Implementación de prácticas agroforestales para la recuperación de zonas degradadas en España (proyecto LIFE Operación CO2)

KALLEN S.[1], SONNEVELD E.[2], ALONSO P.[3], GANDÍA M.[3], MARÍN A. [4], FRANCO K.[1]
[1] Transfer Consultancy, [2] Volterra Ecosystems, [3] Beral Ingenierías, [4] Edena Alternativas Ecológicas

Resumen
En España existen más de 10 millones de hectáreas de suelos agrícolas degradados y abandonados que requieren una solución (MAGRAMA, 2016). Este proyecto se enfoca en la agroforestería y promociona el uso de prácticas agrícolas sostenibles, el incremento de la biodiversidad, la devolución de la vegetación a las zonas degradadas y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero.

Desde la primera campaña 2012-2013, el principal objetivo fue la reactivación de la biofertilidad natural de suelos degradados para que vuelvan a ser productivos. Para ello se ha realizado una descompactación vertical del suelo, corrección del pH, inoculaciones con hongos micorrícicos y bacterias benéficas y unas buenas prácticas agrícolas. Se han implementado prácticas agroforestales con la siembra de cultivos entre filas de árboles (almendro, pistacho, jara inoculada con boletus, pino inoculado con níscalo, entre otros), y se plantaron algunos árboles con un innovador sistema de aporte de agua (Cocoon).

Se han observado resultados muy satisfactorios como el aumento de la cantidad y la profundidad de las raíces de los cultivos lo cual conlleva a mayores rendimientos, mejor retención de agua en el suelo, una mayor supervivencia de los árboles en zonas semiáridas y un aumento de la captación de CO_2.

Palabras clave
Secuestro de carbono, suelo, fertilidad, micorrizas, desertificación.

1. Introducción

Abordar los problemas del **cambio climático** no es una cuestión de futuro dado que éstos ya pueden observarse y sus efectos se sienten a nivel global a través de cambios en precipitaciones, temperatura, condiciones meteorológicas extremas y emisiones de CO_2 (Field et al., 2014). Hoy en día, nuestro conocimiento de las tendencias del clima Europeo indica un crecimiento de las temperaturas de entre 2º a 4º C y un incremento en las precipitaciones del 10 al 50% de cara a la década del 2080. Estos cambios están distribuidos de manera desigual según la región y/o la estación climática, aunque parece que serán más pronunciados en el sur de Europa, donde veremos un incremento de la temperatura de +5ºC y un crecimiento de los períodos de sequía intensa en la **zona del Mediterráneo** (Garrote et al, 2015). Aproximadamente un 45% del suelo en Europa está en estado de vulnerabilidad, mientras que un 15% se considera "extremadamente vulnerable". Esto incluye suelos en la zona sur de la UE, como por ejemplo España, Grecia, Portugal, Italia y Francia (Joint, 2008).

La degradación del suelo no sólo tiene consecuencias medioambientales sino también en las parcelas agrícolas en donde se están viendo afectados los rendimientos, lo cual añade presión económica a las zonas rurales que ya de por si son débiles y se enfrentan al abandono de las tierras a causa del fenómeno de las migraciones rurales-urbanas. Con el fin de demostrar la posibilidad de transformar áreas abandonadas en España en suelos productivos, surge la iniciativa propuesta por el proyecto LIFE11 ENV/ES/535 **Operación CO_2**.

2. Objetivos

El objetivo es implantar **sistemas agroforestales** en suelos degradados en **áreas semiáridas** como herramienta para la mejora de los ecosistemas y su aprovechamiento sostenible. Se espera un incremento de la productividad de las cosechas, mejora en la calidad del suelo y aumento del potencial de secuestro de carbono en el suelo. El sistema agroforestal implica en sí mimo la diversificación de cultivos, mantenimiento de pastos permanentes, rotación con cultivos fijadores de nitrógeno (leguminosas) y reforestación (Shepard, 2013).

Una de las áreas demostrativas del proyecto es una finca de **25 hectáreas** localizada en el municipio de **Ayoó de Vidriales (Zamora)**. Esta zona se caracteriza por su suelo erosionado y propenso a los incendios (precipitaciones intensas pero escasas, con un máximo de 400-500 mm por año), mucho viento y vegetación escasa. La altitud media es de 840 m.s.n.m. y los suelos son ácidos. Es un área de propiedad comunal y su uso está controlado por el ayuntamiento. Según los vecinos, la producción de cereales en la zona solía estar en torno a los 2,000 kg/ha, pero debido a una gestión incorrecta que incluía el monocultivo y el arado excesivo, este número se ha reducido a 700 kg/ha, incluso a pesar del uso de fertilizantes químicos y abono porcino. Dados estos cálculos, la tierra donde llevamos a cabo este proyecto se había considerado poco rentable y había permanecido sin cultivar durante al menos 15 años.

La otra área demostrativa del proyecto tiene la misma extensión y está localizada en el municipio de **San Mateo de Gállego (Zaragoza)**. El clima de la zona se caracteriza como **semiárido frío** (Escala Köppen). La pluviometría media es de 396 mm, generalmente no efectiva y no precipitada en los momentos de máxima necesidad hídrica de los cultivos, herbáceos o arbóreos (primaveras y veranos muy secos). Una elevada acción secante del viento y la alta evapotranspiración debida a las altas temperaturas que se dan durante casi seis meses del año, generan un ambiente muy estresante para los cultivos. La actual finca y su entorno han sido típicamente cerealistas de bajo rendimiento, con siembra de trigos y cebadas de invierno en rotación bienal de cereal y barbecho (año y vez), o anualmente, con las labores de suelo y manejo agrícola que este tipo de cultivo implica. El planteamiento del **monocultivo cerealista** sobre una parcela de tales características, comporta una serie de costes fijos no asumibles desde el punto de vista ambiental (erosión, pérdida de suelo y biodiversidad, incremento de la huella de carbono) e incluso económico, debido al alto riesgo empresarial que suponen los rendimientos variables e impredecibles de dichos cultivos, que son totalmente dependientes de las condiciones meteorológicas más o menos favorables de la campaña.

3. Metodología

Los primeros pasos en la implantación del sistema agroforestal fueron los siguientes:

3.1. Diseño del plan agroforestal:

Ayoó de Vidriales: Durante el primer año (2012) se diseñó el plan agroforestal con base a las características del terreno. Se inició la reactivación del suelo con una siembra de cobertura (*Triticum* spp). Se seleccionaron varias plantas para abordar los siguientes tipos de uso de la tierra:
a) Madera, árboles de biomasa y árboles frutales (i.e. *Castanea sativa, Pistacia vera, Prunus dulcis, Pinus pinaster, Pinus pinea*);
b) Protección de fronteras y arbustos aromáticos (*Quercus suber, Rosa canina, Prunus spinosa, Crataegus monogyna*);
c) Cultivos comerciales y cubierta verde (*Secale cereale, Lupinus* sp, *Vicia sativa, Triticum* spp, *Vicia faba, Medicago sativa, Avena* sp); y otra vegetación para la mejora del suelo.

Se plantaron aproximadamente 3.000 árboles y arbustos siguiendo un esquema de plantación específico (i.e. *C. sativa* (10*6m), *P. vera* (10*10), *P. dulcis* (25*5), *P pinaster* (6*5), *Q. suber* (2*2). Algunos árboles fueron inoculados con ectomicorrizas para la producción de hongos, por ejemplo el *P. pinea* con *Lactarius deliciosus*, el *C. ladanifer* con *Boletus edulis* y el *Q. suber* con *Pisolithus tinctorius*.

San Mateo de Gállego: al igual que en Ayoó, se diseñó el plan agroforestal, tomando en cuanta las características del suelo, su particular climatología. A diferencia de la anterior área, estas tierras siempre fueron cultivadas, además en los años anteriores al proyecto una parte fue reconvertida a agricultura ecológica. El primer año se hizo una siembra de cobertura incluyendo leguminosas (*Vicia sativa-Avena sativa*) en el 100% de la finca para reactivar el suelo. Las especies vegetales seleccionadas fueron:
a) Árboles, algunos micorrizados (i.e. *Prunus dulcis, Pistacia vera, Pinus pinea (x Lactarius deliciossus), Olea europaea, Sorbus domestica, Crataegus azarolus, Quercus ilex (x Tuber melanosporum), Quercus coccifera (x Tuber melanosporum, Prunus armeniaca);*
b) Arbustos aromáticos *(Rosmarinus officinalis, Thymus vulgaris, Salvia officinalis, Lavandula officinalis, L. latifolia, L. stoechas)* y plantación de seto *(Atriplex halimus, Quercus coccifera, Rosa canina, Retama sphaerocarpa, Juniperus thurifera, Tamarix gallica);*
c) Cubiertas verdes *(Medicago sativa, Onobrychis viciifolia, Switchgrass)* y cultivos anuales *(Triticum* spp., *Secale cereale, Lens culinaris, Pisum sativum, Hordeum vulgare).*

Se plantaron aproximadamente la misma cantidad de árboles y arbustos siguiendo un esquema de plantación parecido al descrito en Ayoó de Vidriales.

3.2. División de las parcelas:

Ayoó de Vidriales y San Mateo de Gállego: Cada área demostrativa se dividió en 3 zonas para comparar el efecto de los diferentes tratamientos micorrícicos. Se nombraron zona A (40% de la tierra utilizando un 100% del producto), zona B (40%:50%) y zona C (20%:0%). Los ensayos se iniciaron en el otoño de 2012 y se extienden hasta el verano de 2017. (Figura 1, Figura 2).

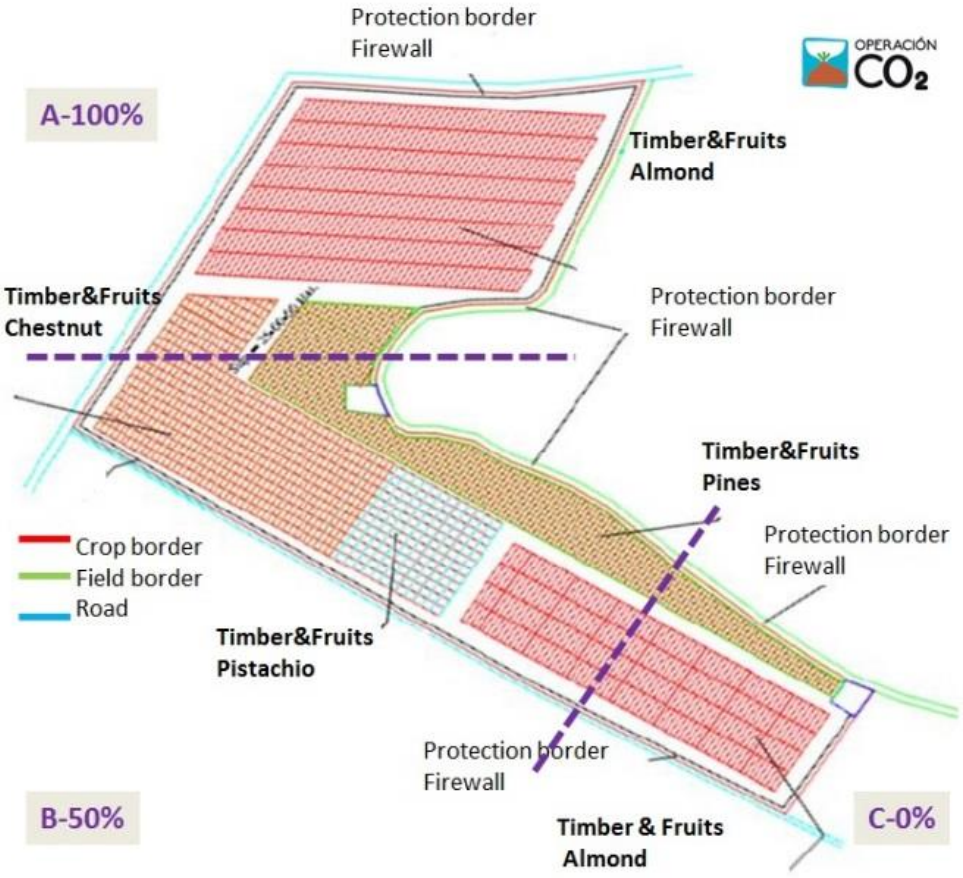


Figura 1. Esquema del diseño agroforestal y la división de parcelas Zona A, B & C. Ayoó de Vidriales

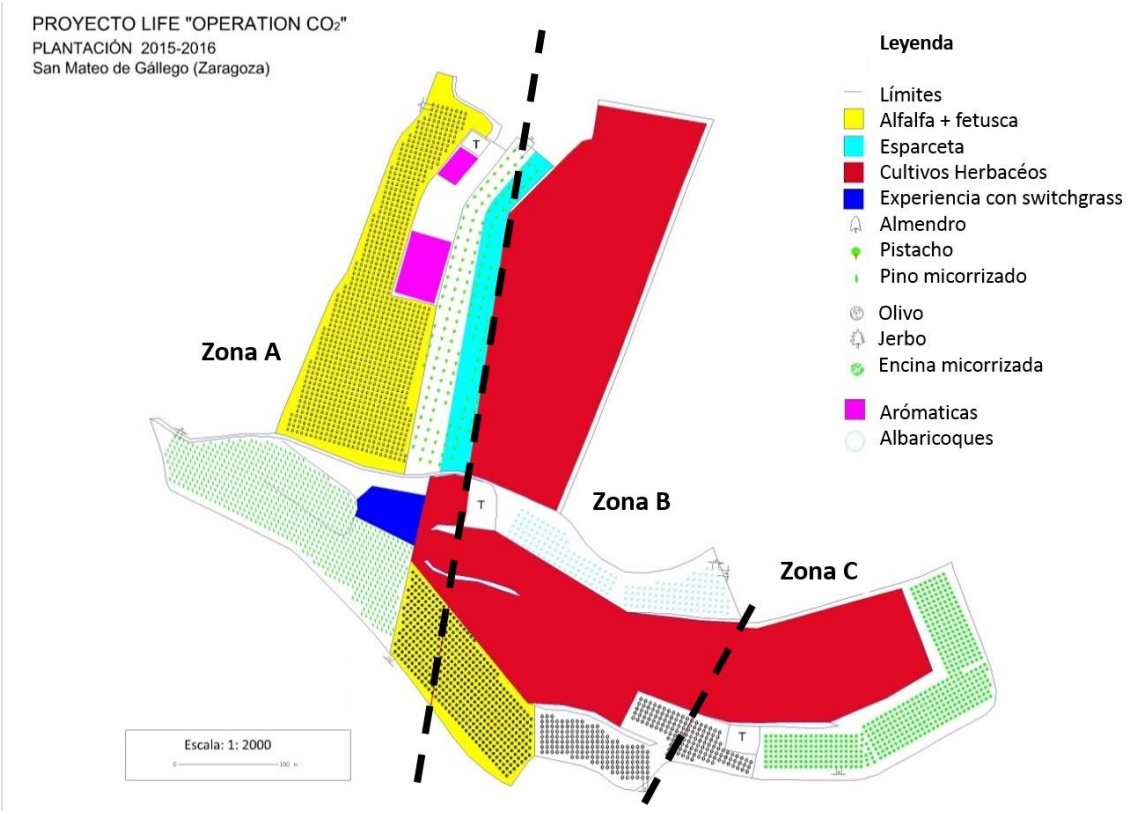


Figura 2. Esquema del diseño agroforestal y la división de parcelas Zona A, B & C. San Mateo de Gállego.

3.3. <u>Implantación de los cultivos y cubiertas verdes:</u> En las dos áreas demostrativas, primero se procedió a la aplicación de un corrector de pH. Después, debido a que se trataban de tierras muy pobres en nutrientes, se procedió a la activación de la microbiología del suelo antes de plantar los nuevos cultivos. Se aplicó una preparación vertical con arado para descompactar el suelo, y la siembra se hizo sobre las líneas. Además, en el caso de Ayoó de Vidriales se hicieron las siembras sobre caballones, técnica que ayudó a evitar encharcamientos y la compactación. En el primer año el suelo se inoculó con un producto a base de esporas de micorrizas, bacterias beneficiosas y humus, en la proporción anteriormente mencionada. Las micorrizas son asociaciones simbióticas que se establecen entre plantas y hongos del suelo. Probablemente se trate del tipo de simbiosis más extendido en la biosfera, ya que entorno al 90% de las plantas terrestres son capaces de establecer algún tipo de micorriza (Smith & Read 2010). El hongo ayuda a preparar la tierra para el plantado durante el año siguiente. Además, dependiendo de las características de la zona en cuestión, se hizo necesario probar un fertilizante orgánico compuesto de bacterias y humus para estimular las reacciones de las micorrizas y crear una interfaz entre las raíces y el suelo.

La combinación de técnicas agrícolas sostenibles junto con la aplicación de micorrizas, bacterias beneficiosas y humus ayudar a acortar considerablemente la recuperación biológica del suelo en comparación con otras prácticas que pueden tomar muchos años.

3.4. <u>Implantación de la parte forestal:</u> La implantación de la parte forestal del proyecto tuvo lugar el segundo año (Figura 3, 4), durante la campaña 2013-2014.
Se creó una plantación de borde a lo largo de todo el perímetro para que sirviera como cortavientos y cortafuegos y como corredor natural. La ejecución de la plantación también incluyó la experimentación con distintas tecnologías disponibles para apoyar el crecimiento de árboles y arbustos durante el primer año, particularmente en áreas caracterizadas por las duras condiciones climáticas. Por ejemplo, se ha utilizado un sistema de aporte de agua que recoge el agua del rocío y de la lluvia, manteniéndola en el

interior para suministrársela paulatinamente al pequeño árbol que protege. También se probaron fibras de coco y alfombras de lana como cubiertas de suelo alrededor de los nuevos árboles. Estos métodos mejoran la función capilar al prevenir la deshidratación a la vez que proveen un sistema de protección contra las malas hierbas.

En la misma campaña, una vez plantados los árboles se sembró en las calles entre las filas forestales el cultivo del cereal y/o leguminosa, actuando de manera sostenible con el manejo del suelo. Se evitó el uso de vertederas y cualquier labor que pudiera dañar el micelio de las micorrizas ya implantado. Otra conocida técnica que aplicamos durante este período fue la de combinar cultivos, en este caso veza-avena. Las vezas son aglutinantes de nitrógeno mientras que la avena ayuda a profundizar el enraizamiento proporcionando una mayor porosidad del suelo. El forraje resultante es muy apetecido por la ganadería.



Figura 3. Finca del proyecto con la implantación de la parte forestal Ayoó de Vidriales (2014 y 2016).



Figura 4. Finca del proyecto con la implantación de la parte forestal San Mateo de Gállego (2014 y 2016).

4. Resultados

Ayoó de Vidriales: Podemos concluir, de acuerdo con los estudios realizados en torno a la **producción,** el **crecimiento de raíces** y los **niveles de micorrizas en las raíces,** que tuvo lugar una transformación del suelo beneficiosa que dio lugar a un incremento de la producción. Nuestras observaciones anuales han demostrado que la producción en la zona A tiende a ser siempre mayor versus las otras dos zonas (Figura 5). Durante los dos primeros años (2013-2014) se cultivó trigo, mientras que la veza-avena se sembró en 2015 y centeno en el 2016. Los cultivos plantados entre las líneas de los árboles se han desarrollado favorablemente y la recolecta, si bien está limitada por los factores climáticos de la zona, mejora cada año.

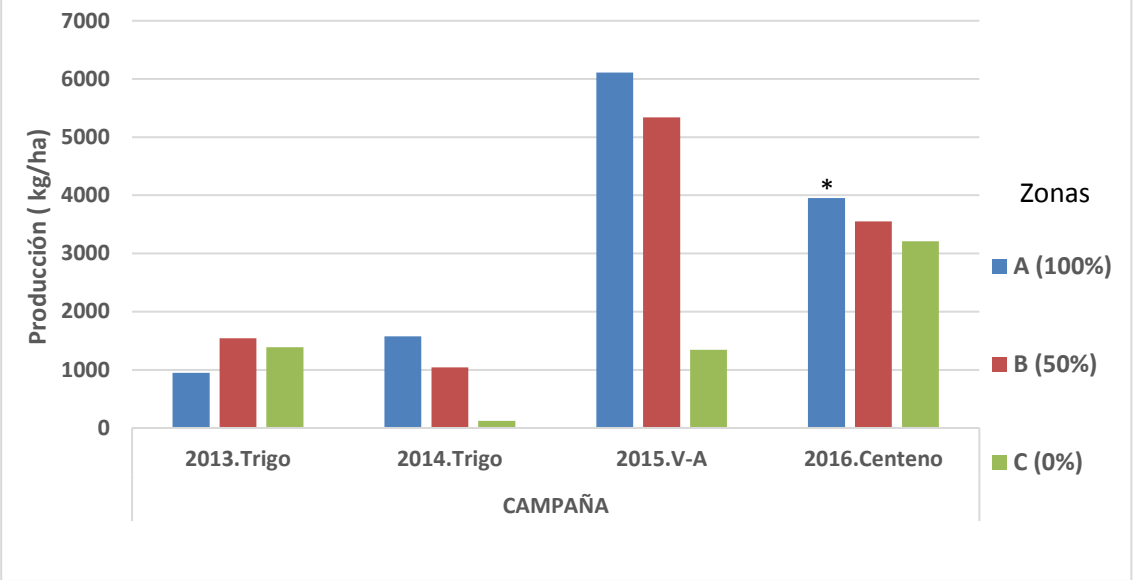


Figura 5. Relación obtenida durante los años 2013 - 2016 entre el rendimiento de las cosechas en Ayoó de Vidriales. (*) El promedio de producción en la zona A en 2016 se vio afectada por un importante ataque de conejos en diversas filas. La cifra en la gráfica refleja la cosecha en las filas menos afectadas.

Se observaron también cambios físicos en el suelo. La esponjosidad del suelo se redujo al pasar de la Zona A a la Zona C. A lo largo del desarrollo del proyecto, se hicieron calicatas en cada una de las tres zonas para verificar las diferencias en el desarrollo de las raíces. Esto resultó más difícil en la zona de control (C), donde no hubo tratamiento con micorrizas ni bacterias beneficiosas y se observó una clara compactación. Por otra parte, la humedad del suelo y el desarrollo de las raíces fueron mucho mayor en la zona A. Esto permite que la planta explore una zona más amplia de la tierra y por tanto extraiga una mayor cantidad de nutrientes. Las micorrizas, las bacterias beneficiosas y el humus crean una asociación simbiótica con la raíz de la planta que contribuye a este proceso. Estos resultados se correlacionaron con las tasas de rendimiento (kg/ha) y con la colonización de micorrizas del sistema de raíces (M%) aunque esta última sólo pudo ser medida en el año 2015. El año 2014 presentó una primavera más seca que la media habitual por lo que se redujo los rendimientos de las cosechas.

Como se puede ver, parece que hay una correlación estrecha entre el rendimiento (Figura 5), la profundidad de la raíz (Figura 6), y la cantidad de la raíz y el porcentaje de infestación por micorrizas (Tabla 1). Se ve claramente que los mejores resultados se obtuvieron en la Zona A, donde se llevaron a cabo el mayor número de inoculaciones con micorrizas. Es ahí donde observamos un mayor incremento de la producción anual así como una profundidad mayor de la raíz, probablemente debido a la presencia de micorrizas en las raíces como consecuencia de la colonización.

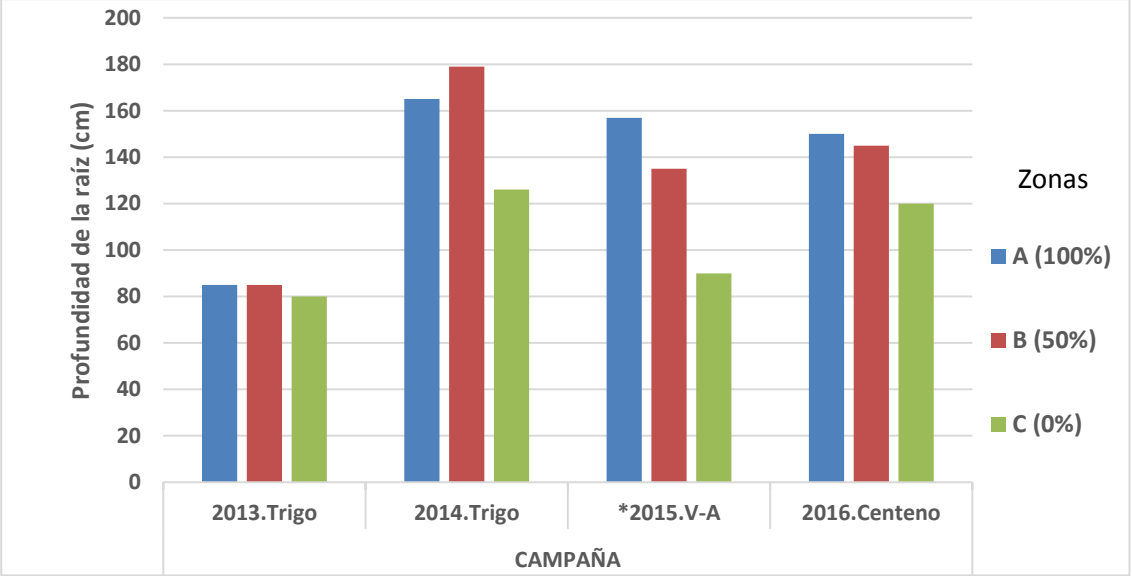


Figura 6. Alcance de la profundidad de las raíces en las diferentes zonas de tratamientos micorrícicos.

Durante el 2015, se recogieron muestras de las raíces para verificar el grado de micorrización a distintas profundidades del suelo y los resultados mostraron que las zonas inoculadas (A y B) tenían una cantidad mucho mayor de raíces entre las líneas de los 20-40 cm que la Zona C (la zona de control). Sin embargo, en la zona C había un porcentaje considerable de raíces a 60 cm, cosa que podría indicar la presencia de esporas micorrícicas naturales. Esto podría ofrecer un descubrimiento de gran importancia –el equilibrio biológico del suelo se puede restablecer sólo si este suelo no ha sido destruido por completo, y estamos por tanto en posición de restituirlo.

Tabla 1. Porcentaje de micorrización en la campaña 2015 en el cultivo de Veza - Avena en tres profundidades diferentes (calicatas realizadas en zona demostrativa de Ayoó de Vidriales).

Zona	**A**	**B**	**C**
Profundidad raíz (cm)	**Porcentaje micorrización (%)**		
20 cm	14,4	2,7	14,9
40 cm	18,5	20,5	5,7
60 cm	44,6	19,8	41,8

Referente a los árboles y arbustos plantados el porcentaje de sobrevivencia varia entre 79 y 97 dependiendo de la especie, siendo el jerbo que tiene mayor sobreviviencia y el castaño la menor. Algunos de los árboles productivos ya produjeron sus primeras nueces, como por ejemplo el almendro (figura 7). En otoño de 2016 se analizó en laboratorio el nivel de micorrización de los árboles y arbustos inoculados para la producción de setas y fue claramente establecido que la producción de las setas estará para el 2017, considerablemente antes de lo previsto, posiblemente gracias a la gestión integral del área. Según el desarrollo se prevé que los pinos con *Lactarius deliciosus* serán los primeros en ofrecer setas.





Figura 7. Calicata y primeros almendros en Ayoó de Vidriales (otoño 2016).

San Mateo de Gállego: el resultado obtenido de la producción media en las diferentes zonas de tratamiento con producto a base de micorrizas indica que la zona A es la más estable en rendimiento año a año (Figura 8).

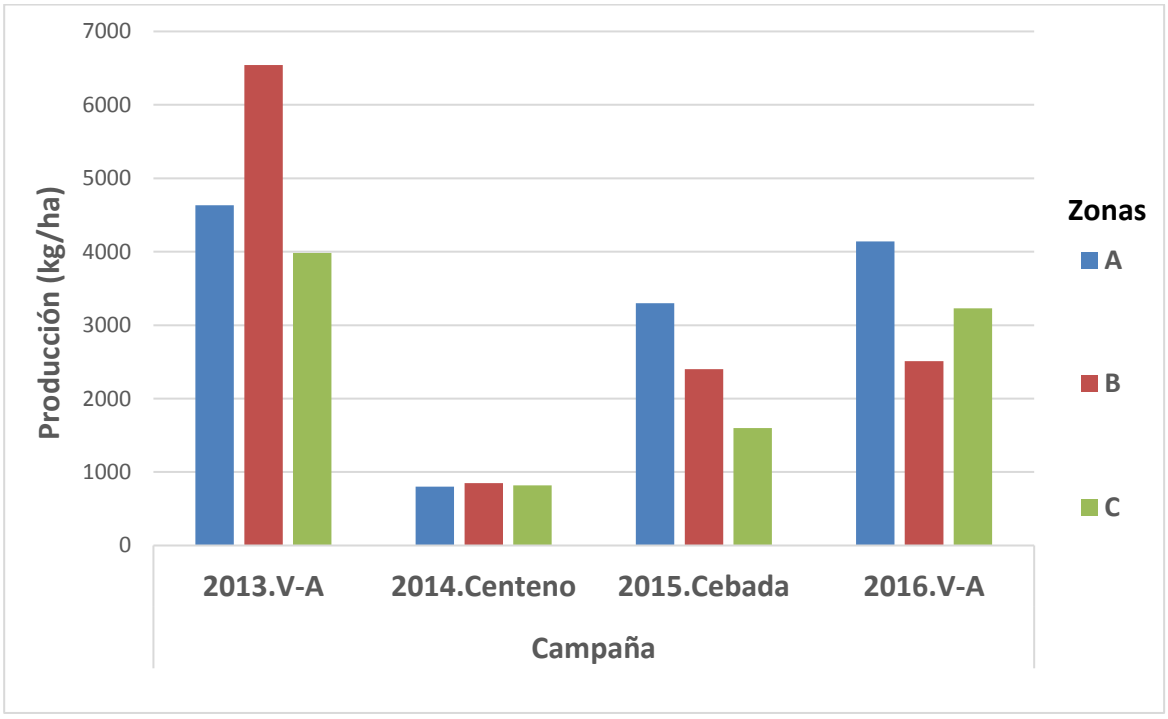


Figura 8. Relación obtenida durante los años 2013 - 2016 entre el rendimiento de las cosechas en San Mateo de Gállego.

Además, se ha observado un similar desarrollo de las raíces y de micorrización como en Ayoó aunque no se realizó un estudio profundo anualmente. Cabe mencionar que en el 2014 se llevaron diferentes muestras de raíces al laboratorio para evaluar la detección de micorrizas por medio de un protocolo de tinción. Donde se observó al microscopio que en todas ellas habían estructuras fúngicas adheridos a la raíz. En general se puede decir que las raíces profundizan cada vez más y es difícil su extracción sin la destrucción de las raíces fasciculares, puesto que la raíz pivotante alcanza cada año bastantes más centímetros.

Referente a los árboles y arbustos plantados el porcentaje de sobrevivencia varia entre 70 y 93 dependiendo de la especie, siendo el albaricoque que tiene mayor sobreviviencia mientras que el pistacho y la coscoja son los menores. Igual que en Ayoó algunos de los árboles productivos ya produjeron sus primeros frutos, en este caso el almendro. Aún no se ha analizado el nivel de micorrización de los árboles y arbustos inoculados. Cabe mencionar el buen desarrollo de la zona de las aromáticas, a excepción de la lavanda que no resultó viable para esta climatología con menos de 30% de sobrevivencia.

5. Discusión

La introducción de un sistema agroforestal integral impulsa no sólo la regeneración de tierras degradadas, sino la transición hacia una producción más diversificada y sostenible en el tiempo. También conocida como agrosilvicultura, ayuda al propietario a transformar su sistema productivo de un sistema anual a un sistema perenne. Esto permite al agricultor continuar lo que está haciendo hoy mientras instala los árboles y las plantas perennes que darán sus cosechas principales en el futuro. Así, se preserva la liquidez actual mientras se establecen las fuentes de flujos monetarios futuros. Este es un elemento crítico en la agricultura regenerativa la cual representa una serie de técnicas aplicables que cierren el vacío entre las cosechas anuales y perennes (Shepard, 2013).

Los principios de este sistema han sido aplicados con éxito en las dos áreas demostrativas del proyecto. Se ha demostrado que en las zonas con tratamientos micorrícicos y bacterias beneficiosas en combinación con prácticas de cultivo sostenibles, las raíces han crecido más y en mayor profundidad. Este fenómeno se ha traducido en un incremento de las producciones anuales comparado con la zona de control. Se ha podido modificar características del suelo como la estructura (mayor porosidad, aumento de la humedad) y se ha percibido un aumento de la actividad microbiológica. Este se resume en el incremento de la salud del suelo y una mayor resiliencia del sistema, reforzado con la introducción de diferentes tipos de árboles, arbustos y plantas aromáticas.

Además, debido al incremento de la biodiversidad del sistema productivo se ha observado una mayor resistencia por parte de las plantas contra plagas y enfermedades. El control fitosanitario está siendo sustituido por un control biológico gracias al incremento de los niveles de fauna auxiliar. Por ejemplo, una primera aparición de pulgón en los cultivos arbóreos y herbáceos en San Mateo fue totalmente disminuida gracias a los altísimos niveles de depredadores y parásitos que habitan de forma natural en las coberturas permanentes y en el corredor que forma el seto. En consecuencia esto favorece al propietario en una disminución de costes de insumos y tiempo de tratamientos.

6. Conclusiones

El objetivo fundamental del proyecto LIFE Operación CO_2 es convertir tierras degradadas en suelos saludables y demostrar que el **sistema agroforestal integral** es **económicamente viable**. La diversidad de producciones (diferentes tipos de árboles, frutos, nueces, trufas y setas, aromáticas, forrajes y cultivos anuales) de un sistema agroforestal ofrece al propietario no solamente más ingresos comparado con un sistema de monocultivos, pero también una disminución de riesgos (i.e. clima, fluctuación de precios, plagas, etc.).

Diferentes pruebas con sistemas de mejora del suelo basados en la retención de agua y eliminación de la competencia por arvenses (acolchado con fibra de coco) y de captación de agua de lluvia y humedad ambiental, han demostrado ser factores diferenciadores en la mejora de la supervivencia de las plantas. La colocación de pequeñas piedras en el interior del alcorque es también una herramienta suficiente a la hora de mejorar el mantenimiento de la humedad del suelo y evitar la competencia de arvenses sobre plantas de crecimiento lento como *Juniperus thurifera*. Con estos sistemas se ha podido **mejorar la supervivencia** en todas las especies.

La plantación de árboles y arbustos puede haber ayudado a **reducir la vulnerabilidad de este ecosistema,** actuando como una medida de adaptación para combatir los efectos negativos del cambio climático. Además, cuando la biomasa del suelo se incrementa, se puede analizar el potencial para la captura de carbono. Este modelo puede ser replicado en otras zonas que estén clasificadas como áridas o semiáridas tanto en España como en otros países mediterráneos que cuentan también con veranos secos y calurosos.

Finalmente, este modelo podría dar un impulso a la **Estrategia Verde** dentro del sistema de pagos de la Política Agraria Común (CAP) ya que la mayor variedad de cultivos, la mejora de la biodiversidad y la protección del agua y el hábitat contribuyen a incrementar la resiliencia del suelo y de los ecosistemas.

7. Agradecimientos

El proyecto LIFE11 ENV/ES/535 Operation CO_2 está co-financiado por la Unión Europea a través del programa LIFE. La duración del proyecto es desde el 01/09/2012 hasta el 30/08/2017.

8. Bibliografía

FIELD, CB.; BARROS, VR.; DOKKEN, DJ.; MACH, KJ.; MASTRANDREA, MD.; BILIR, TE.; GIRMA, B. 2014. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

GARROTE, L.; IGLESIAS, A.; GRANADOS, A.; MEDIERO, L.; MARTIN-CARRASCO, F. 2015. Quantitative assessment of climate change vulnerability of irrigation demands in Mediterranean Europe. Water Resources Management, 29(2), pp 325-338.

JOINT, E. E. A. J. R. C. W. H. Report. 2008. Impacts of Europe's changing climate—2008 indicator-based assessment. EEA Report No 4/2008 JRC Reference Report No JRC47756.

SHEPARD, M. 2013. Restoration Agriculture. Austin, TX, ACRES U.S.A.

SMITH, SE.; READ, DJ. 2010. Mycorrhizal symbiosis. Academic press.

http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/programas-ue/com2002_0179es01_tcm7-9639.pdf