

FERTIECO: Implementación del compostaje hipertermófilo para la obtención de fertilizante de cultivo ecológico a partir de la fracción sólida de purín porcino

Resumen

El uso de estiércol y purines y su valorización como sustrato en la producción de biofertilizantes es interesante tanto ambiental como económicamente, debido a su composición rica en materia orgánica y en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros. Además, la reutilización de estos subproductos revalorizados es una práctica ideal para gestionar el excedente de desechos, incrementar la calidad de los suelos agrícolas y potenciar la bioeconomía circular. Por otro lado, se prevé que las necesidades de fertilización de cultivos ecológicos aumenten considerablemente en los próximos años, ya que uno de los retos del Pacto Verde europeo es que el 25% de la superficie agraria de Europa esté dedicada a la agricultura ecológica para el año 2030. En este caso, la problemática surge cuando ciertos desechos ganaderos de cría intensiva, que se generan en exceso en Cataluña, no se aceptan como materias primas para la producción de fertilizantes aptos para cultivo ecológico debido, muy probablemente, a la posibilidad de que contengan fármacos (principalmente antibióticos) y genes de resistencia a antibióticos.

Objetivos

Este estudio tiene como objetivo principal optimizar la tecnología de compostaje para higienizar y estabilizar la fracción sólida de purín porcino bajo condiciones hipertermófilas, obteniendo un biofertilizante con bajo contenido en fármacos y genes de resistencia. A través de este estudio se podrá demostrar no solo el porcentaje de reducción asociado a la aplicación de esta tecnología, sino que también se podrá comparar el efecto de la aplicación de aquellos desechos que sí pueden destinarse a la fertilización de cultivos ecológicos en comparación con el biofertilizante obtenido en este estudio.

Para cumplir con el objetivo general de la propuesta, también se consideran algunos objetivos específicos:

- Evaluar el proceso hipertermófilo para la reducción del contenido de fármacos de uso veterinario y genes de resistencia de las fracciones sólidas de purín porcino de madres, de engorde y del digestato de este último.
- Demostrar que los biofertilizantes obtenidos de purín porcino tienen contenidos equivalentes de fármacos y genes de resistencia a los estiércoles de bovino y a los desechos de porcino ecológico actualmente aptos para fertilizar suelos de cultivo ecológico.
- Demostrar que las cualidades agronómicas de los biofertilizantes obtenidos son equivalentes a las obtenidas con estiércol de vaca y desechos de porcino ecológico.
- Evaluar en términos de sostenibilidad ambiental y económica lo que supondría el uso de compost hipertermófilo de desechos porcinos de ganadería intensiva en cultivos ecológicos.

Descripción de las actuaciones llevadas a cabo en el proyecto

Este estudio está dividido en diferentes tareas:

1. Optimización del proceso de compostaje hipertermófilo de desechos no aptos para cultivo ecológico.
2. Estudio comparativo entre desechos y compost aptos y no aptos para agricultura ecológica.
3. Evaluación agronómica del compost hipertermófilo y de los desechos aptos para agricultura ecológica.
4. Estudio de viabilidad técnica, económica, social y ambiental del sistema desarrollado.

Resultados finales y recomendaciones prácticas

Actividad 1. Optimización del proceso de compostaje hipertermófilo de desechos no aptos para cultivo ecológico

Para llevar a cabo los tres procesos de compostaje a escala industrial, se han realizado la recogida y separación de diferentes desechos ganaderos (fracciones sólidas (FS) de purín de madres, de engorde y digestato de purín de madres). Las explotaciones ganaderas dispusieron de separadores móviles para obtener la fracción sólida de purín porcino y digestato. Una vez obtenida la fracción sólida de purín y digestato, las explotaciones ganaderas han sido sometidas a un proceso de compostaje hipertermófilo a escala industrial. En la Figura 1 se muestran, como ejemplo, los perfiles de temperatura obtenidos a escala industrial, donde se puede observar que se lograron condiciones hipertermófilas (70°C durante más de 5 días), resultando en materiales o compost completamente higienizados, libres de patógenos como *E. coli* o *Salmonella*.

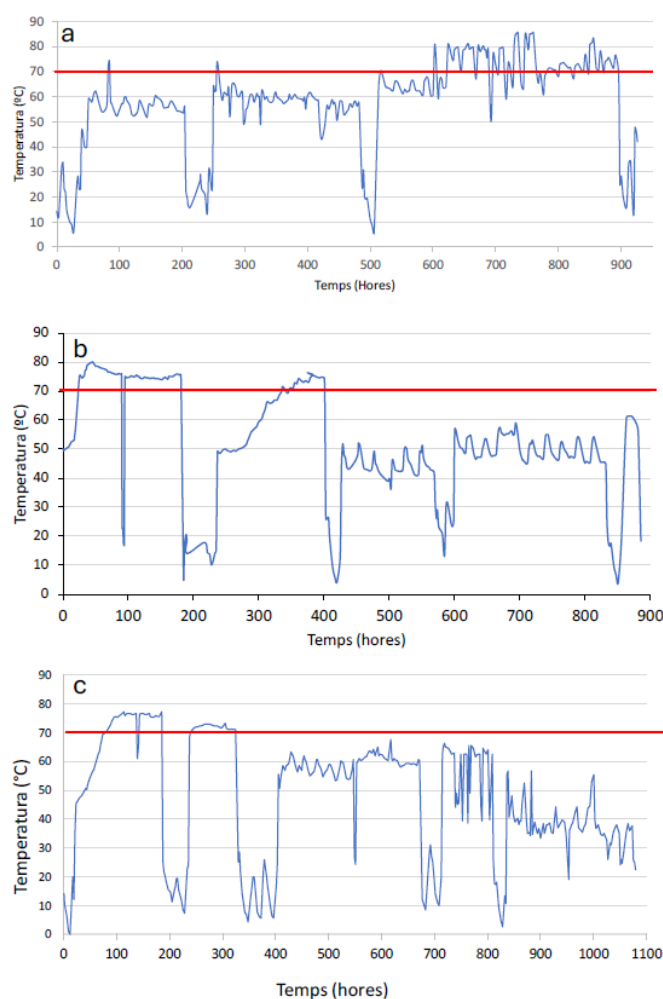


Figura 1. Perfiles de temperatura de las pilas del proceso de compostaje: a) FS de digestada de purín de mares, b) FS purín maras i c) FS purín de engorde

Actividad 2. Estudio comparativo entre deyecciones y compost aptos y no aptos para agricultura ecológica

a) Evaluación de las características físico-químicas y microbiológicas.

Una vez completado todo el proceso de compostaje (fase activa) y su etapa de maduración, los compost obtenidos fueron caracterizados. Se realizó una caracterización físico-química y microbiológica. En la Tabla 1 se muestran tres ejemplos de compost obtenidos durante la ejecución del proyecto. Los resultados muestran que el contenido de nutrientes puede ser, en algunos casos, superior al que se obtiene en

dyecciones ganaderas que actualmente son aptas para agricultura ecológica, como el estiércol bovino o el purín de granja porcina ecológica. Además, la evaluación mediante respirometría dinámica de este compost confirma su estabilidad como material fertilizante.

Tabla 1. Caracterización físico-química y microbiológica de los compuestos obtenidos

	COMPOST A	COMPOST B	COMPOST C
pH	8,48 ± 0,03	8,88 ± 0,01	8,67 ± 0,03
EC (μS/cm)	6569 ± 4	4733 ± 22	5729 ± 3
TS (g/kg)	676 ± 2	604 ± 3	697 ± 4
VS (g/kg)	409 ± 3	313 ± 4	369 ± 3
NTK (g N-total/kg)	18,4 ± 0,4	14,2 ± 0,2	17,6 ± 0,2
NH4+ (g N-NH4+/kg)	3,32 ± 0,06	2,73 ± 0,05	3,19 ± 0,05
P-total (mg P/kg)	9043 ± 69	8383 ± 384	7025 ± 130
Zn (mg P/kg)	318 ± 6,9	206 ± 7,3	223 ± 11
K (mg P/kg)	6217 ± 51	6022 ± 119	7459 ± 89
Cu (mg P/kg)	95 ± 0,6	55 ± 1,2	76 ± 1,0
Calci Ca (% s.m.s)	5,33	6,67	6,66
Magnesi Mg (% s.m.s)	0,602	0,555	0,626
Sodi Na (% s.m.s)	0,92	0,65	0,72
Sofre S (% s.m.s)	1,11	0,94	0,9
Cadmi Cd (mg/Kg s.m.s.)	<0,5	<0,5	<0,5
Coure Cu (mg/Kg s.m.s.)	162	104	128
Crom Cr (mg/Kg s.m.s.)	35,6	18,4	23,2
Crom hexavalent VI (mg/Kg s.m.s.)	<0,5	<0,5	<0,5
Mercuri Hg (mg/Kg s.m.s.)	<0,4	<0,4	<0,4
Niquel Ni (mg/Kg s.m.s.)	19,1	13	14,4
Plom Pb (mg/Kg s.m.s.)	17,6	9,38	17,2
Zinc Zn (mg/Kg s.m.s.)	457	342	352
Arsénic As (mg/Kg s.m.s.)	3,2	3,9	4,7
Salmonella (Presencia en 25g)	No Detectat	No Detectat	No Detectat
Escherichia coli UFC/g	91	<10	<10

b) Seguimiento y evaluación de los compuestos orgánicos de origen veterinario y genes de resistencia

Con el fin de realizar el seguimiento de los compuestos orgánicos emergentes de origen veterinario, así como de la presencia de genes de resistencia y observar su tendencia de degradación en el tiempo dentro de la pila, se recogieron muestras integradas de cada una de las pilas semanalmente durante la fase activa (S1-7), una en el proceso de maduración (CM) y la última una muestra del material final tamizado, denominado compost final (CF) (Figura 2).

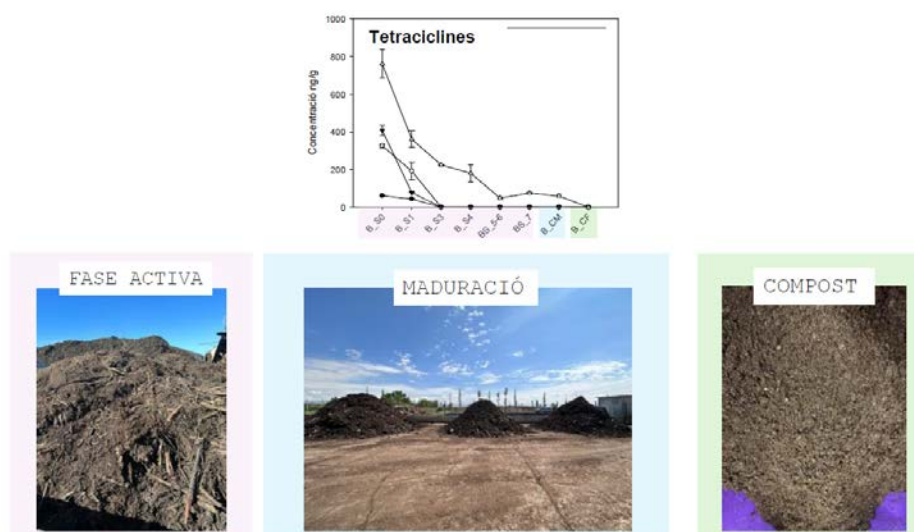


Figura 2. Perfiles de degradación de compuestos orgánicos de origen veterinario

Los antibióticos y fármacos analizados en las muestras de fracción sólida de purín porcino son: antibióticos tipo tetraciclina (tetraciclina, doxiciclina, oxitetraciclina, clortetraciclina), antibióticos del grupo de las quinolonas y fluoroquinolonas (flumequina, ofloxacina, ciprofloxacina, enrofloxacin, marbofloxacina, danofloxacina), antibióticos tipo sulfamida (sulfametoxazol, sulfametazina, sulfamerazina, sulfadimetoxina, sulfadiazina, sulfapiridina), antibióticos macrólidos (eritromicina, tilosina, tilmicosina, azitromicina, claritromicina), antibióticos tipo lincosamida, pleuromutilinas, cefalosporinas y otros (lincomicina, tiamulina, ceftiofur y trimetoprim), junto con el antihelmíntico flubendazol y el analgésico y antiinflamatorio flunixin.

En la Tabla 2 se muestran los porcentajes de reducción obtenidos en una de las tres campañas de compostaje de las muestras.

Tabla 2. Porcentaje de eliminación de los antibióticos y fármacos de uso veterinario durante el proceso de compostaje hipertermófilo

Compost	Compost A	Compost B	Compost C
<i>Tetraciclina</i>	100%	-	-
<i>Oxitetraciclina</i>	100%	-	-
<i>Doxiciclina</i>	100%	98%	100%
<i>Clortetraciclina</i>	100%	-	100%
<i>Marbofloxacina</i>	95%	91%	100%
<i>Enrofloxacin</i>	-	100%	100%
<i>Tilmicosina</i>	100%	100%	99%
<i>Tilosina</i>	100%	100%	100%
<i>Azitromicina</i>	-	-	30%
<i>Sulfametazina</i>	n.d.	-	n.d.
<i>Sulfadiazina</i>	100%	100%	-
<i>Lincomicina</i>	100%	100%	99%
<i>Tiamulina</i>	98%	100%	98%
<i>Flubendazol</i>	98%	99%	99%
<i>Flunixin</i>	57%	n.d.	n.d.

Por otra parte, se analizaron 8 genes de resistencia: 16S rRNA (bacterias en general), *sul1* (Sulfamidas), *qnrS* (Fluoroquinolonas), *ermB* (Macrólidos), *blaKPC* (B-lactámicos), *tetW* (Tetraciclinas), *int1* (integrasa) y *mcr1* (Colistina). En cuanto al estudio de la evolución de los genes de resistencia a antibióticos, el proyecto FERTIECO ha cumplido el objetivo de determinar la efectividad del compostaje hipertermófilo para la eliminación de genes de resistencia. En la Tabla 3 se muestran, como ejemplo, los porcentajes de degradación en tres compost obtenidos. Se han logrado eliminaciones del 99% en genes como *ermB*, *qnrS* y *tetW* y eliminaciones relevantes en genes tan prevalentes como *sul1*. Al mismo tiempo, si comparamos las concentraciones absolutas al final del proceso de compostaje respecto a las concentraciones que se obtienen en muestras de cultivo ecológico, los niveles del resistoma son muy similares, y en algunos casos inferiores.

Tabla 3. Porcentaje de eliminación de cada gen analizado al final del proceso de compostaje hipertermófilo

Gen	Compost A	Compost B	Compost C
<i>16S rRNA</i>	-8%	+9%	+50%
<i>sul1</i>	-93,6%	+74,6%	-74,8%
<i>int1</i>	-94,9%	+57%	-82%
<i>ermB</i>	-99,8%	-97%	-99,7%
<i>qnrS</i>	-95,9%	-98,5%	-78,5%
<i>tetW</i>	-98,4%	-98,4%	-96,8%

Actividad 3. Evaluación agronómica del compost hipertermófilo y de las deyecciones aptas para agricultura ecológica

La evaluación agronómica del compost hipertermófilo y las deyecciones se llevó a cabo en las instalaciones del CT BETA bajo condiciones controladas de luz (12h/12h), temperatura (23°C) y humedad (45-65%). Se distribuyeron aleatoriamente 36 macetas de un kilogramo de suelo donde se aplicaron los diferentes tratamientos de manera aleatoria, teniendo un total de 6 réplicas (macetas) por cada tratamiento (3 compost obtenidos, estiércol bovino, purín porcino ecológico, control). A continuación, se sembró raigrás a una dosis de 45 kg/ha. La aplicación de cada fertilizante se calculó teniendo en cuenta el contenido de nitrógeno de cada uno y los requerimientos del cultivo para este nutriente. Las macetas se regaron a capacidad de campo, evitando los lixiviados durante los 4 meses de crecimiento del cultivo. Durante estos meses se realizaron 4 cortes en el cultivo, cortando la biomasa a 2 cm de la base cada 30 días y midiendo la materia seca y la materia húmeda (Figura 3).

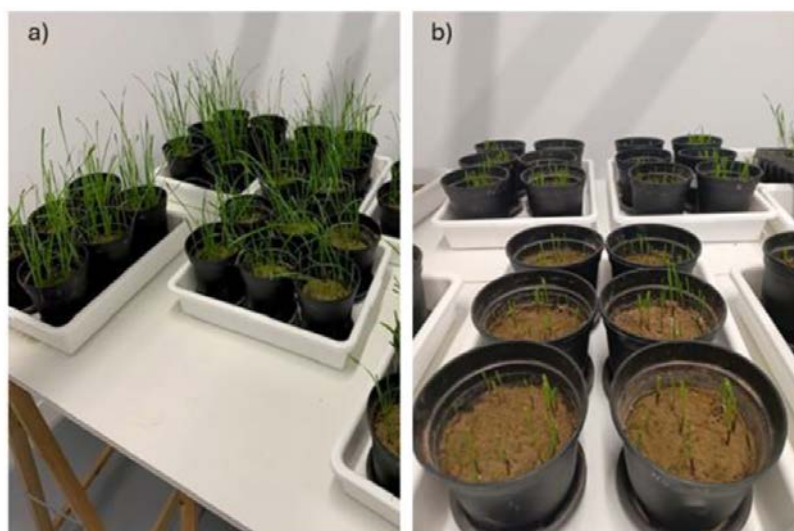


Figura 3. Fotografía del experimento a) antes del primer corte i b) después del corte.

La capacidad fertilizante de los composts provenientes de la fracción sólida tanto de purín de cría, como de engorde, y del digestato procedente de purín de cría en la fase de compostaje resultó ser adecuada para el crecimiento del cultivo, al igual que los fertilizantes aptos para agricultura ecológica, el purín porcino de granja ecológica y el estiércol bovino. Es importante tener en cuenta que no se observaron diferencias significativas respecto al control (donde no se añadió fertilizante) y, por lo tanto, los requerimientos nutricionales del cultivo durante los 4 meses del estudio fueron bajos y suplidos por el contenido de nutrientes iniciales del suelo.

Actividad 4. Estudio de viabilidad técnica, económica, social y ambiental del sistema desarrollado

La evaluación ambiental de la tecnología se llevó a cabo mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), considerando todo el ciclo desde la separación del purín hasta su uso como fertilizante ecológico en ensayos de laboratorio. La unidad funcional empleada fue de 1 tonelada de compost producido a través del proceso de compostaje hipertermófilo, utilizando cada uno de los tres efluentes principales que actualmente no son aptos para cultivo ecológico. Los límites del sistema para cada efluente se ilustran en la Figura 4.

Una vez identificadas las entradas y salidas de cada proceso, se asociaron conjuntos de datos de la base Ecoinvent 3.10 Cut-off System Process, que se centra en el análisis de la huella ambiental de productos y procesos de fondo, contabilizando así sus impactos. El desarrollo ambiental de la separación de purines y el posterior compostaje de la fracción sólida fue calculado en dos escenarios: el primero sin considerar la aplicación en campo del compost, y el segundo considerando esta fase de aplicación. Para este último proceso, se modeló la aplicación de 1 tonelada del compost en el campo, teniendo en cuenta su transporte y

aplicación mediante maquinaria agrícola. Los impactos ambientales se calcularon en función del contenido de NPK de cada compost obtenido, evitando la producción de fertilizantes minerales. En el caso específico del nitrógeno, se estimó una disponibilidad del 20% del N total obtenido en laboratorio.

Finalmente, el proyecto FERTIECO incluye el análisis de costos por proceso, centrando su atención en la innovación del compostaje hipertermófilo de purines de cerdo provenientes de granjas convencionales, con el fin de obtener un biofertilizante que pueda ser utilizado en cultivos ecológicos. El proceso comienza con la separación de los purines y concluye con la obtención del compost para ser aplicado en ensayos de laboratorio.

Este estudio se realizó utilizando un enfoque de análisis de gastos de capital (CAPEX), gastos operativos (OPEX), y costos fijos y variables basados en actividades. Además, se consideraron metodologías como el método factorial para la estimación de costos de capital fijo y la amortización lineal. Para la evaluación tecno-económica, se utilizaron los resultados obtenidos en las actividades desarrolladas en cada granja, empleando diferentes materias primas para llevar a cabo la elaboración de compost de alta calidad.

Los resultados obtenidos indican que los impactos sin la aplicación del compost en el campo generan una mayor magnitud de impactos, especialmente cuando no se utiliza la digestión anaerobia para obtener el digestato del purín de cría, que es el enfoque utilizado en este estudio. Además, los resultados revelan que los procesos de compostaje y separación son los que más contribuyen a los impactos ambientales, principalmente por el consumo eléctrico de la maquinaria y el transporte de las fracciones sólidas hasta la planta de compostaje.

En términos económicos, los resultados estiman que la producción de una tonelada puede llegar a costar 123 euros, dependiendo de la disponibilidad del sistema de separación del purín en la granja. Finalmente, la evaluación realizada permite afirmar que el proyecto es viable tecno-económicamente según los costos de producción por tonelada, aunque es necesario reducir las incertidumbres con un inventario de costos más detallado.

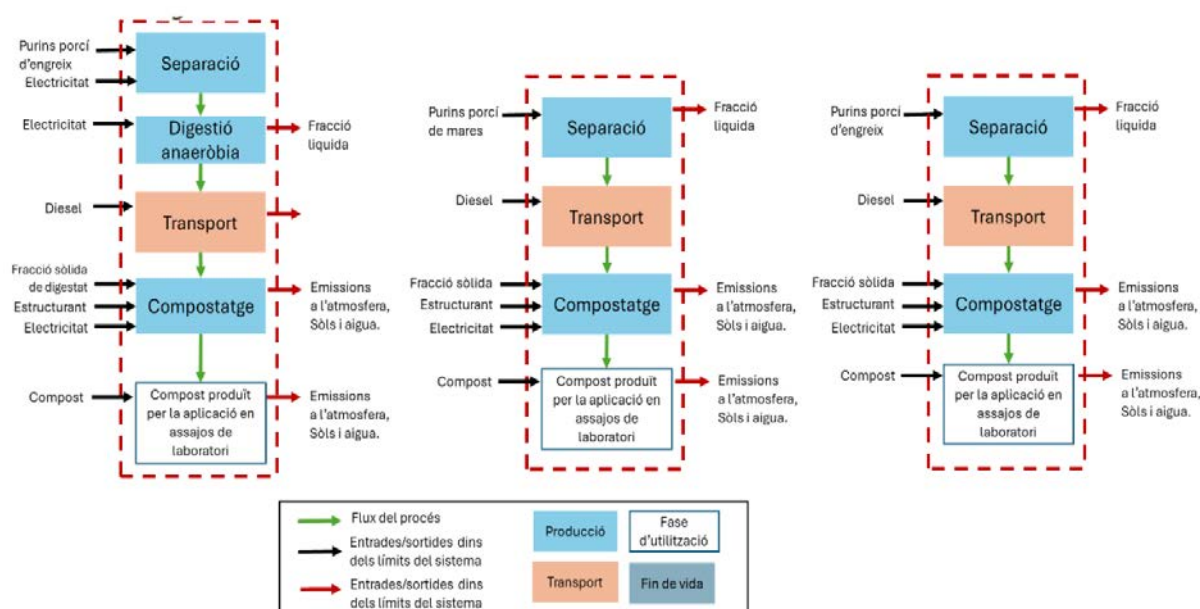


Figura 4. Límites del sistema proyecto FERTIECO de la producción de compost en tres diferentes tratamientos utilizando purines de cerdo como materia prima.

Conclusiones

A través del proyecto FERTIECO se ha demostrado no solo el porcentaje de reducción de antibióticos y genes de resistencia a los antibióticos (aproximadamente del 100%) asociado a la implementación del compostaje hipertermófilo en la fracción sólida de purín porcino, sino que también se puede comparar el efecto de la aplicación, en términos agronómicos, de aquellos efluentes que sí pueden destinarse a la fertilización de cultivos ecológicos (estiércol bovino y de porcino ecológico) en comparación con el biofertilizante obtenido en este estudio. Más allá de los aspectos ambientales comentados, el estudio de viabilidad técnica, económica y social garantiza que esta tecnología pueda aplicarse en el futuro. Así, la ejecución del proyecto FERTIECO proporciona evidencias científicas de que, mediante este tratamiento, la fracción sólida de purín porcino puede ser un fertilizante óptimo para la fertilización orgánica en producción ecológica.

Líder del Grupo Operativo

ENTIDAD: AGROPECUARIA CATALANA SCCL

Coordinador del Grupo Operativo

ENTIDAD: INNOVACC CLUSTER CATALÀ DE LA CARN I LA PROTEÏNA ALTERNATIVA

Otros miembros del Grupo Operativo (perceptores de ayuda)

ENTIDAD: SELECCIÓ BATALLÉ SA

ENTIDAD: GRUP GEPORK SA

ENTIDAD: AGRÀRIA PLANA DE VIC I SECCIÓ DE CREDIT SCCL

ENTIDAD: EMBOTITS SALGOT SA

Otros miembros del Grupo Operativo (no perceptores de ayuda)

ENTIDAD: FUNDACIÓ UNIVERSITÀRIA BALMES (UNIVERSITAT DE VIC-UNIVERSITAT CENTRAL DE CATALUNYA)

ENTIDAD: INSTITUT CATALÀ DE RECERCA DE L'AIGUA

Àmbit/s territorial/s de aplicació

PROVINCIA/S	COMARCA/S
BARCELONA GIRONA	BAGES LA SELVA OSONA VALLÈS ORIENTAL LA GARROTXA GIRONÈS

Difusión del proyecto (publicaciones, jornadas, multimedia...)

Se ha hecho divulgación, durante la ejecución del proyecto Fertieco, mediante las herramientas habituales de los participantes:

- Solicitud de ayudas GO21: [xarxa X](#), [pàgina web](#)
- Aprobación de ayudas GO21: [xarxa X](#), [pàgina web](#) [Objectius del projecte FERTIECO](#)
- Webinars de proyectos del clúster:
 - Marzo 2023: [linkedin](#), [X](#), [pàgina web](#), [youtube](#)
 - Noviembre 2023: [linkedin](#), [pàgina web](#), [youtube](#)
 - Abril 2024: [linkedin](#), [pàgina web](#), [youtube](#)
- Asambleas semestrales de INNOVACC: [juny22](#), [des22](#), [juny23](#), [des23](#), [juny24](#).
- Revista anual de INNOVACC: [2022](#), [2023](#) i [2024](#).

También se ha difundido en el boletín de INNOVACC y en las páginas web de los participantes.

Otra información del proyecto

DATOS DEL PROYECTO	PRESUPUESTO TOTAL
Fecha de inicio: Julio 2021	Presupuesto total: 246.506,90 €
Fecha final: Septiembre 2024	Financiamiento DACC: 113.997,81 €
Estado actual: Finalizada	Financiamiento UE: 85.998,34 €
	Financiamiento propio: 46.510,75 €

Con el financiamiento de:

Proyecto financiado a través de la Operación 16.01.01 (Cooperación para la innovación) a través del Programa de desarrollo rural de Catalunya 2014-2020.

Orden ARP/113/2021, de 20 de mayo, por la que se aprueban las bases reguladoras de las ayudas a la cooperación para la innovación a través del fomento de la creación de grupos operativos de la Asociación Europea para la Innovación en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas y la realización de proyectos piloto innovadores por parte de estos grupos, y Resolución ARP/1660/2021, de 27 de mayo, por la que se convoca la mencionada ayuda.

