorresiduos y restos de jardinería que se tratan en el compostador comunitario.	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	9,8	1,6	29	0,9	19	79	96	20	0,4	9	6	B
M4 Madrid compost comunitario colegio Clara Campoamor. Compost obtenido de los biorresiduos de la merienda y comida de niños y niñas.	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	9,0	1,5	25	0,9	15	10	70	17	0,2	3	7	A
M5 Compost comunitario CEIP Rosalia de Castro (Móstoles)	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	9,3	1,6	33	1,4	14	14	90	23	0,2	5	10	A
M6 Muestra Vermicompost EEII Osa Mayor, el pequeño Sauce	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	9,6	0,6	73	2,8	15	30	76	6	0,1	8	6	A
G1 Composteiro Comunitario Concello de Vilaboa	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	8,3	1,5	63	2,6	14	24	259	10	0,2	8	14	B
G2 Miniplanta de Compostaxe Municipal Concello de Vilaboa	Planta		7,3	0,5	53	0,7	15	40	84	102	0,2	13	21	B
G3 Composteiro Comunitario do Concello de Barro	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	7,8	0,8	19	2,1	15	12	398	4	0,1	6	5	B
G4 Composteiro Comunitario do Campus de Pontevedra	Doméstico	Restos de cocina y vegetales	7,1	2,8	56	2,7	12	17	203	8	0,3	5	6	B
R1 Compost Montejurra			8,7	4,5	72	2,3	18	118	294	93	0,8	21	26	B
R2 Pradejón 1			7,5	5,5	43	1,8	14	26	182	3	0,2	7	11	A
R3 Pradejón 2			8,1	3,8	45	2,1	13	25	200	2	0,2	5	6	A
C1 Cataluña.			8,9	3,4	60	2,1	16	82	209	29	0,7	8	11	B
B1 Mallorca. Compost de metanización con lodos de EDAR	Planta	RSU + lodos EDAR	8,6	3,4	54	2,5	13	225	554	65	0,7	19	33	C
Z1 Zaragoza. Humus industrial con restos vegetales.	Planta		8,0	3,0	50	2,6	11	179	540	48	0,6	24	62	C
Z2 Zaragoza. Gallinaza con restos vegetales.	Planta	Gallinaza	7,2	4,1	24	1,2	11	79	112	10	0,2	12	17	B
Z3 Zaragoza. Gallinaza con residuos orgánicos.	Planta	Gallinaza	8,3	2,9	22	1,1	11	150	124	29	0,2	12	65	B
Z4 Zaragoza. Humus de lombriz.	Planta		7,8	2,1	38	1,9	11	26	287	9	0,1	5	8	B

2. Efecto del compost sobre las propiedades generales de los suelos

En la tabla 4 se presentan las propiedades de los 22 suelos antes y después de recibir compost. El primer aspecto destacable es la diversidad de propiedades iniciales de los suelos, lo que es lógico como consecuencia de las diferentes procedencias y usos de los mismos. De los 22 suelos, la mayoría tienen uso agrícola (algunos de ellos con leñosas), uno es una dehesa y cinco son suelos urbanos dedicados a huerta.

Tabla 4. pH, carbono orgánico, materia orgánica, carbono total, nitrógeno total y relación carbono/nitrógeno de los suelos analizados antes y después de recibir compost.

Suelo	Localización	pH		C total (%)		C orgánico (%)		Materia orgánica (%)		N total (%)		C/N	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
M1	Soto del Real	6,2	7,2	2,5	2,5	2,2	2,8	3,8	4,9	0,21	0,23	10	12
M2	Cerceda	5,6	6,6	2,7	2,7	2,2	3,8	3,9	6,5	0,26	0,26	9	14
M3	Alpedrete	7,4	7,4	2,9	2,1	2,2	2,4	3,8	4,1	0,23	0,17	10	14
M4	Alpedrete	7,8	7,5	1,2	3,4	1,0	5,0	1,7	8,6	0,09	0,26	11	19
M5	Móstoles	7,9	8,0	1,3	3,4	1,4	3,2	2,4	5,5	0,08	0,19	17	16
G1	Pontevedra	6,3	6,8	3,3	2,5	2,9	3,4	5,0	5,8	0,26	0,21	11	16
G2	Barro	5,0	6,6	3,0	3,0	2,2	3,7	3,8	6,4	0,20	0,21	11	18
G3	Pontevedra	6,6	6,5	3,3	3,4	3,2	3,9	5,5	6,8	0,26	0,28	13	14
G4	Barro	6,0	6,6	7,6	7,2	6,1	7,7	10,6	13,2	0,49	0,48	12	16
G5	Vilaboa	5,6	6,7	4,4	4,1	3,6	5,5	6,2	9,5	0,30	0,27	12	20
G6	Vilaboa	6,1	6,6	3,4	3,4	2,8	3,9	4,8	6,7	0,24	0,28	11	14
L1	Alto Derra - Arnedo	7,9	7,6	4,8	6,7	2,3	6,1	4,0	10,6	0,21	0,42	11	15
L2	Prailas - Arnedo	8,6	8,0	4,3	5,2	1,5	2,9	2,6	4,9	0,12	0,10	12	28
L3	Ausejo	8,7	7,5	2,6	2,7	0,4	1,6	0,7	2,7	0,09	0,10	4	16
L4	Arnedo	8,6	7,9	2,3	9,0	1,5	10,0	2,6	17,2	0,17	0,81	9	12
AR1	Nuez de Ebro	8,0	7,1	5,9	7,0	1,8	3,6	3,1	6,2	0,21	0,33	9	11
AR2	Monzalbarba	7,9	7,7	7,0	6,3	2,3	4,6	4,0	8,0	0,25	0,29	9	16
AR3	Zaragoza	8,2	8,2	5,7	5,6	1,7	1,6	2,9	2,8	0,21	0,12	8	14
AR4	Movera	7,6	8,2	6,3	8,0	1,9	4,8	3,3	8,3	0,25	0,28	8	17
Ba1	Reus	7,45	7,8	4,1	11,3	2,6	10,7	4,5	18,5	0,30	0,66	9	16
Ma1	Biniaraix, Sóller	8,2	7,3	8,6	14,1	2,4	8,8	4,1	15,1	0,25	0,75	10	12
Ma2	Bunyola	8,4	7,2	8,5	15,9	3,3	10,1	5,6	17,4	0,23	0,90	14	11

- pH

En función de su pH en agua, las muestras analizadas predominantemente presentaban inicialmente un pH alcalino, a excepción de 7 muestras que presentan pH ácido y una muestra con un pH neutro (todas las muestras

de Galicia y dos de las de Madrid). Los mayores valores de pH corresponden a suelos que presentan cantidades importantes de carbonato cálcico.

Fuertemente ácido (pH < 5,5): muestra **G2**.

Moderadamente ácido (pH 5,6 - 6,0): muestras **G5, M2, G4**.

Ligeramente ácido (pH 6,1 - 6,5): muestra **G6, G1, M1**.

Neutro (pH 6,6 - 7,3): muestras **G3**.

Ligeramente alcalino (pH 7,4 - 7,8): muestras **M3, M4, Ba1, AR4**

Moderadamente alcalino (pH 7,9 - 8,4): muestras **M5, L1, L2, L3,**

L4, AR1, AR2,

AR3, Ma1, Ma2

La enmienda con los compost produjo una importante variación del pH de los suelos, tendiendo hacia valores más próximos a la neutralidad: se incrementó el pH de los suelos más ácidos y se redujo el de los suelos alcalinos (Tabla 4, Figura 2), de modo que la clasificación de pH de los suelos se modificó sustancialmente agrupándose en torno a la neutralidad.

Ligeramente ácido (pH 6,1 - 6,5): muestra **G3**.

Neutro (pH 6,6 - 7,3): muestras **M1, M2, G1, G2, G4, G5, G6, AR1.**

Ligeramente alcalino (pH 7,3 - 7,8): muestras **M3, M4, L1, L3,**

AR2, Ba1, Ma1, Ma2.

Moderadamente alcalino (pH 7,9 - 8,4): muestras **M5, L2, L4, AR3,**

AR4.

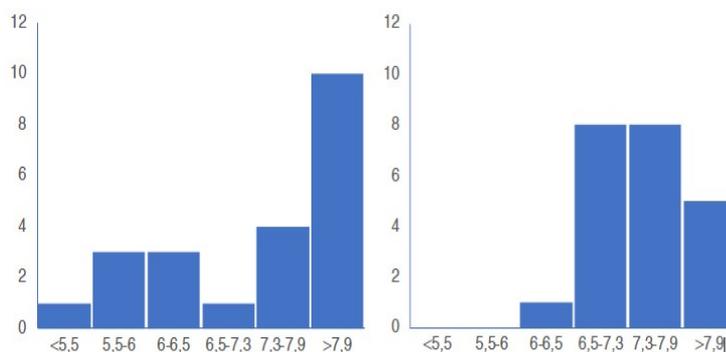


Figura 2. Distribución de valores de pH de los suelos antes (izquierda) y después (derecha) de recibir los compost.

Puesto que los valores extremos de pH (muy ácidos o muy alcalinos) son en general desfavorables para el cultivo, puede concluirse que el efecto de los compost en este sentido fue positivo en todos los casos.

- Materia orgánica

En cuanto al contenido de materia orgánica, los suelos presentaron inicialmente un valor medio del 4% (2,6% de C orgánico), que se puede considerar correcto de cara al mantenimiento de la calidad del suelo, aunque varios suelos presentaron valores muy bajos, por debajo del 2% de C orgánico (M4 y M5). Los contenidos más elevados corresponden a los suelos gallegos donde se alcanzan valores próximos o superiores al 6 %, que se considera como un valor umbral para el mantenimiento de las funciones productivas y estructurales del suelo en suelos de regiones templado-húmedas. Estos elevados contenidos de materia orgánica se relacionan con aspectos climatológicos y prácticas de adición de abonos orgánicos en esta región. Las muestras Ma1 (4,1%) y Ma2 (5,6%), procedentes de

Mallorca, presentan también valores elevados para tratarse de suelos de un entorno mediterráneo. En el caso del nitrógeno los suelos presentaban inicialmente contenidos bajos, con valores medios del 0,22% y oscilando entre 0,08 y 0,49%. La enmienda con compost aumentó los contenidos de materia orgánica, C y N de los suelos, en algunos casos de manera muy notable. El incremento medio de la materia orgánica de los suelos fue del 141%, llegando en varios casos a cuadruplicarse. Los valores medios pasaron a ser del 5% para C orgánico, 8,6% para materia orgánica y 0,35% para N. La magnitud de la variación no fue igual en todos los suelos, debido sin duda a las diferentes propiedades de los compost utilizados en cada caso, así como a probables diferencias en las dosis empleadas (no tenemos datos sobre estas). En general, el incremento fue mayor para C que para N, incrementándose los valores de la relación C/N en todos los casos, como es habitual en suelos que reciben compost.

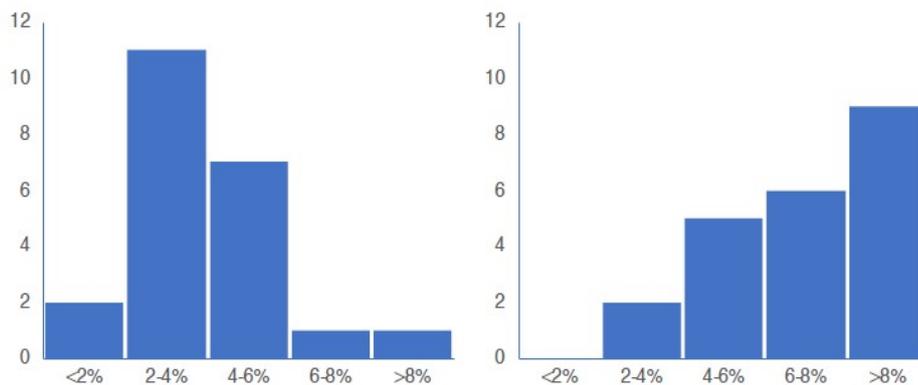


Figura 3. Distribución de contenidos en materia orgánica de los suelos antes (izquierda) y después (derecha) de recibir los compost.

Tabla 5. Diámetro medio de agregados en seco y estabilidad de agregados en húmedo de los suelos analizados antes y después de recibir compost.

Suelo	Localización	Diámetro medio (mm)		Estabilidad (%)
		Inicial	Final	Inicial
M1	Soto del Real	4,1	1,5	24
M2	Cerceda	3,2	1,2	15
M3	Alpedrete	2,0	1,6	20
M4	Alpedrete	2,7	2,0	14
M5	Móstoles	2,5	2,1	63
G1	Pontevedra	2,4	1,4	14
G2	Barro	3,3	1,4	11
G3	Pontevedra	2,0	2,0	25
G4	Barro	2,3	1,3	7
G5	Vilaboa	2,3	1,3	15
G6	Vilaboa	1,9	1,6	31
L1	Alto Derra - Arnedo	4,1	3,4	49
L2	Prailas - Arnedo	3,9	1,9	53
L3	Ausejo	4,1	3,6	2
L4	Arnedo	3,3	2,9	20
AR1	Nuez de Ebro	2,9	2,7	85
AR2	Monzalbarba	1,3	2,2	93
AR3	Zaragoza	1,4	3,0	81
AR4	Movera	1,4	1,7	92
Ba1	Reus	1,4	1,2	38
Ma1	Biniaraix, Sóller	2,6	2,8	62
Ma2	Bunyola	2,8	2,7	70

- Agregación

El estudio de la agregación se llevó a cabo mediante dos métodos: un tamizado en húmedo para determinar la estabilidad de agregados y un tamizado en seco para analizar el tamaño de agregados.

En el primer caso, los suelos presentaban inicialmente una gran variabilidad, entre 7 y 93%, con un valor medio de 51%. Muchos suelos presentaron valores muy bajos, incluso por debajo del 20%, y se observó que los valores más altos, cercanos al 100%, se dieron en suelos ricos en carbonatos, de acuerdo con el papel del carbonato cálcico como principal agente agregante en suelos mediterráneos. La adición de compost incrementó globalmente la estabilidad de agregados, reduciendo el número de suelos con estabilidades por debajo del 40% y aumentando el número de suelos con alta estabilidad (Figura 4).

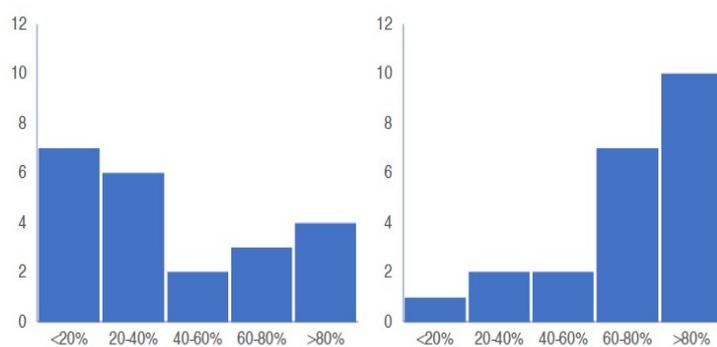


Figura 4. Estabilidad de agregados de los suelos antes (izquierda) y después (derecha) de recibir los compost.

Dentro de estos resultados, en general muy positivos, hay que indicar, sin embargo, que el efecto del compost fue diferente según se trate de suelos ácidos o alcalinos: se observó que en suelos ácidos la adición de compost aumentó la estabilidad de los agregados en todos los casos, mientras que en los suelos alcalinos el efecto en algunos casos fue una disminución (Figura 5). Este hecho es el reflejo de que los procesos dominantes de estabilización de agregados son diferentes en suelos con distintos valores de pH: en suelos ácidos la agregación depende en gran medida de la materia orgánica, y por tanto el aumento del contenido en esta normalmente da lugar a un incremento paralelo en la estabilidad de agregados (por ejemplo, suelos M1, M2 y todos los de Galicia). En cambio, la situación es distinta en suelos alcalinos, con valores de pH en torno a 8 o superiores, en los que el carbonato cálcico pasa a ser el principal agente agregante (por ejemplo, en los suelos de Mallorca y Aragón). En este caso, los suelos pueden ser menos sensibles a un aumento en el contenido en materia orgánica. Además, la reducción de pH observada en estos suelos tras la adición de compost puede tener un efecto negativo sobre la estabilidad de agregados, ya que valores de pH menos alcalinos producirían la disolución de los carbonatos, reduciendo así la estabilidad de agregados. Este mecanismo explicaría la menor o nula respuesta de los suelos alcalinos (M2, M3, Ma1, Ma2) a la adición de compost.

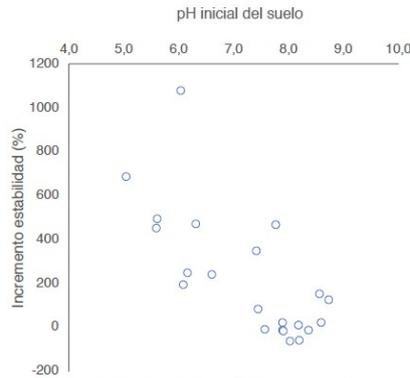


Figura 5. Efecto de los compost en la estabilidad de agregados en función del pH inicial del suelo.

En el caso del tamizado en seco, los suelos inicialmente presentaron una gran variabilidad en cuanto a la distribución de tamaños de agregados (Figura 6), aunque en general los macroagregados <2 mm representaron la mitad en peso de todos los suelos. Los valores para los diámetros medios de los agregados oscilaron entre 1,3 y 4,1 mm, con una media de 2,4 mm para el conjunto de suelos. Tras la adición de los compost, sería de esperar que el tamaño de los agregados se incrementase, debido al aumento de la materia orgánica. Sin embargo, esto no ocurrió y de hecho los valores para el diámetro medio de agregados incluso se redujeron en los suelos con compost: este valor osciló entre 1,2 y 3,6 mm, con un valor medio de 2,1 mm (Tabla 5).

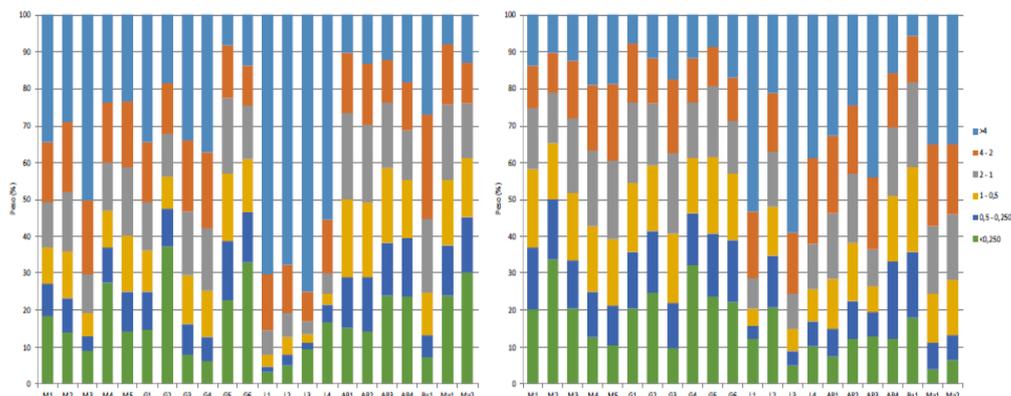


Figura 6. Resultados del tamizado en seco de suelos antes (izquierda) y después (derecha) de recibir compost.

Estos resultados contrastan con los de la estabilidad de agregados en húmedo, y de hecho se observó una correlación negativa entre los

resultados de ambos métodos (coeficiente de correlación de -0,60), cuando lo esperable habría sido lo contrario. Además, los resultados de este test no guardaron relación ni con el contenido en materia orgánica ni con el pH.

Estas discrepancias pueden deberse a varios factores: por una parte, el estado de humedad del suelo en el momento del muestreo influye notablemente en los resultados del tamizado en seco, lo que dificulta la comparación entre suelos de distintas zonas geográficas y muestreados en distintos momentos. Por otra parte, los resultados del tamizado en seco podrían estar indicando una tendencia del compost a reducir la formación de grandes terrones cementados en favor de agregados “reales” más pequeños, lo que sería un efecto favorable. Sin embargo, no se puede aceptar esta conclusión sin estudios adicionales. En conjunto, se puede decir que los resultados del tamizado en seco fueron de difícil interpretación en este estudio y por lo tanto no resultó el método más adecuado para el estudio de la agregación en este caso, en contraposición al estudio de la estabilidad en húmedo.

Consideraciones finales:

Desde un punto de vista científico, para obtener mayor y mejor información sobre los efectos del compost en suelos de diferentes regiones, sería interesante tener información más precisa sobre las dosis aplicadas y las condiciones de incorporación al suelo, así como uniformizar estas dentro de lo posible. Finalmente, sería de gran interés prolongar esta experiencia en el tiempo para observar los efectos del compost a más largo plazo, ya que este tipo de estudios son poco abundantes en España.

2. Cálculo de las emisiones de GEI evitadas al usar compost en el suelo comparado con las emisiones provocadas por el tratamiento en vertedero de la fracción orgánica de los residuos que ha sido compostada.

En base a la información publicada por el MITECO , en 2016 las emisiones generadas por el tratamiento y eliminación de los residuos en España supusieron el 7% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, en adelante) procedentes de los sectores difusos, constituyendo la cuarta mayor causa de emisión de gases de efecto invernadero en Europa.

Los gases que se emiten en la gestión y tratamiento de los residuos son principalmente metano y óxido nitroso generados en su mayor parte por el

depósito de los residuos en vertederos y por el tratamiento de las aguas residuales.

La prevención y la gestión adecuada del biorresiduo, además de reducir las emisiones causantes del cambio climático, contribuirán a la gestión sostenible de los recursos, la protección del suelo, al estímulo de las energías renovables y al cumplimiento de la normativa en materia de residuos.

Asimismo, los beneficios de la detracción del biorresiduo con destino a vertedero se producirán durante un periodo muy superior al horizonte 2020 sobre el que se plantean estas medidas, ya que el periodo medio de generación de metano por los residuos en vertedero es mayor de 25 años. Además, una cantidad importante de las emisiones actuales, que corresponden a los residuos depositados en las últimas décadas, también irá reduciendo su contribución.

La oficina española de Cambio Climático ha fijado las emisiones de GEI generadas en vertedero en 0.11 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de biorresiduo vertido, y en 0,33 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de biorresiduos incinerado.

En este proyecto las toneladas de compost que se han empleado han sido:

Compost Aplicado	
Zona de Estudio	Compost Total Aplicado
Mallorca	10 Toneladas
La Rioja	2,1 Toneladas
Galicia	1,96 Toneladas
Aragón	10 Toneladas
Madrid	0,32 Toneladas
Cataluña	6 Toneladas
Total Compost Aplicado	30,38 Toneladas

Estas 30,38 Toneladas de compost aplicadas, suponen aproximadamente 91,14 Toneladas de Biorresiduos.

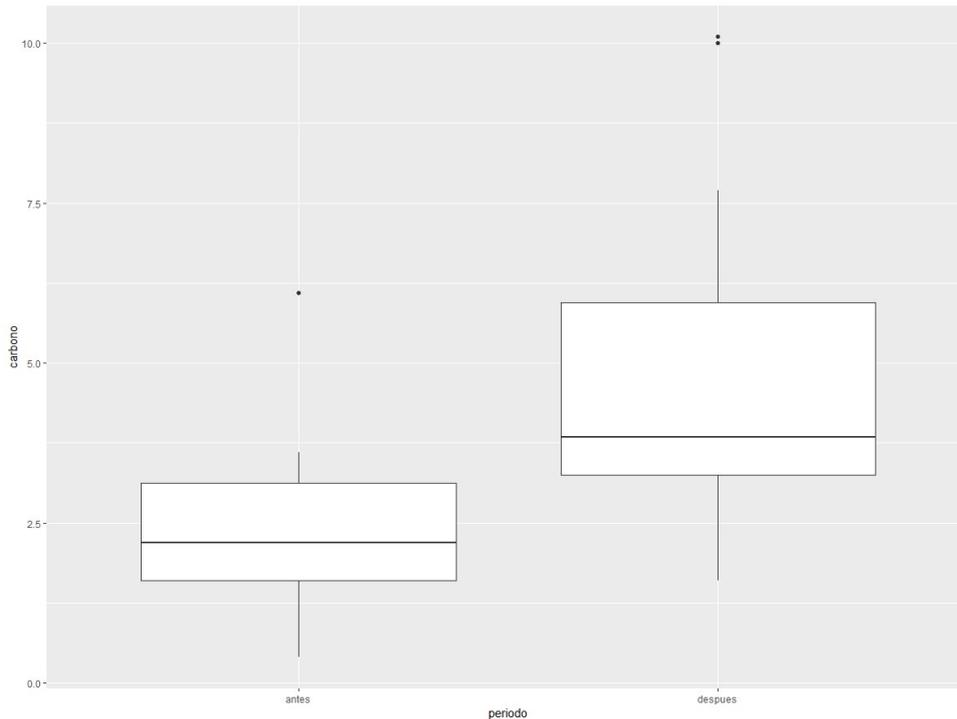
Reducción de GEI	
Destino alternativo	Calculo de reducción
Vertedero	91,14 x 0,11
Incineradora	91,14 x 0,33

La reducción de GEI ha sido de **10,02 Toneladas de GEI** si el destino alternativo hubiera sido vertedero y de **30,07 Toneladas de GEI** si el destino alternativo hubiera sido incineradora.

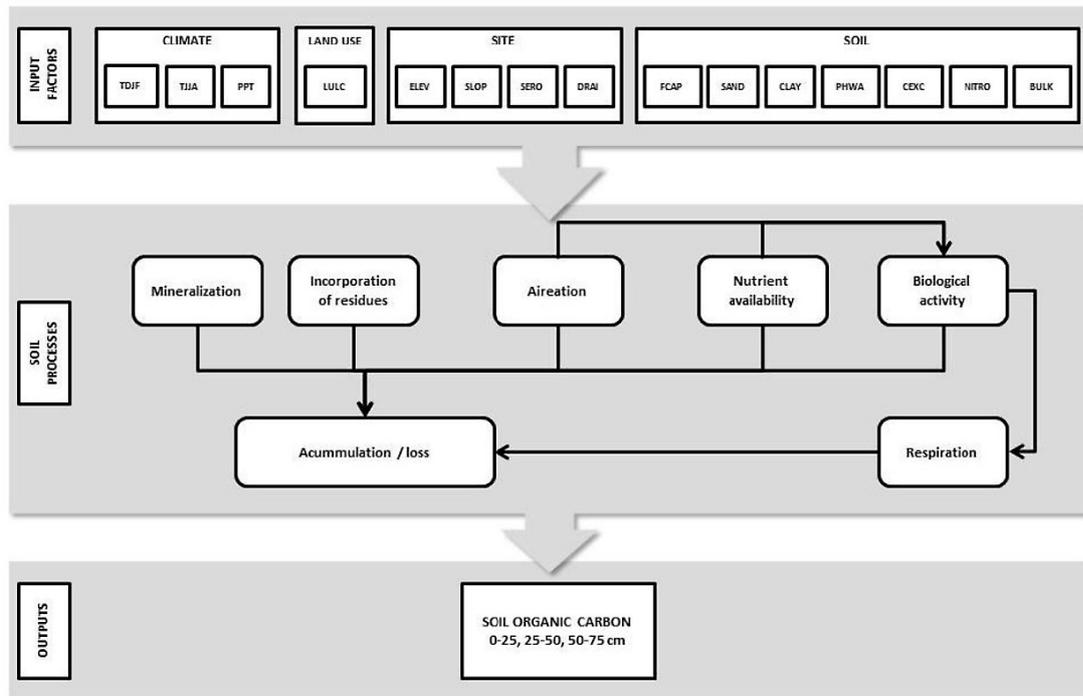
3. Valoración preliminar del potencial de mejora de los suelos en España de idénticas características que los del proyecto según los escenarios de cambio climático del quinto informe del IPCC, desglosado por territorios geográficos y las regiones climáticas

El contenido de carbono orgánico del suelo está fuertemente influenciado por las condiciones climáticas. El carbono orgánico almacenado en el suelo es uno de los mayores reservorios globales, por lo que pequeñas proporciones liberadas tienen grandes impactos en la concentración de gases de efecto invernadero basados en el carbono. Además se dan retroalimentaciones positivas puesto que mayores concentraciones de CO₂ suponen incrementos en las tasas de descomposición de la materia orgánica. El secuestro de carbono y la generación de carbono orgánico está considerado como uno de los grandes procesos o servicios ecosistémicos del suelo. Esta evidencia motiva el usar los datos de carbono orgánico obtenidos en este proyecto como variable estimatoria del efecto del cambio climático proyectado sobre los suelos, y cómo puede variar el contenido en carbono orgánico en función de las prácticas de compostaje.

El efecto del compost en el contenido de carbono orgánico es claramente significativo en el periodo de un año (figura 1, $t=-3.1835$, $df=19.487$, $p=0.0048$) considerando todas las muestras analizadas donde apenas se dan excepciones de pérdida de materia orgánica.



Existen varias aproximaciones para estimar las proyecciones de variaciones del carbono orgánico en el suelo en escenarios de cambio climático como CENTURY o RothC, los cuales además se han aplicado en el entorno mediterráneo. El más reciente de ellos, y ampliamente aplicado en regiones de Italia, España, o Marruecos, es el modelo carboSOIL [1] y que permite la caracterización de la pérdida o ganancia de carbono orgánico en los escenarios de cambio climático de la península. Este modelo ya ha permitido por tanto estimar pérdidas de carbono en el suelo en Andalucía, Italia o Egipto [2](ver diagrama de cálculo del modelo carboSOIL según la referencia [4]).



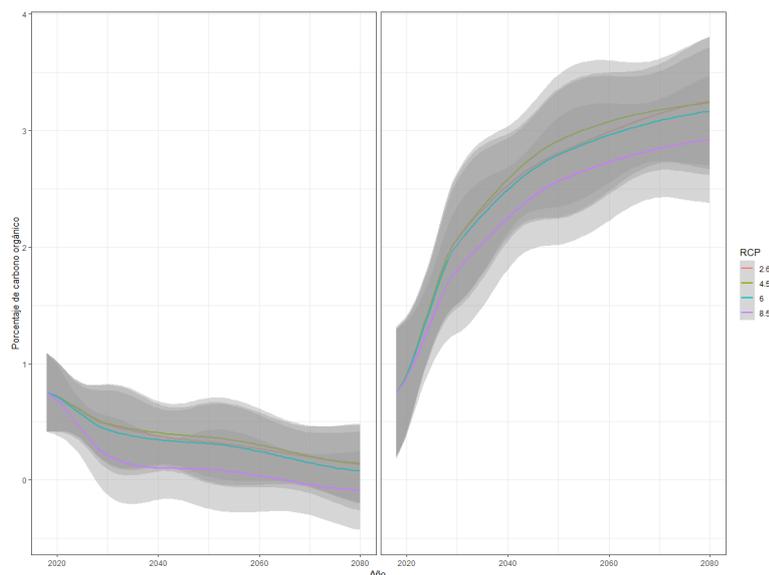
El modelo está implementado en el software ArcGIS y establece un modelo de suelo a partir de los siguientes datos: 1) propiedades edáficas: contenido en nitrógeno, intercambio de iones, datos de textura, densidad; 2) Modelos digitales del terreno incluyendo erosión y drenaje; 3) Variables de clima (precipitación, temperatura media en verano, temperatura media en invierno), 4) usos del suelo

Las variables del grupo 1) se obtuvieron del análisis de las muestras de suelo previas al compost si se habían realizado, y si no de la base de datos de suelos de la FAO. Las del grupo 2) del modelo digital de elevaciones del instituto geográfico nacional a resolución de 1 km. basadas en LIDAR. Las del 3) de las capas de clima de la base de datos Worldclim [3], para las cuales previamente se tuvieron que recalcular los mapas para obtener las medias de verano e invierno. A través del cruce de las coordenadas de las muestras con toda esta información geográfica se pudo obtener el modelo de las variables. Para la proyección climática a los años 2030, 2050, 2070 se utilizaron los modelos HADCM3 y CSIRO, elaborados por el consorcio CGIAR a partir de la base de datos de simulaciones climáticas del IPCC y que da lugar a los escenarios climáticos basados en los supuestas trayectorias de emisiones conocidas como *radiative emissions pathways* o RCPs. Así, el RCP 2.6 corresponde al escenario de mayor ambición climática donde la temperatura de la tierra se contendría por debajo del 1.5°C marcado por el Acuerdo de París y el 8.5 al más pesimista y de mayores emisiones que nos llevaría a un incremento promedio en el planeta de 4.9°C [4]. Finalmente el 4) se extrajo de los usos del suelo de CORINE.

El modelo carboSOIL permite computar en un sistema de información geográfica los parámetros y los procesos que explican el secuestro o la pérdida de carbono en forma orgánica (mineralización, incorporación de residuos, aireación, disponibilidad de nutrientes, respiración). Por lo tanto permite que se proyecte en escenarios futuros el destino del carbono orgánico, pero con una excepción: el modelo puede ser recalibrado puesto que se añade el factor de añadir una proporción de carbono orgánico mediante compost que actuaría mitigando la tendencia futura. Se hace hincapié en que se asume que la tendencia a acumular carbono es lineal, aunque en los datos se observa que el incremento es de hecho menor en las tierras de cultivo que ya disponían de insumos. Por lo tanto se tienen dos proyecciones futuras, con y sin compost añadido anualmente. Además considera, para cada muestra de suelo, el clima particular, más fresco, más cálido o más húmedo según donde se haya hecho el experimento. Por lo que en cada muestra se tiene en cuenta cómo variará el clima localmente y cómo afectará al suelo esa variación local. Es decir, no es uniforme.

Para los análisis estadísticos no se han tenido en cuenta las características individuales de los modelos (contempladas en el modelo carboSOIL ya) dado el escaso número de muestras disponibles. No es por tanto factible hacer un análisis robusto desde el punto de vista estadístico según los tipos de suelo.

Resultados



El modelo indica una clara diferencia en la evolución proyectada en el contenido de carbono orgánico en los suelos según se añada compost o no. Son significativas estadísticamente por tanto la evolución temporal de las

proyecciones del contenido de suelo y sobre todo el echar compost o no a los suelos. No hay diferencias significativas en la evolución del contenido de carbono del efecto de las concentraciones de CO₂. Si bien por tanto no hay un efecto claro, sí se observa una tendencia mucho más marcada en el caso del escenario de emisiones más altas, donde el porcentaje de contenido de carbono orgánico decae drásticamente, estirando incluso el poder predictivo del modelo, que llega a marcar un porcentaje de carbono negativo. En el caso de considerar una tendencia positiva de acumulación del carbono orgánico como consecuencia de la aplicación del compost, este experimento indica que, bajo las asunciones del modelo, es posible revertir las tendencias de desertificación del suelo agravadas por el cambio climático, y pone de relieve el hecho de que cerrar los ciclos de la materia orgánica constituye una barrera verdaderamente robusta ante una amenaza tan extrema como es el cambio climático en España.

Analysis of Variance Model

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
compost	1	35947	35947	121.7	3.743e-25
año	1	15299	15299	51.78	2.684e-12
RCP	3	859.9	286.6	0.9701	0.4067
Residuals	442	130606	295.5	NA	NA

Tabla 1. Resumen estadístico

Repetir el modelo incorporando la latitud arroja también un resultado interesante, puesto que arroja también una variable significativa (ver tabla 2, valor “y”, tabla 3 valor “y”, columna “estimate”). Dicho valor indica que los suelos evolucionarán peor en el este de la península ibérica. En el caso de cómo se ha ejecutado el muestreo, esta observación aplica a las islas Baleares, de clima eminentemente mediterráneo.

Analysis of Variance Model

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
compost	1	35947	35947	129.5	1.742e-26
año	1	15299	15299	55.12	5.9e-13
RCP	3	859.9	286.6	1.033	0.3778
y	1	8201	8201	29.54	9.061e-08
Residuals	441	122406	277.6	NA	NA

Tabla 2: Resumen estadístico teniendo en cuenta la longitud.

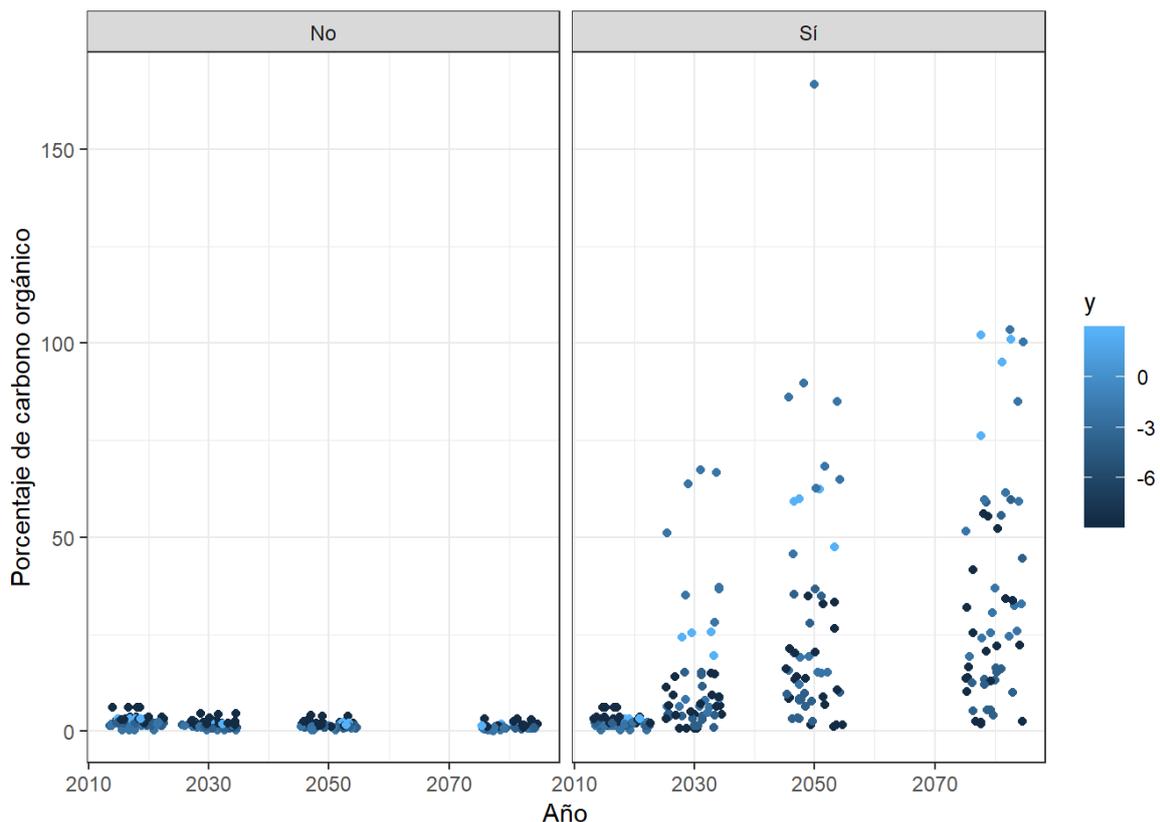


Tabla 3: Fitting linear model: carbono ~ año * y

4. Estimación de la capacidad de aporte de compost procedente de residuos orgánicos municipales a los suelos españoles y conclusiones sobre su potencial contribución a la adaptación al cambio climático.

Más del 70% de los suelos españoles se encuentran en riesgo de desertificación. El suelo es un recurso valioso y necesario para mantener la vida de las comunidades y los ecosistemas que las soportan, por lo que es necesario revertir el grave problema de la pérdida de materia orgánica de los suelos del Estado Español. Para poder mantener la producción agrícola, la conservación y de los suelos con visión a largo plazo, es imprescindible, por lo que más allá de la protección ambiental, afecta también a la economía.

El principal uso del compost es como material destinado a mantener o incrementar los niveles de materia orgánica en el suelo. Muchas propiedades del suelo dependen del contenido de materia orgánica: la estructura del suelo y por lo tanto su capacidad de retención de agua y de aireación, así como el riesgo de erosión y compactación, buena parte de

su capacidad de intercambio catiónico, responsable de la retención de nutrientes y de muchos contaminantes, el color, que afecta a su capacidad de calentamiento, el sostenimiento de la microflora del suelo, etc. Por ello, muchas de las funciones del suelo, particularmente la capacidad de almacenamiento y filtración, suministro de nutrientes y capacidad degradativa, están relacionadas con el contenido de materia orgánica del suelo.

El carbono del suelo desempeña también un papel esencial en el ciclo global del carbono y, por lo tanto, en la contaminación atmosférica por CO₂ y en el efecto invernadero. Si 8 Gt (1 Gt = 10.000 millones de t) de C antrópico son liberadas anualmente a la atmósfera, 2 Gt de C son secuestradas anualmente en la materia orgánica del suelo (Lal, 2000). La emisión del CO₂ del suelo hacia la atmósfera es acelerada por diversos procesos degradativos; por el contrario la restauración de los suelos degradados por erosión, minería, incendios, contaminación o infraestructuras, así como las buenas prácticas agrícolas encaminadas al mantenimiento de la materia orgánica del suelo pueden contribuir al secuestro del C y a mitigar el efecto invernadero.

La materia orgánica que aportan los suelos a los cultivos y plantaciones que mantienen, se ve en un gran porcentaje desperdiciada en vertederos e incineradoras en forma de residuos. La fracción orgánica de los residuos supone un 44% de los residuos municipales, según el MITECO.

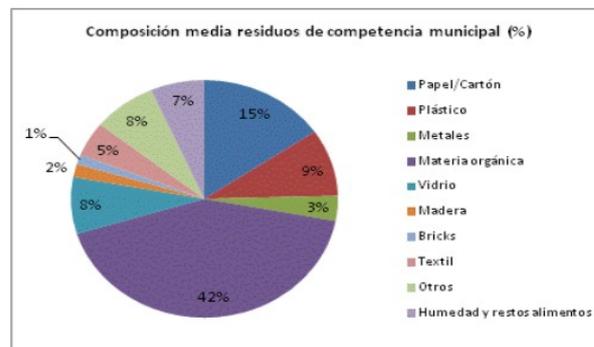


Gráfico 8. Composición promedio de los residuos de competencia municipal.

Según la composición de los residuos de competencia municipal en España (1996), del I Plan Nacional de Residuos Urbanos, la proporción en peso de materia orgánica contenida en el residuo es del 44%, de manera que es la fracción predominante en los residuos de competencia municipal y, por tanto, la que se genera en cantidades mayores. De acuerdo con otro estudio de estimación de la composición de los residuos de competencia municipal en España, realizado en 1999, el porcentaje en peso de materia orgánica sería de un 48,9 % (MARM, 2005).

La generación de residuos de competencia municipal en el año 2016 recogidos en España fue de 21.5 M de toneladas. Las cantidades que se indican corresponden a residuos domésticos y comerciales, procedentes

de hogares y del sector servicios (comercio, oficinas e instituciones) gestionados por las Entidades Locales, no incluyéndose los residuos comerciales gestionados por canales privados distintos al municipal, ni residuos procedentes de la industria.

La correcta gestión de los biorresiduos está considerada como una de las claves para conseguir un eficiente sistema de gestión de residuos. Teniendo siempre presente la prioridad de prevenir su generación, una vez generados, si los biorresiduos se recogen de forma separada y se someten a tratamiento biológico, se obtiene una enmienda orgánica muy valiosa que puede utilizarse como componente de sustratos y para incrementar el contenido en materia orgánica de los suelos, mejorando la fertilidad y el rendimiento de los cultivos.

Además, en los suelos más deficitarios en materia orgánica, la enmienda puede ser de utilidad para la lucha contra la erosión y la desertificación. Asimismo, la recogida separada y gestión diferenciada de los biorresiduos es uno de los mecanismos más efectivos para dar cumplimiento a la Directiva 1999/31/CEE, relativa al vertido de residuos, y reducir drásticamente la entrada de material biodegradable en los vertederos con la consiguiente reducción de las emisiones de metano asociadas a la degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias.

Por su parte, la presencia de biorresiduos como material no solicitado en el resto de fracciones recogidas separadamente, comporta una reducción de la eficiencia de separación de dichas fracciones en las plantas de tratamiento y una pérdida de la calidad de los materiales recuperados. Además, los biorresiduos tratados en las instalaciones de fracción resto acaban en mayor o menor medida en el rechazo de las plantas y, por tanto, puede finalizar en los vertederos manteniendo parte de su potencial de descomposición.

Teniendo en cuenta estas premisas, el potencial de generación de compost en España a partir de residuos municipales sería:

– Toneladas de biorresiduos generados: 21,5 Millones de toneladas/año X 0,44= **9,46 Millones de Toneladas/año**

- Toneladas de compost que se podría fabricar: Teniendo en cuenta que en el proceso de compostaje se reduce el peso de la fracción orgánica de los residuos en 1/3 de media: 9,46 millones de toneladas/3: **3,15 millones de toneladas/año de compost.**

– Superficie que podría cubrir el compost fabricado a partir de residuos municipales:

Depende en gran medida del cultivo en cuestión, pero haciendo una media aproximada de 35 toneladas/ha, como enmienda orgánica cada 3 años (11,6 toneladas/ha. Año), (según recomendaciones de la Junta de Andalucía): 3,15 millones de toneladas/11,6 toneladas/ha = **271.551 hectáreas/ año se podrían enmendar orgánicamente con compost.**

España tiene aproximadamente 17 millones de hectáreas cultivables, por lo que **la aportación de compost cubriría el 1,6% de la superficie de nuestro país.**

Se desarticula con estos datos el argumento de que el compost fabricado a partir de residuos orgánicos superará las necesidades de enmienda orgánica de los suelos españoles, y será necesario eliminar el compost fabricado mediante vertido o similar.

- [1] A. Jordán, L. M. Zavala, and D. De Rosa, "Modelling soil organic carbon stocks in global change scenarios : a CarboSOIL application," pp. 8253-8268, 2013.
- [2] M. Muñoz-rojas, L. Doro, L. Ledda, and R. Francaviglia, "Agriculture , Ecosystems and Environment Application of CarboSOIL model to predict the effects of climate change on soil organic carbon stocks in agro-silvo-pastoral Mediterranean management systems," *"Agriculture, Ecosyst. Environ."*, vol. 202, pp. 8-16, 2015.
- [3] R. J. Hijmans, S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis, "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas," *Int. J. Climatol.*, vol. 25, no. 15, pp. 1965-1978, Dec. 2005.
- [4] IPCC Working Group I, "IPCC Fifth Assessment Report (AR5) - The physical science basis," *IPCC*, 2013.