LIFE AgroForAdapt

Sistemas agroforestales para la adaptación al cambio climático de espacios agrícolas y forestales mediterráneos

LIFE20 CCA/ES/001682 10/2021 – 09/2026

https://agroforadapt.eu

ENTREGABLE D4.1: Evaluación del microclima y vulnerabilidad a déficit hídrico en sistemas silvoarables





Mayo 2026

Proyecto LIFE AgroForAdapt: Sistemas agroforestales para la adaptación al cambio climático de espacios agrícolas y forestales mediterráneos 10/2021 – 09/2026

Acción D4: Evaluación del microclima y vulnerabilidad a déficit hídrico en sistemas silvoarables

Beneficiarios del proyecto: Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC; coordinador), Diputació de Barcelona (DiBa), Diputació de Girona (DiGi), Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB), Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació de la Generalitat de Catalunya (DACC), Fundació Emys (Emys), Agresta S. Coop. (Agresta), Agroof, SCOP (Agroof).

Cofinanciadores del proyecto: Diputació de Tarragona (DipTa). Agencia del Agua RMC (Fra-Montpellier)

Autores del entregable: Guillem Llena, Jaime Coello, Mar Gallego, Jordi Margalef (CTFC); Fabien Liagre, Numa Faucherre (Agroof); Beatriz de Torre (Agresta); Carla Cárdenas (Emys)

El proyecto LIFE AgroForAdapt (LIFE20 CCA/ES/001682; 10/2021 – 09/2026) está financiado por el programa LIFE de la Unión Europea

https://agroforadapt.eu

El proyecto LIFE AgroForAdapt (LIFE20 CCA/ES/001682) está cofinanciado por el programa LIFE de la Unión Europea. No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la CINEA. Ni la Unión Europea ni la autoridad concedente pueden ser consideradas responsables de ellos.

Executive summary

This deliverable evaluates the microclimatic conditions (air and soil temperature, soil moisture, relative humidity, and light intensity) induced by trees on crops, and the physiological crop responses (SPAD and NDVI) across the AgroForAdapt's demonstration silvoarable systems at different stages of development. In each site we compare a monocropping control and agroforestry conditions.

The results indicate that, in general, the woody component currently exerts a limited but detectable influence on the microclimate, which scales with system maturity. During the peak summer periods, agroforestry treatments showed a buffering effect on extreme temperatures, consistently exhibiting lower soil and air temperatures than control plots. Light availability (illuminance) was the variable most drastically modified by tree presence, displaying both a temporal trend—increasing shading as tree canopies develop over the years—and a spatial gradient, with the strongest reductions recorded closest to the tree line. Air humidity and soil moisture are generally unaffected, with a single detectable increase of soil moisture on a single trial.

These modified microclimate conditions do not compromise crop performance variables, with the only exception of the system with the strongest shadowing level, where the conditions induced by trees resulted in reduced NDVI values, a situation that took place also in another, younger site.

As tree canopies continue to expand, these emerging trade-offs are expected to become more pronounced. Long-term continuous monitoring remains essential to confirm the persistence of these trends and to fully understand their implications for system productivity and sustainability.

Contenido

1. Introducción 5
1.1. Contexto 5
1.2. Protocolo de seguimiento D4.1 5
1.2.1. Sistemas demostrativos de seguimiento avanzado e integral 5
1.2.2. Variables seguidas 6
2. Modificaciones que han debido realizarse respecto al protocolo 6
3. Resultados del microclima: temperatura del aire y del suelo, luz; humedad ambiental y del suelo 8
3.1. Variables estudiadas y resultados obtenidos 8
3.2 Interpretación de los resultados 16
4. Resultados de fisiología y estado vegetativo 17
4.1. Variables empleadas y resultados obtenidos 17
4.2 Interpretación de los resultados 20
5. Diseminación de los resultados D4.1 21

1. Introducción

1.1. Contexto

La acción D4 busca evaluar el efecto de los sistemas agroforestales a nivel del microclima y la vulnerabilidad al déficit hídrico, en comparación con sistemas convencionales agrarios y forestales. Este entregable presenta los resultados del seguimiento aplicado en esta acción sobre los sistemas silvoarables y silvopastorales en terreno de pasto.

1.2. Protocolo de seguimiento D4.1

1.2.1. Sistemas demostrativos de seguimiento avanzado e integral

Los resultados se han recopilado de acuerdo con lo previsto en el protocolo de seguimiento de estos sistemas. Como se describe en el protocolo, el seguimiento D4 se aplica sobre los sistemas de Seguimiento Avanzado, es decir, en aquellos seleccionados como especialmente relevantes para generar información contrastada entre las condiciones silvoarables o silvopastorales respecto a las zonas control (Tabla 1).

Tabla 1. Listado de sistemas de seguimiento avanzado silvoarables y silvopastorales en terreno de pasto, según el protocolo de seguimiento.

Socio	Parcela	Localidad	Condiciones experimentales (# tratamientos)	Períodos vegetativos seguimiento
CTFC	2.2A	Puig-Reig	3: cereal a 2 distancias hilera arbolada; control	23, 24, 25
CTFC	2.2B	Sagàs	2: aromáticas + nogal vs aromáticas control	22 y 23
Agresta	2.1D	Revenga	2: cultivo a 2 m a cada lado del arbolado + control	24, 25
Agresta	2.2E	Vezdemarbán		
Emys	2.1H	Riudarenes	2: huerta combinada con frutales varios y huerta control	23, 24, 25
DiGi	2.1K	Camps i Armet	2: cultivo afectado/no afectado por margen multifuncional con frutales y otras leñosas.	24 y 25
Agroof	2.2G	Domaine Perdiguier	2: a 2 m y a 7 m de la hilera (centro calle)	23, 24
CTFC	3.1A	Agullana	2: pasto bajo copa (1/3 copa desde tronco) vs. pasto abierto, sin influencia árboles	23, 25
Agroof	3.1Z	Ferme Figueirole	3: pasto bajo copa (2 m a tronco; 6 m a tronco) vs. pasto abierto, sin influencia árboles	23, 24
# total sistemas:			**10**	

1.2.2. Variables seguidas

Los datos recopilados se organizan en 3 bloques:

- Temperatura del aire y del suelo, luz y humedad ambiental: medida continua a partir de sensores. Al menos 1 punto de muestreo por tratamiento experimental.

- Humedad del suelo: medida puntual a partir de sensores. Al menos 1 punto de muestreo por tratamiento experimental.

- Fisiología y estado vegetativo: estas variables se adaptan a cada cultivo y tipo de vegetación leñosa: fenología, NDVI, SPAD. El seguimiento se realiza en 3-5 momentos del período vegetativo objeto del seguimiento

2. Modificaciones que han debido realizarse respecto al protocolo

A lo largo del proyecto ha sido necesario realizar diversos ajustes en el protocolo de seguimiento, adaptándose a diversos problemas y oportunidades encontrados (Tabla 2).

Tabla 2. Adaptaciones realizadas en el protocolo, en diversas parcelas de seguimiento.

Socio	Parcela	Cambios realizados	Justificación
CTFC	2.2A	Se ha añadido una campaña adicional (2025)	Compensación por otros seguimientos que han debido ser reducidos
	2.2B	Se ha añadido una campaña adicional (2024)	
Agresta	2.1D	Se han tomado mediciones en 2024 y 2025 con 2 condiciones experimentales P1 (A 2 metros del arbolado y control	Como el arbolado es pequeño y no tiene demasiada influencia sobre le cultivo, se decidió tener solo dos condiciones experimentales en lugar de tres
	2.2E		
Emys	2.1H	Cambio de parcela de seguimiento avanzado por otro sistema (C2.1T), pasando 2.1H a seguimiento básico.	Mucha variabilidad en la producción agrícola, que finalmente ha sido extensivo de secano en vez de huerta. La nueva parcela de seguimiento (2.1T) está compuesta por huerta y frutales de forma estable.
DiGi	2.1K	La parcela ha pasado a ser de seguimiento básico	Alta mortalidad en el primer período vegetativo, causado por la intensa sequía de 2023. No se sustituye por otra parcela, debido a que el seguimiento D4 de esta parcela no estaba presupuestado en la propuesta
Agroof	2.2G	Cambio del Domaine de Perdiguier (2.1G) a Catherine Legrand (2.1Z). Seguimientos en 2022. Hay 3 sondas por modalidad (A, B, C) y 5 modalidades (R1, R2, R3, R4 y T).	La instalación de las sondas en el Domaine de Perdiguier se ha topado con problemas logísticos. Las sondas se instalarán a partir de 2026 y los datos se recibirán más adelante.
CTFC	3.1A	La parcela ha pasado a ser de seguimiento básico	Alto nivel de herbivoría por parte de fauna salvaje combinada con mortalidad por la intensa sequía de 2023. Sólo se ha realizado el seguimiento del crecimiento de las plantas sobrevivientes de la plantación.
Agroof	3.1D	Cambio por Terres de Roumassouze (2.2H), datos obtenidos en 2023 y 2024.	La finca Terres de Roumassouze ofrecía mejores opciones de seguimiento y detección de interacciones árbol-cultivo

Otras modificaciones necesarias han estado relacionadas con las variables medidas y/o con los métodos de seguimiento:

· Los sensores de luz escogidos (HOBO Pendant Temp/Light) han dado diversos problemas por su resistencia limitada a la intemperie, especialmente en zonas de fuerte insolación. Como resultado, 0se ha tenido que descartar un 20% de las unidades, por dar valores aberrantes o haber interrumpido su funcionamiento

· Una parte (25%) de los sensores del suelo no han podido ser rescatados al final de las campañas, a causa de trabajos del suelo no planificados, la proliferación de la vegetación espontánea o la degradación de los elementos de marcaje.

· Un sensor de humedad del suelo fue gravemente dañado debido a la alta pedregosidad de algunas parcelas, que causaron daños en las varillas durante los muestreos, por lo que no se ha podido realizar el muestreo en 2024 en los sistemas de Castilla y León.

· El sensor de humedad y temperatura ambiental de la parcela 2.1T, tratamiento control de 2025, no se han podido procesar los datos recogidos por errores informáticos.

3. Resultados del microclima: temperatura del aire y del suelo, luz; humedad ambiental y del suelo

3.1. Variables estudiadas y resultados obtenidos

El componente forestal en un sistema agroforestal se esperaría que amortigüe temperaturas extremas, tanto en verano como en invierno. En nuestros sistemas de estudio se estudió la temperatura del suelo y del aire de las semanas más frías y cálidas del año, que es donde se espera que este efecto sea particularmente beneficioso para el cultivo:

En invierno no hubo diferencias significativas entre las temperaturas en la mayoría de los sistemas. El sistema 2.1T con tratamiento agroforestal, experimentó temperaturas ambientales significativamente más altas respecto el control, mientras que en los sistemas 2.2E se observaron temperaturas más altas en las zonas control. Por lo que respecta a la temperatura del suelo no se han observado diferencias significativas en el sistema 2.2B i en el sistema 2.2A (Tabla 3).

Por lo que respecta a las temperaturas extremas de verano, no hay diferencias significativas entre tratamientos, aunque se observa una temperatura ligeramente inferior en la zona con componente forestal que en las zonas control agrícolas en el 60% de los sistemas (Tabla 4). En el caso de la temperatura del suelo sí que se vio un efecto estadísticamente significativo en 2 sistemas (2.2A, 2.2B), donde la temperatura fue 0,5-0,6 grados menor en condiciones silvoarables que en el monocultivo agrícola.

En relación con la iluminancia, se detecta una ligera reducción causada por los árboles, que se hace algo más evidente a medida que avanza el período vegetativo de los árboles (15% de media en el mes de agosto; Tabla 5, Figura 1). Estas diferencias aumentan hasta el 60% en el sistema 2.2B.

Por lo que respecta a la humedad ambiental no se observan diferencias entre tratamientos en ningún sistema de estudio (Tabla 6).

Por último, en cuanto a la humedad del suelo, las únicas diferencias significativas entre tratamientos se dan en el sistema 2.2A, donde hay más humedad en los tratamientos agroforestales que en el control, tanto antes como después de brotación (Tabla 7, Figura 3). También hay diferencias significativas, en todos los sistemas, entre los valores antes (primavera) y después (verano) de la brotación (Tabla 7).

Las Tablas 3, 4, 5, 6 y 7 muestran un resumen de los resultados obtenidos con los sensores de temperatura del aire y del suelo, luz y humedad ambiental y humedad del suelo en cada parcela seguida, y para cada tratamiento experimental.

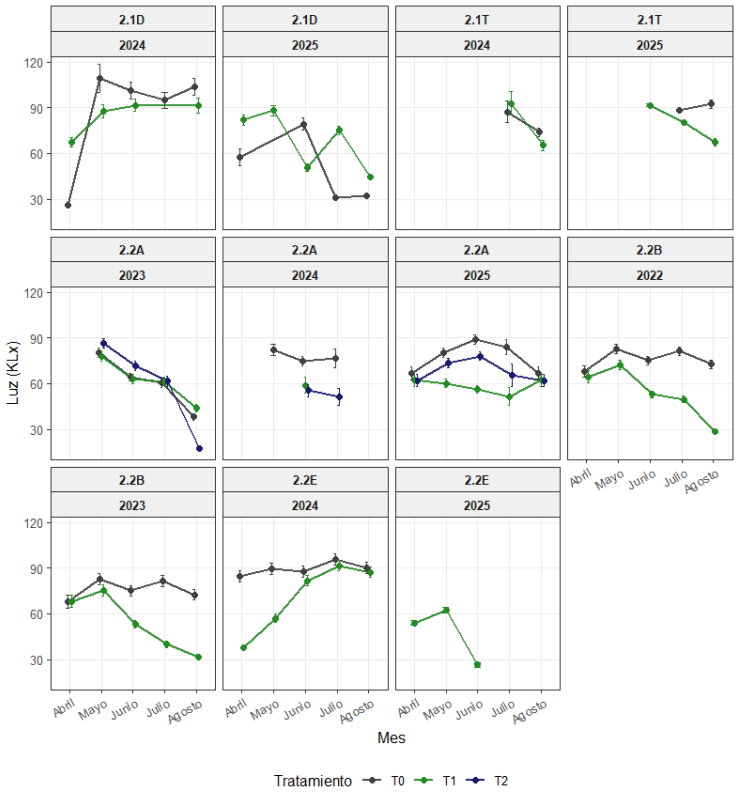


Figura 1: Evolución de la iluminancia para todos los sistemas de estudio. T0 = control agrícola. T1, T2: tratamientos agroforestales (ver Tabla 3)

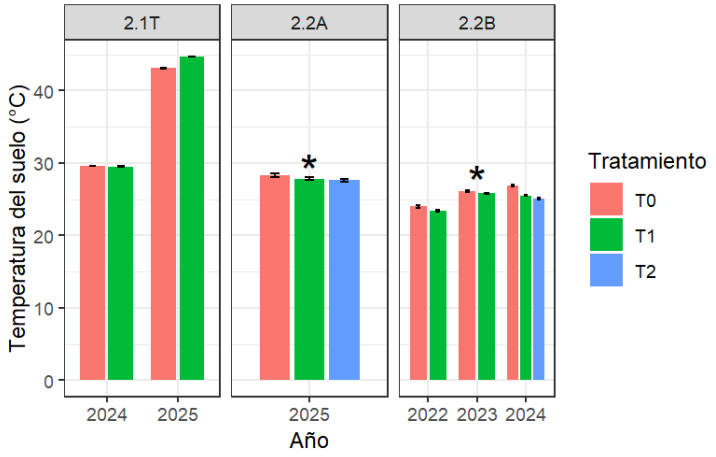


Figura 2: Valores medios de temperatura del suelo durante la semana más cálida de verano para cada tratamiento (T0 = control agrícola, T1 = agroforestal a 2,5 m del árbol, T2 = agroforestal a 4,5 m del árbol) y sistema de estudio, antes y después de la brotación del componente forestal. Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos (ver Tabla 7).

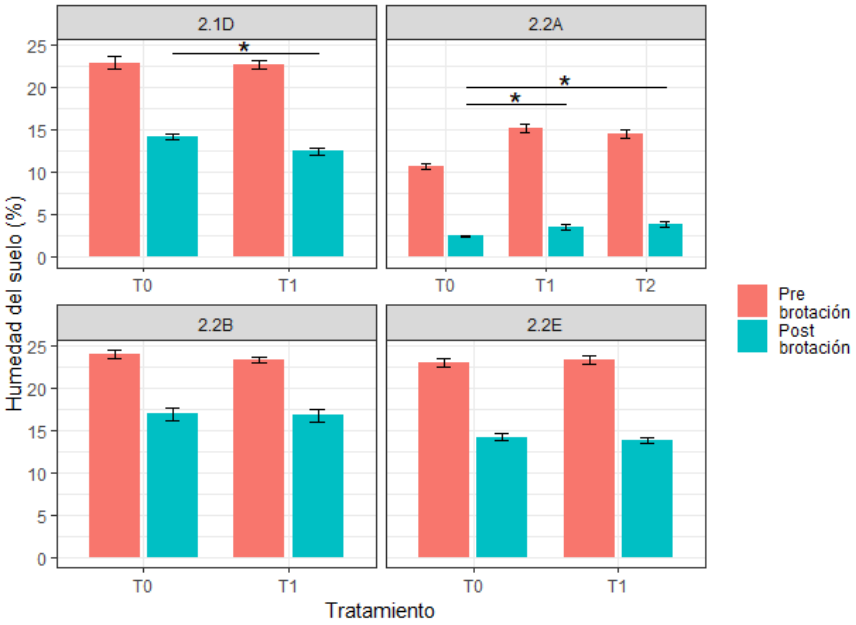


Figura 3: Valores medios de humedad del suelo para cada tratamiento (T0 = control agrícola, T1 = agroforestal a 2,5 m del árbol; T2 = agroforestal a 4,5 m del árbol) y sistema de estudio, antes y después de la brotación del componente forestal. Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos (ver Tabla 7).

Tabla 3. Resumen de resultados del seguimiento de temperatura del aire y el suelo en grados (media ± error estándar) de la semana más fría.

Socio	Sistema	Año	Tratamientos			Temperatura del aire (ºC) Semana más fría (invierno)			Temperatura del suelo (ºC) Semana más fría (invierno)		
			To: Control agrícola	T1: Agroforestal 1	T2: Agroforestal 2	To	T1	T2	To	T1	T2
CTFC	2.2A	2023	Cereal sin árboles	Cereal a 2,5 m de la hilera arbolada	Cereal a 4,5 m de la hilera arbolada	3,6±0,5	3,9±0,5				
		2024				2,3±0,4	2,6±0,4				
		2025				11,1±0,5	10,7±0,5	10,9±0,5	13,9 ± 0,2	14,2 ± 0,2	13,3 ± 0,1
	2.2B	2022	Aromáticas sin árboles o a 9 m	Aromáticas combinadas con los árboles	No existe (solo un tratamiento)	-	4,6 ± 0,4		6,6 ± 0,0	7,2± 0,02	
		2023				4,5 ± 0,7	4,4 ± 0,4		1,5 ± 0,02	1,6 ± 0,0	
		2024				-	-		4,0 ± 0,1	3,5 ± 0,1	
Agresta	2.1D	2024	Judías, garbanzos y patatas sin árboles	Almendros con judías, garbanzos y patatas		-0,34 ± 0,2	-0,31 ± 0,2				
		2025	Cereal sin árboles	Almendros con cereal		1,79 ± 0,5	1,82±0,5				
	2.2E	2024	Yeros sin árboles	Almendros y yeros como cubierta permanente		5,25 ± 0,4	-0,04±0,1				
		2025				6,3 ± 0,7	0,56 ± 0,6				
Emys	2.1T	2024	Tomates sin efecto de los árboles	Tomates a 2,5 m de la hilera arbolada		-4,6 ± 0,1	-2,5 ± 0,1		3,9 ± 1,3	3,2 ± 5,1	
		2025	Tomates sin efecto de los árboles	Tomates a 2,5 m de la hilera arbolada		-	-1,4 ± 0,1		0,0 ± 0,5	0,0 ± 0,4	
Agroof	2.1Z	2022	Ajedreas sin árboles	Ajedreas con árboles		8,02 ± 0,6	8,19 ± 0,6				

Tabla 4. Resumen de resultados del seguimiento de temperatura del aire y el suelo en grados (media ± error estándar) de la semana más cálida.

Socio	Sistema	Año	Tratamientos			Temperatura del aire (ºC) Semana más cálida (verano)			Temperatura del suelo (ºC) Semana más cálida (verano)		
			To: Control agrícola	T1: Agroforestal 1	T2: Agroforestal 2	To	T1	T2	To	T1	T2
CTFC	2.2A	2023	Cereal sin árboles	Cereal a 2,5 m de la hilera arbolada	Cereal a 4,5 m de la hilera arbolada	27,5±0,6	28,1±0,6				
		2024				25,1±0,7	24,9±0,4				
		2025				28,5±0,7	28,3±0,7	28,8±0,8	28,3±0,2	27,8±0,2	27,6±0,2
	2.2B	2022	Aromáticas sin árboles o a 9 m	Aromáticas combinadas con los árboles	No existe (solo un tratamiento)		26,8±0,3		24 ±0,2	23,4±0,1	
		2023				25,5 ±0,6	26,6±0,6		26,1±0,1	25,8±0,1	
		2024							26,9±0,1	25,5±0,1	25,1±0,1
Agresta	2.1D	2024	Judías, garbanzos y patatas sin árboles	Almendros con judías, garbanzos y patatas		29,1±0,9	29,1±0,9				
		2025	Cereal sin árboles	Almendros con cereal		24,2 ± 1,4	22,3±0,7				
Agresta	2.2E	2024	Yeros	Almendros y yeros como cubierta permanente		29,9 ± 0,5	29,9±0,5				
		2025				30,6 ± 0,7	30,5±0,7				
Emys	2.1T	2024	Tomates sin efecto de los árboles	Tomates a 2,5 m de la hilera arbolada		47,8 ± 0,1	43,2 ±0,1		29,6 ±0,05	29,5 ±0,08	
Emys	2.1T	2025	Tomates sin efecto de los árboles	Tomates a 2,5 m de la hilera arbolada			44,3 ±0,1		43,1 ±0,05	44,7 ±0,04	
Agroof	2.1Z	2022				19,3 ± 0,1	17,8 ± 0,3				

Tabla 5: Resumen de resultados del seguimiento de luz durante los períodos de abril a agosto (KLx): media ± error estándar

Socio	Sistema	Año	Luz (KLx)														
			Abril			Mayo			Junio			Julio			Agosto		
			T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2
CTFC	2.2A	2023				80,5 ±3,1	78,0 ±3,5	86,3 ±3,0	64,2 ±2,6	62,9 ±3,0	71,7 ±3,3	60,4 ±2,7	61,5 ±3,0	61,7 ±3,5	38,1 ±2,1	43,8 ±2,5	17,5 ±2,0
		2024				82,2 ±3,9			74,7 ±3,3	58,8 ±5,2	55,4 ±4,0	76,7 ±6,1		51,4 ±5,7			
		2025	66,6 ±4,2	62,3 ±4,2	62,1 ±4,1	80,3 ±3,3	60,2 ±2,8	73,3 ±3,0	89,0 ±3,3	56,2 ±2,5	78,1 ±2,9	84,0 ±4,7	51,6 ±5,87	65,6 ±7,3	66,6 ±4,2	62,3 ±4,2	62,1 ±4,1
CTFC	2.2B	2022	67,9 ±3,9	64,5 ±3,9		82,8 ±3,1	72,3 ±3,3		75,1 ±3,0	52,9 ±2,4		81,4 ±2,9	49,7 ±2,3		72,6 ±2,9	28,7 ±1,3	
		2023	67,9 ±4,1	68,1 ±4,1		82,8 ±3,8	75,4 ±3,5		75,1 ±3,4	53,1 ±2,4		81,4 ±3,7	40,2 ±2,1		72,6 ±3,4	31,8 ±1,5	
Agresta	2.1D	2024	26,1 ±1,2	67,32 ±3,1		109,14 ±9,1	87,7 ±4,26		101,3 ±5,7	91,6 ±3,8		94,9 ±5,4			103,5 ±5,6	91,2 ±5,0	
		2025	57,5 ±5,8	81,9 ±3,6			88,2 ±3,4		79,1 ±4,0	50,7 ±2,3		30,9 ±1,1	75,2 ±2,8		32,0 ±1,4	44,5 ±1,7	
Agresta	2.2E	2024	84,5 ±3,6	38,0 ±1,9		89,5 ±3,6	57,1 ±2,9		87,8 ±3,6	81,7 ±3,3		95,6 ±3,5	91,7 ±3,2		90,1 ±3,5	87,2 ±3,5	
		2025		53,9 ±1,5			62,3 ±1,9			26,6 ±1,5							
Emys	2.1T	2024										87,1 ± 7,1	92,9 ± 7,92		74,0 ± 2,82	65,2 ± 3,14	
		2025								91,5 ± 0,81		88,5 ±0,9	80,25 ±0,8		92,4 ±2,9	67,46 ±2,3	

Tabla 6: Resumen de resultados del seguimiento de humedad ambiental (%; media mensual ± error estándar)

Socio	Sistema	Año	Humedad ambiental (%)														
			Abril			Mayo			Junio			Julio			Agosto		
			T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2
CTFC	2.2A	2023				65,9 ±1,0	68,3 ±0,9		66,3 ±0,8	69,7 ±0,7		63,9 ±0,8	63,1 ±0,8		58,0 ±0,9	54,9 ±0,8	
		2024	62,6 ±0,7	61,8 ±0,6		65,4 ±1,0	65,9 ±0,6		64,2 ±0,6	64,3 ±0,6		66,5 ±1,0	67,4 ±1,0				
		2025	73,3 ±0,8	73,6 ±0,9	76,2 ±1,0	67,8 ±0,8	67,8 ±0,8	69,8 ±0,9	53,1 ±0,9	53,7 ±0,9	53,8 ±1,0	65,5 ±1,16	60,6 ±2,3	61,2 ±2,52			
	2.2B	2022		68,8±1,1			63,9 ±0,9			52,8 ±0,8			34,7 ±0,8			40,3 ±0,4	
		2023		65,1 ±0,7			66,0 ±0,7			64,4 ±0,7			60 ±0,67			62,5 ±0,7	
Emys	2.1T	2024										56,6 ± 2,8	55,7 ±2,1		66,8 ±0,9	70,7 ± 0,8	
		2025								59,3 ± 0,47			65,7 ± 0,7			70,0 ± 0,8	
Agresta	2.2D	2024				52,7 ±2,5	52,5 ±2,5		62,2 ±0,9	62,1 ±0,9		46,7 ±1,0	47,3 ±0,9		47,5 ±1,0	47,3 ±1,02	
		2025	72,4 ±0,8	73,3 ±0,9		69,6 ±0,9	70,6 ±0,9		61,1 ±1,6	54,7 ±1,0			51,0 ±1			44,0 ±0,9	
	2.2E	2024				49,3 ±1,9	50,8 ±1,8		58,2 ±0,7	58,7 ± 0,7		42,9 ±0,6	43,4 ±0,6		40,3 ±0,6	40,9 ± 0,6	
		2025	69,9 ±0,9	69,5 ±0,9		64,5 ±1,0	64,9 ±1,0		49,5 ±1,0	49,2 ±1,0		44,3 ±0,9	44,6 ±1,0		36,4 ±0,8	36,8 ±0,8	
Agroof	2.1Z	2022	70,5 ±0,1	68,9 ±0,1		56,7 ±0,1	61,0 ±0,1		50,9 ±0,1	52,8 ±0,1		38,8 ±0,2	42,0 ±0,1				

Tabla 7: Resumen de resultados del seguimiento de la humedad del suelo (%) (media ± error estándar). Se considera el 15 de mayo como la fecha de referencia para distinguir el período de brotación con el período sin brote en los árboles.

Socio	Parcela	Año	Humedad del suelo					
			Antes del brote arbolado			Después del brote arbolado		
			T0	T1	T2	T0	T1	T2
CTFC	2.2A	2025	10,7±0,4	15,2 ±0,5	14,5 ± 0,5	2,5 ± 0,1	3,6 ± 0,3	3,9 ± 0,3
CTFC	2.2B	2025	23,9 ±0,5	23,28 ±0,4	-	16,9 ± 0,7	16,74 ± 0,7	-
Agresta	2.1D	2024	22,9 ±0,7	22,6 ±0,5		14,2 ±0,4	12,5 ±0,4	
Agresta	2.2E	2024	22,9 ±0,5	23,3 ±0,5		14,2 ±0,4	13,8 ±0,3	
Emys	2.1T	2024	-	-	-	13,0 ±4,1	13,0 ±3,7	-

3.2 Interpretación de los resultados

La influencia de los árboles sobre el microclima en el que se desarrolla el cultivo es, en general, poco evidente, lo que sugiere una interacción aún incipiente entre componentes.

La principal excepción es el sistema 2.2B, que es el que presenta un marco de plantación más estrecho (7 m entre hileras), con árboles plantados en 2011, y que presenta unas condiciones de cultivo sombreadas, con una reducción notable de la luz disponible. Sin embargo, el resto de parámetros no se han visto modificados en exceso, siendo el único efecto perceptible un ligero atemperamiento de las temperaturas extremas, especialmente en verano, mientras que en invierno (cuando los árboles no tienen hojas) el efecto es más suave.

El otro resultado destacable es un ligero aumento de la humedad del suelo en el sistema 2.2A (árboles implantados en 2014), probablemente debido a la reducción de la evapotranspiración gracias a la reducción de la velocidad del viento y al incipiente sombreo. El efecto es más patente a 2,5 m de las hileras que a 4,5 m.

4. Resultados de fisiología y estado vegetativo

4.1. Variables empleadas y resultados obtenidos

El índice SPAD es una medida indirecta y no destructiva del contenido de clorofila en las hojas, obtenida mediante un medidor portátil. Los valores SPAD se relacionan con el estado nutricional de nitrógeno y la actividad fotosintética de la planta. En la mayoría de los cultivos herbáceos, valores adecuados de SPAD sobrepasan los 35. Por su parte, NDVI es un índice de vegetación utilizado para estimar el vigor y la cobertura vegetal, y también ha sido medido con un sensor operado manualmente. Sus valores oscilan entre −1 y +1, donde los valores más altos indican mayor biomasa verde y actividad fotosintética. En cultivos herbáceos bien desarrollados, los valores suelen situarse entre 0,6 y 0,9. Ambos SPAD y NDVI son ampliamente utilizados como una aproximación para calcular la productividad y salud de la vegetación.

En los sistemas demostrativos estudiados donde se midió el SPAD (2.2A, 2.2B) no se observan valores significativamente distintos entre tratamientos control y agroforestal dentro de los periodos antes de la brotación ni después de la brotación del componente leñoso. El SPAD del periodo antes de la brotación (primavera) es significativamente más alto que después (verano), como cabría esperar. (Tabla 8). Los valores del sistema 2.2B (melisa) son significativamente más bajos que el del sistema 2.2A (cereal) - Figura 3A.

Por lo que respecta el NDVI tampoco se observan valores significativamente distintos entre tratamientos antes de la brotación para los sistemas 2.2A ni 2.2B. En el sistema 2.2E los valores de NDVI son inusualmente bajos (Tabla 7, Figura 3B). Después de la brotación del componente forestal no existen diferencias significativas para los sistemas 2.2A, 2.1D, 2.2E y 2.1T. Sin embargo, en el sistema 2.2B hay mayor NDVI la melisa control que en la agroforestal (Tabla 8), lo que sugiere un mejor estado nutricional en condiciones de monocultivo. En los sistemas en los que se ha podido comparar entre el periodo pre y post brotación de los árboles se observan valores significativamente mayores de NDVI del cultivo herbáceo antes de la brotación (primavera) que después (verano), como podría esperarse.

La tabla 8 muestra un resumen de los resultados obtenidos con las mediciones de fisiología y estado vegetativo (SPAD, NDVI), para cada tratamiento experimental.

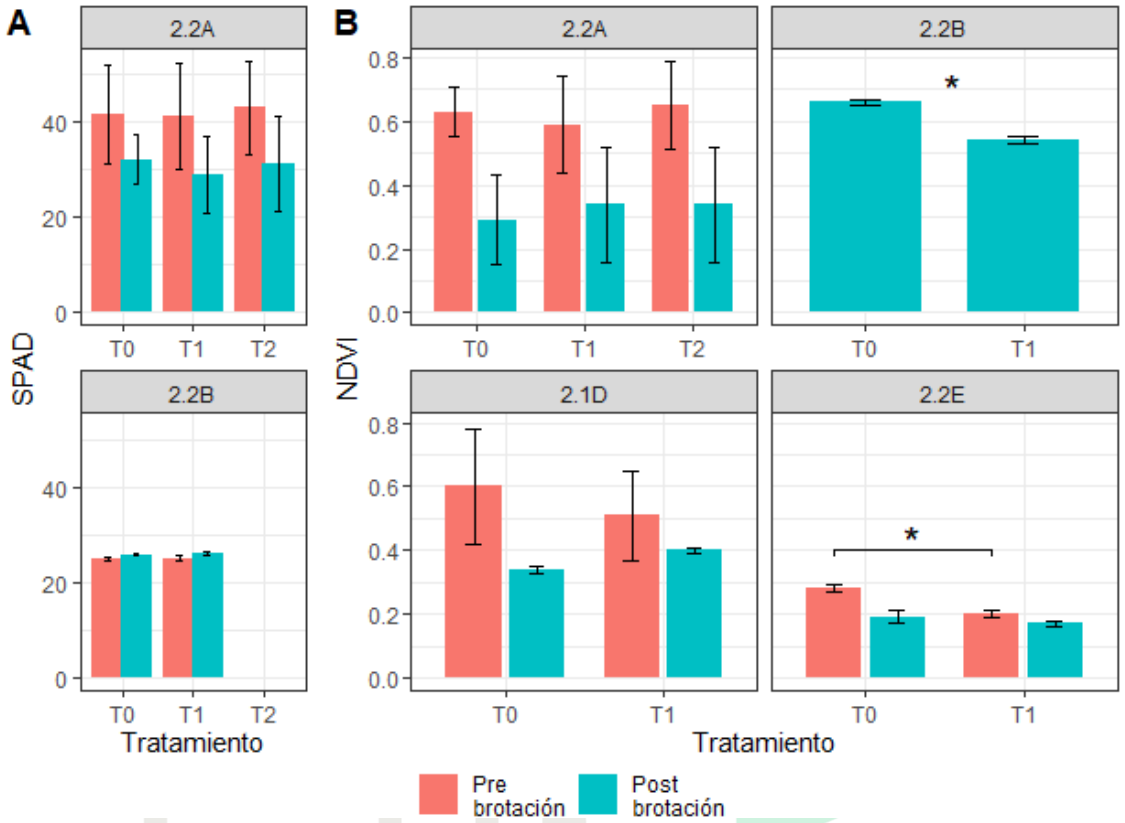


Figura 3: Valores medios de SPAD (A) y NDVI (B) para cada tratamiento (T0, T1, T2) y sistema de estudio, antes y después de la brotación del componente forestal. Las barras indican el error estándar de la serie de datos. Los asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 8: Resumen de resultados del seguimiento de fisiología y estado vegetativo del componente agrícola. Se muestran los valores del índice de clorofila (SPAD) y el índice de vegetación normalizado (NDVI).

Socio	Parcela	Año	SPAD						NDVI					
			Antes del brote arbolado			Después del brote arbolado			Antes del brote arbolado			Después del brote arbolado		
			T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2	T0	T1	T2
CTFC	2.2A	2025	41,6 ±10,4	41,1 ±11,2	42,9 ±9,9	32,0 ±5,2	28,9 ±7,9	31,3 ±10,0	0,63 ±0,08	0,59 ±0,15	0,65 ±0,14	0,29 ±0,14	0,34 ±0,18	0,34 ±0,18
	2.2B	2023	25,0 ±0,5	25,0 ±0,64	-	25,8 ±0,27	26,1 ±0,27	-	-	-	-	0,66 ±0,01	0,54 ±0,01	-
Agresta	2.1D	2024							-	-	-	0,10 ±0,01	0,08 ±0,00	-
		2025							0,60 ±0,18	0,51 ±0,14	-	0,34 ±0,01	0,40 ±0,01	-
Agresta	2.2E	2024							-	-	-	0,29 ±0,01	0,30 ±0,02	-
		2025							0,28 ±0,01	0,20 ±0,01	-	0,19 ±0,02	0,17 ±0,01	
Emys	2.1T	2025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,61 ±0,07	0,63 ±0,14	-

[1] **se considera el 15 de mayo como la fecha de referencia para distinguir el período de brotación con el período sin brote en los árboles.**

4.2 Interpretación de los resultados

Los resultados obtenidos indican que la presencia del componente leñoso no ejerce, por el momento, un efecto relevante sobre las variables fisiológicas evaluadas, lo que sugiere que no existe una limitación detectable del vigor vegetal asociada a los tratamientos con componente arbóreo. En conjunto, los índices SPAD y NDVI se mantienen dentro de rangos habituales para cultivos herbáceos.

En el caso del SPAD, no se observan diferencias significativas entre tratamientos dentro de los periodos de antes y después de la brotación en los dos sistemas monitorizados, lo que indica una estabilidad del estado de las plantas en términos de contenido de clorofila. Sin embargo, se detecta una reducción significativa del SPAD tras la brotación del componente forestal, debido a cambios estacionales en la disponibilidad de recursos (más actividad en primavera que en verano) y también a la evolución fenológica del cultivo, especialmente, en el caso del cereal, que comienza a agostarse cerca del momento de la brotación del arbolado. Asimismo, las diferencias entre sistemas (como 2.2A frente a 2.2B) sugieren cierta heterogeneidad espacial, aunque sin un patrón consistente de impacto negativo del componente forestal.

Respecto al NDVI, medido en 5 sistemas, los resultados antes de la brotación tampoco muestran diferencias claras entre tratamientos, con la única excepción del sistema 2.2E, favorables al tratamiento control. Tras la brotación, el único sistema que muestra diferencias significativas entre tratamientos es el 2.2B, donde se observa un menor NDVI en el tratamiento agroforestal, lo que sugiere una fase de competencia. En general, la comparación entre periodos evidencia una disminución del NDVI tras la brotación del componente forestal, lo que parece estar más relacionado con cambios estacionales (primavera vs. verano) y fenológicos del cultivo, más que con un efecto negativo del componente forestal.

Estos resultados apoyan la idea de que los sistemas evaluados, predominantemente en una fase incipiente de interacción a excepción de 2.2B, mantienen la funcionalidad del cultivo y pueden ser compatibles con su productividad, sin evidenciar impactos adversos del componente forestal sobre la vitalidad del sistema.

5. Diseminación de los resultados D4.1

Los datos recopilados en esta acción, adecuadamente analizados, se emplean y detallan en, al menos, los siguientes productos de comunicación del proyecto:

· Manual C8.1. Manual de diseño y gestión de sistemas agroforestales silvoarables en condiciones mediterráneas.

· Vilarnau, M; Coello, J; Margalef, J; Llena, G; Gallego, M; Vilà, L; Tejedor, R; Mollà, S; Cárdenas, C; Liagre, F. Outcomes of LIFE AgroForAdapt (2021-26): five years promoting agroforestry for climate change adaptation in the Mediterranean. European Agroforestry Conference.

· Material de la salida de campo del Seminario final del proyecto: 10 junio 2026.

· Jornada de campo del 23 de junio de 2026, organizada conjuntamente con el proyecto SUDOE CoopTree.

· Informe Layman

Se prevé además la publicación de dos artículos científicos que serán publicados en revistas de acceso público, y que incorporan parte de los resultados de este entregable en las parcelas de Sagàs y Puig-Reig:

· *Soil Organic Carbon dynamics and cereal performance in a Mediterranean alley-cropping agroforestry system with walnut over 12 years in Northeast Spain* (Coello et al, 2026) – centrado en el sistema 2.2A

· *Mediterranean Alley-Cropping Agroforestry with Walnut and Medicinal and Aromatic Plants: 14 Years Insights in Sagàs, northeastern Spain* (Zwe Nyi et al, 2026) – centrado en el sistema 2.2B