

# TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Máster en Tecnología Agroambiental  
para una Agricultura Sostenible



Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas

---

## **Cubiertas Vegetales y Cambio Climático: Impacto en el Sistema Suelo-Planta de Vides Jóvenes bajo Condiciones Semi-controladas**

---

D. Carlos Joel Fariña Martínez

Tutores

Dra. Chiquinquirá Hontoria Fernández

Dr. Fernando Peregrina Alonso

Julio de 2025







## AGRADECIMIENTOS

La realización de este Trabajo de Fin de Máster no habría sido posible sin el apoyo, la ayuda y la compañía de muchas personas. A todas ellas, gracias de corazón.

Gracias a la Unidad de Edafología por brindarme recursos y un entorno donde siempre me sentí acompañado y motivado. A todo su personal, gracias por vuestra cercanía y por hacer más fácil cada jornada.

Especialmente, quiero agradecer a mis tutores, Kira Hontoria y Fernando Peregrina, por acompañarme con tanto conocimiento y cercanía. Su apoyo ha sido clave, y he aprendido muchísimo a lo largo de este proceso gracias a su experiencia y confianza.

Por supuesto, al profesor Ignacio Mariscal, por su trato amable en todo momento, y al estudiante de doctorado Derlis Enciso, cuya disposición siempre valoraré.

No puedo olvidar a la profesora Ana Moliner, quien fue el puente hacia este máster e hizo que pasara de ser una opción a convertirse en una prioridad. Me habló con entusiasmo del programa y, como si fuera una señal, mencionó un proyecto cuya temática le tenía un cariño especial, tanto que me lancé de lleno... y casi empiezo el TFM antes que las clases.

A mis compañeros del máster, fue un lujo formar parte de un grupo pequeño, pero tan diverso geográficamente. Y a todos/as los/as docentes, mi más sincero reconocimiento. Gracias por vuestras enseñanzas y por los valiosos consejos que me llevo para siempre.

Dejar mi querida Galicia no fue fácil. Pero gracias a todas las personas que he conocido, puedo decir que esta experiencia ha sido increíble e inolvidable. Me voy con la certeza de que elegí bien y que recomendaré el máster TAPAS con todo convencimiento.

A todos/as los/as que he mencionado – y también a quienes no aparecen con nombre propio – me los llevo conmigo como quien guarda un caramelito bien envuelto en el bolsillo: algo pequeño pero especial, que puedes sacar cuando lo necesites, para reconfortarte, recordarte lo vivido... o simplemente para sonreír.

A mi familia, mi base y refugio, gracias por su amor incondicional y por empujarme siempre a seguir adelante; sin vosotros, este logro no tendría el mismo valor.

Finalmente, mi gratitud a un protagonista silencioso, paciente y vital: el suelo.

A ti, que bajo nuestros pies sustentas la vida, que ocultas en tu aparente quietud una complejidad fascinante, gracias. Conocerle ha sido mi mayor descubrimiento hasta la fecha. Has despertado en mí una pasión que no esperaba, pero que ahora siento irrevocable.

Que este trabajo, y los que vengan, sean también un homenaje a tu generosa esencia.

*No se puede amar lo que no se conoce,  
ni defender lo que no se ama.*

*– Leonardo da Vinci –*



## RESUMEN

La viticultura mediterránea afronta importantes retos por la degradación del suelo, derivada de la agricultura tradicional y agravada por el cambio climático, que amenaza la sostenibilidad de los viñedos (*Vitis vinifera* L.) en zonas semiáridas como el centro de España. En las nuevas plantaciones, en ascenso para adaptarse a estas condiciones y demandas del mercado, el suelo es muy vulnerable a la erosión. El uso de cubiertas vegetales (CV) en las calles del viñedo, especialmente las leguminosas, puede ser una estrategia eficaz para reducir la erosión, fijar nitrógeno y mejorar la salud edáfica, favoreciendo así el establecimiento y la resiliencia de vides jóvenes. Sin embargo, su éxito puede estar condicionado por la disponibilidad de agua, la especie de la leguminosa o la variedad de vid.

En este estudio se evaluó el efecto de dos CV leguminosas – *Medicago truncatula* Gaertn. y *Trifolium subterraneum* L. – y un escenario simulado de cambio climático (incremento térmico de +2 °C y menor disponibilidad hídrica) sobre el sistema suelo-planta en vides jóvenes de dos variedades (Airén y Tempranillo) al final del primer ciclo vegetativo. El ensayo se realizó en microcosmos bajo condiciones semi-controladas en invernadero (Madrid, España), con diseño multifactorial que incluyó tres tipos de Cubierta (dos CV y suelo desnudo), dos niveles de Riego (óptimo y reducido en un 15 %) y dos Variedades de vid. Se analizaron los efectos individuales y sus interacciones, valorando el potencial de las CV leguminosas para mejorar la funcionalidad del suelo y favorecer el establecimiento de nuevas plantaciones, identificando las combinaciones más beneficiosas para una viticultura resiliente y adaptada al cambio climático.

Al término del ensayo se analizaron una amplia selección de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, así como el crecimiento y nutrición mineral de la vid. Los resultados mostraron que las respuestas del suelo y la planta dependen principalmente de las interacciones entre factores. Las CV favorecieron la funcionalidad del suelo tras la siega de las mimas, al mejorar la infiltración, aumentar los agregados estables al agua (AEA), el carbono orgánico disuelto (COD) y la actividad microbiana. Destacó *Trifolium* por incrementar la actividad de la  $\beta$ -glucosidasa (Glu), N-acetilglucosaminasa (Nac), Ureasa (Ure) y el carbono de la biomasa microbiana (CBM), mientras que *Medicago* favoreció la respiración y la actividad de la fosfatasa (Fos). Estas respuestas estuvieron moduladas según la disponibilidad de agua y la variedad. El Riego afectó principalmente al crecimiento y nutrición de la vid. Bajo estrés hídrico no hubo diferencias, pero con mayor disponibilidad de agua, las CV redujeron la biomasa aérea y total, así como la extracción de Ca, Mg, B y Zn por la vid, pero incrementaron la de P y favorecieron el equilibrio vegetativo (biomasa raíz/biomasa aérea), beneficioso para el establecimiento de vides jóvenes, aunque con diferencias según la Variedad. Combinaciones prometedoras fueron Tempranillo-*Trifolium* y Airén-*Medicago*, aunque sus efectos variaron según los parámetros. En general, las CV leguminosas mejoraron la salud del suelo y, pueden ayudar a regular el vigor de la vid con riego óptimo, sin efecto negativos bajo estrés hídrico en comparación con el suelo desnudo, consolidando su valor como herramienta sostenible para aumentar la resiliencia de nuevas plantaciones frente el cambio climático. Finalmente, será necesario validar estos resultados mediante estudios de campo, más prolongados y en diversas condiciones edafoclimáticas.

**Palabras clave:** clima mediterráneo; cubiertas vegetales leguminosas; disponibilidad hídrica; Variedades Airén y Tempranillo; vigor y nutrición mineral vid.

## ABSTRACT

Viticulture in the Mediterranean region faces significant challenges due to soil degradation caused by traditional agriculture and worsened by climate change, threatening the sustainability of vineyards (*Vitis vinifera* L.) in semi-arid areas such as central Spain. In new plantings, which are increasing to adapt to these conditions and market demands, the soil is highly vulnerable to erosion. The use of cover crops (CC), especially legumes, in vineyard inter-rows can be an effective strategy to reduce erosion, fix nitrogen, and improve soil health, thereby promoting the establishment and resilience of young vines. However, their success may depend on water availability, the legume species, or the grapevine variety.

This study evaluated the effect of two leguminous CC – *Medicago truncatula* Gaertn. and *Trifolium subterraneum* L. – and a simulated climate change scenario (a +2 °C temperature increase and reduced water availability) on the soil-plant system of young vines of two varieties (Airén and Tempranillo) at the end of their first growing cycle. The experiment was conducted in microcosms under semi-controlled greenhouse conditions (Madrid, Spain), using a multifactorial design including three cover types (two CC and bare soil), two irrigation levels (optimal and 15 % reduced), and two grapevine varieties. Individual effects and interactions were analyzed to assess the potential of leguminous CC to improve soil functionality and support the establishment of new plantations, identifying the most beneficial combinations for resilient, climate-adapted viticulture.

At the end of the trial, a wide range of physical, chemical, and biological soil parameters were analyzed, as well as vine growth and mineral nutrition. Results showed that soil and plant responses mainly depended on factor interactions. CC favored soil functionality after mowing by improving infiltration, increasing water-stable aggregates (WSA), dissolved organic carbon (DOC), and microbial activity. *Trifolium* notably enhanced  $\beta$ -glucosidase (GLU), N-acetylglucosaminidase (NAG), urease (URE), and microbial biomass carbon (MBC), whereas *Medicago* promoted respiration and phosphatase (PHO) activity. These responses were modulated by water availability and variety. Irrigation mainly affected vine growth and nutrition. Under water stress, no differences were observed, but with higher water availability, CC reduced aboveground and total biomass and the uptake of Ca, Mg, B, and Zn by the vine, while increasing P uptake and promoting a favorable vegetative balance (root biomass/aboveground biomass) beneficial for young vine establishment, with differences depending on variety. Promising combinations were Tempranillo-*Trifolium* and Airén-*Medicago*, although effects varied by parameter. Overall, leguminous CC improved soil health and can help regulate vine vigor under optimal irrigation, without negative effects under water stress compared to bare soil, consolidating their value as a sustainable tool to increase the resilience of new plantations against climate change. Finally, it will be necessary to validate these results through extended field studies conducted under diverse edaphoclimatic conditions.

**Keywords:** *mediterranean climate; leguminous cover crops; water availability; Airén and Tempranillo varieties; vine vigor and mineral nutrition.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. La vid y la viticultura en España.....	1
1.1.1. Antecedentes del cultivo.....	1
1.1.2. Descripción botánica y variedades emblemáticas.....	1
1.1.3. Relevancia del sector vitivinícola en España .....	1
1.2. Agricultura intensiva y degradación del suelo .....	2
1.3. Cambio climático y su impacto en la viticultura mediterránea .....	3
1.4. Agricultura de conservación .....	4
1.5. Cubiertas vegetales.....	4
1.6. Justificación del estudio .....	6
<b>2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....</b>	<b>7</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>8</b>
3.1. Localización del ensayo.....	8
3.2. Diseño experimental .....	8
3.3. Establecimiento y desarrollo del experimento .....	10
3.3.1. Gestión climática de los módulos .....	10
3.3.2. Preparación de los microcosmos.....	11
3.3.3. Plantación de las vides .....	12
3.3.4. Siembra y manejo de la cubierta vegetal .....	12
3.3.5. Riego utilizado.....	13
3.4. Finalización del ensayo y obtención de muestras de suelo y planta .....	14
3.5. Determinaciones en el suelo .....	14
3.5.1. Caracterización física .....	14
3.5.2. Caracterización química.....	15
3.5.3. Caracterización biológica .....	16
3.6. Determinaciones en la planta.....	17
3.6.1. Crecimiento y desarrollo.....	17
3.6.2. Estado nutricional.....	17
3.7. Análisis estadístico .....	17
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>18</b>
4.1. Efectos sobre el suelo.....	18
4.1.1. Propiedades físicas.....	18
4.1.2. Propiedades químicas.....	20
4.1.3. Propiedades biológicas.....	24
4.2. Efectos sobre la planta.....	28
4.2.1. Crecimiento y desarrollo.....	28
4.2.2. Estado nutricional.....	31
4.3. Resumen de los resultados .....	35
<b>5. CONTRIBUCIÓN A OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE .....</b>	<b>37</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>38</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> (A y B) Ubicación geográfica del ensayo y (C) vista aérea del invernadero. ....	8
<b>Figura 2.</b> Distribución de los microcosmos en el módulo de temperatura elevada. ....	9
<b>Figura 3.</b> Vista aérea de la parcela de donde se obtuvo el suelo para el ensayo. ....	11
<b>Figura 4.</b> Gráficos de interacción en parámetros físicos según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ).....	19
<b>Figura 5.</b> Gráficos de interacción en parámetros químicos según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ).....	21
<b>Figura 6.</b> Gráficos de interacción en nutrientes del suelo según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ).....	22
<b>Figura 7.</b> Gráficos de interacción en parámetros biológicos es según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ) .....	26
<b>Figura 8.</b> Gráficos de interacción en crecimiento de la vid según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ).....	30
<b>Figura 9.</b> Gráficos de interacción en estado nutricional de la vid según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ) .....	33
<b>Figura 10.</b> Contribución (en %) del ensayo a las metas específicas de los ODS. ....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Factores de estudio y niveles del diseño experimental .....	9
<b>Tabla 2.</b> Valores medios mensuales de las variables meteorológicas durante el ensayo .....	10
<b>Tabla 3.</b> Caracterización fisicoquímica del sustrato utilizado en el ensayo .....	11
<b>Tabla 4.</b> Propiedades físicas de suelo según los factores y sus niveles de estudio .....	19
<b>Tabla 5.</b> Propiedades químicas de suelo según los factores y sus niveles de estudio .....	21
<b>Tabla 6.</b> Concentraciones de nutrientes en el suelo según los factores y sus niveles de estudio.....	22
<b>Tabla 7.</b> Propiedades biológicas de suelo según los factores y sus niveles de estudio .....	25
<b>Tabla 8.</b> Biomasa de las fracciones de las vid según los factores y sus niveles de estudio .....	29
<b>Tabla 9.</b> Extracción de nutrientes en biomasa foliar según los factores y sus niveles de estudio.....	32

## ÍNDICE DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

CBM	Carbono de la Biomasa Microbiana
CE	Conductividad Eléctrica
COT	Carbono Orgánico Total
COD	Carbono Orgánico Disuelto
CV	Cubiertas Vegetales
Fos	Actividad enzimática Fosfatasa
Glu	Actividad enzimática Glucosidasa
MO	Materia Orgánica
Nac	Actividad enzimática N-Acetilglucosamina
NPM	Nitrógeno Potencialmente Mineralizable
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PNF	p(4)-Nitrofenol
RB	Respiración Basal
RIS	Respiración Inducida por Sustrato
Ure	Actividad enzimática Ureasa

---

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. La vid y la viticultura en España

### 1.1.1. Antecedentes del cultivo

El origen de la vid se remonta al Paleoceno y Eoceno, con hallazgos fósiles que atestiguan su antigüedad (Winkler, 1974). Durante el Mioceno, el género *Vitis* comenzó a diversificarse en Europa, y la *Vitis vinifera sylvestris* se consolidó al final del Plioceno en la cuenca del Mediterráneo y el sur del mar Caspio. Esta subespecie, tras varios cruces con otras especies del mar Negro, el Mediterráneo occidental y las *Vitis* del norte de Europa, dieron origen a las variedades actuales (Fernández & Hidalgo, 2019).

El cultivo planificado de la vid se remonta probablemente al Neolítico (7000 – 5000 a.C.) en la región comprendida entre el mar Negro y el Caspio, con evidencias arqueológicas de producción de vino datadas en el 5400 a.C. en Irán (Fernández & Hidalgo, 2019). En Europa, se han hallado semillas de vides silvestres recolectadas entre 7500 y 2500 a.C., y hacia el 4000–2000 a.C. su cultivo se extendió hacia Asia Menor (Álvarez & Villarías, 2012).

Civilizaciones como la egipcia, griega y romana impulsaron la viticultura, y fueron los fenicios quienes introdujeron la vid en la península ibérica hacia el 1100 a.C. (MAPA, 2024). Con el tiempo, la selección de los cultivares más adaptados dio lugar al predominio de variedades del subgénero *Euvitis*, destacando *Vitis vinifera* L. como base de la viticultura moderna (Tischelmayer, 2024).

### 1.1.2. Descripción botánica y variedades emblemáticas

*Vitis vinifera* L. es una planta leñosa trepadora, caducifolia, perteneciente a la familia Vitaceae, cultivada por sus frutos comestibles y vinificables (Sánchez-Monge, 2001). Con una vida productiva que puede prolongarse durante décadas, esta especie atraviesa anualmente diversas fases fenológicas: brotación, floración, desarrollo del fruto, maduración, cosecha y dormancia invernal (Álvarez & Villarías, 2012).

En el mundo existen numerosas variedades de vid, con diferencias marcadas en su morfología, así como el tamaño, forma y aroma de sus frutos. En el caso de España, destacan dos variedades emblemáticas: Tempranillo, la cepa tinta más representativa del país, originaria de La Rioja; y Airén, también conocida como "la manchega", considerada la variedad blanca más antigua y extendida, con cerca de un tercio de la superficie nacional, siendo autóctona de Castilla-La Mancha (Álvarez & Villarías, 2012).

### 1.1.3. Relevancia del sector vitivinícola en España

La viticultura es una actividad profundamente arraigada en la cultura y economía españolas. Este cultivo no solo permite la elaboración de vino de calidad, sino que también forma parte del paisaje, la identidad local y el desarrollo socioeconómico del país.

España lidera la superficie mundial de viñedo, con unos 0,93 millones de hectáreas, lo que representa el 13 % del total global. A pesar de los retos que plantea el cambio climático, el cultivo en secano sigue predominando frente al regadío (Afi, 2023).

Entre 2017 y 2021, la producción media fue de 5,9 millones de toneladas, alcanzando en 2022 casi 37 millones de hectolitros de vino, lo que posicionó a España como el tercer productor mundial, con el 14 % del total global (OIV, 2023).

El sector genera más de 20.000 millones de euros en valor añadido bruto (2 % del PIB) y emplea a más de 360.000 personas, lo que equivale al 2 % del empleo nacional. Está presente en todas las comunidades autónomas y en más del 40 % de los municipios. Además, cuenta con más de 100 Denominaciones de Origen y 40 Indicaciones Geográficas Protegidas, que garantizan la calidad y autenticidad de sus productos (Afi, 2023).

En el ámbito internacional, España se posiciona entre los principales exportadores, con más de 2 millones de toneladas vendidas en 2022, generando unos 3.500 millones de euros, lo que representa el 6 % de las exportaciones agroalimentarias, sólo por detrás de la carne de porcino, los cítricos y el aceite de oliva (Afi, 2023).

## 1.2. Agricultura intensiva y degradación del suelo

Desde la Revolución Verde, la intensificación agrícola ha permitido aumentar notablemente los rendimientos en diversos cultivos, incluido el viñedo, mediante el uso intensivo de insumos de síntesis química. Aunque estas prácticas ofrecen ventajas a corto plazo, también han generado impactos negativos sobre los agroecosistemas, como la contaminación y la pérdida de biodiversidad, comprometiendo la calidad y sostenibilidad del suelo a largo plazo (Román-Vázquez et al., 2023; Souza et al., 2021).

En el caso de la viticultura, el laboreo frecuente – habitual en zonas mediterráneas – y el uso de agroquímicos, acompañados de maquinaria pesada, son prácticas comunes para controlar la vegetación espontánea y reducir la competencia por recursos. No obstante, estas intervenciones alteran la estructura del suelo, reducen su capacidad de infiltración y retención de agua, aceleran la pérdida de materia orgánica (MO) – con la consiguiente emisión de CO<sub>2</sub> – y de la capa superficial, además de dañar la biota edáfica y agotar nutrientes esenciales (Novara et al., 2012). Todo ello provoca una pérdida progresiva de fertilidad y una mayor vulnerabilidad del suelo a la erosión (Blavet et al., 2009; Hartmann & Six, 2023; Tscharrntke et al., 2012).

En España, esta situación es especialmente grave: el 75 % del territorio presenta erosión moderada o alta, concentrada en la región mediterránea (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008). Los viñedos de estas zonas, a menudo situados en laderas con fuerte pendiente, son especialmente vulnerables, con tasas de erosión muy por encima de los umbrales tolerables (Ruiz-Colmenero et al., 2013). Esta situación se agrava en plantaciones jóvenes, donde la escasa cobertura vegetal y la intensa perturbación inicial del suelo previa a la plantación aumentan aún más el riesgo (Ruiz-Colmenero et al., 2011).

La pérdida de suelo se acentúa con la desertificación, una de las amenazas ambientales más graves a escala global, impulsada por la actividad humana y el cambio climático. En las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, cerca del 40 % de la superficie terrestre está afectada por esta problemática (Requier-Desjardins & Caron, 2005). Sin embargo, en Europa meridional esta cifra aumenta hasta el 67 %, siendo la pérdida de materia orgánica uno de los principales indicadores de este deterioro (European Court of Auditors, 2018).

---

Se estima que un tercio de los suelos del planeta ya está degradado, y que, sin medidas eficaces de mitigación, más del 90 % de los suelos agrícolas podrían estar afectados en 2050, comprometiendo la sostenibilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria mundial (FAO & ITPS, 2016).

### **1.3. Cambio climático y su impacto en la viticultura mediterránea**

El cambio climático, manifestado a través de fenómenos climáticos extremos, representa un desafío sin precedentes para la viticultura en la región mediterránea, al intensificar procesos como la degradación del suelo y la desertificación (Právělie et al., 2021; Shukla et al., 2019).

El aumento de la temperatura media global, estimado en 1,5 °C (Jacob et al., 2018), podría superar los umbrales de tolerancia de muchas variedades de vid mediterráneas, comprometiendo su productividad (Jones et al., 2005; Santos et al., 2020). Este calentamiento, junto con sequías e inundaciones, intensifica el estrés hídrico – debido a las menor precipitación y mayor evapotranspiración – y adelanta las fases fenológicas, afectando la calidad de la uva (Droulia & Charalampopoulos, 2022; Sastre et al., 2020).

El carbono orgánico del suelo desempeña un papel clave en la mitigación de los efectos del cambio climático. Sin embargo, el aumento de temperaturas acelera la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, como consecuencia de una mayor oxidación de la materia orgánica, lo que intensifica el calentamiento global y disminuye la fertilidad edáfica (García-Palacios & Chen, 2022; Knorr et al., 2005).

Esta problemática es especialmente grave en los suelos mediterráneos, a menudo empobrecidos por prácticas agrícolas tradicionales, con contenidos de MO inferiores al 1 % (Calvo de Anta et al., 2020; Peregrina et al., . En el caso de los viñedos jóvenes, la intensa preparación del terreno previa a la plantación contribuye aún más al deterioro y empobrecimiento del suelo, dificultando su establecimiento y desarrollo.

Además, estas alteraciones ambientales pueden causar el desequilibrio de las comunidades microbianas del suelo (Bahram et al., 2018), esenciales para su salud, viéndose afectadas también la calidad de la uva y del vino (Liu et al., 2020). Las enzimas del suelo, también sensibles a estas perturbaciones, actúan como indicadores tempranos del estado microbiológico del suelo en condiciones de cambio climático (Gong et al., 2015).

En un contexto de creciente demanda alimentaria – con estimaciones que apuntan a un aumento necesario de la producción global del 70 al 100 % para 2050 (Morugán-Coronado et al., 2022) – la gestión sostenible del suelo se presenta como una estrategia clave no solo para sostener la productividad, sino también para generar beneficios ambientales y sociales. Prácticas como el incremento de la MO y el secuestro de carbono contribuyen a mitigar el cambio climático, al tiempo que mejoran la calidad del suelo, estimulan la actividad biológica y favorecen una mayor estabilidad en los rendimientos (Morlat & Chaussod, 2008; Ruiz-Colmenero et al., 2013; Thiele-Bruhn et al., 2012).

---

## 1.4. Agricultura de conservación

La Agricultura de Conservación se presenta como una estrategia fundamental para enfrentar la desertificación y promover la sostenibilidad agrícola. Basada en tres principios (mínima perturbación del suelo, máxima cobertura vegetal y diversificación de cultivos), esta alternativa mejora la salud del suelo, la biodiversidad y la resiliencia de los agroecosistemas sin comprometer la productividad (FAO, 2022).

La implementación de estas prácticas ha demostrado reducir significativamente la erosión (hasta un 90 %) e incrementar la MO en un 45 % en pocos años (Márquez-García et al., 2013), favoreciendo la actividad microbiana, la estructura edáfica y la calidad del agua (Román-Vázquez et al., 2023; Ruiz-Colmenero et al., 2013). Asimismo, ayuda a mitigar el cambio climático al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Kaye & Quemada, 2017) y potenciar el secuestro de carbono en el suelo (Lal, 2021).

Desde el punto de vista económico, esta estrategia resulta beneficiosa para los agricultores, ya que contribuye a una mayor estabilidad de la producción frente a condiciones adversas y permite reducir los costes mediante un menor uso de agua, insumos químicos y combustibles fósiles, al tiempo que mejora la eficiencia del sistema agrícola (Holland, 2004; Ryan et al., 2008).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y otras instituciones internacionales subrayan la necesidad de adoptar estas estrategias para alcanzar la neutralidad en la degradación del suelo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible hacia 2030, en línea con políticas como el Pacto Verde Europeo o la Estrategia de Biodiversidad de la UE (IPBES, 2018; Román-Vázquez et al., 2023).

En definitiva, conservar el suelo mediante prácticas como las anteriores resulta más eficaz y menos costoso que su restauración posterior, y es clave para garantizar la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria de las generaciones futuras.

## 1.5. Cubiertas vegetales

Las cubiertas vegetales (CV) consisten en la plantación de franjas de vegetación entre las hileras del cultivo principal, generalmente leñosos, como la vid. Su adopción, en crecimiento en países como España (Abad et al., 2023), se alinea con los Ecorregímenes de la Política Agraria Común (FEGA, 2024) y forma parte de la Agricultura de Conservación.

En este tipo de cultivo, el establecimiento de CV ha demostrado ser una estrategia eficaz, con beneficios agronómicos y ambientales (FAO, 2016). Contribuyen a la mejora del suelo al reducir la erosión, aumentar la MO y favorecer el secuestro de carbono, al tiempo que estimulan la microbiota beneficiosa (Gobbi et al., 2022; Ramírez & Lasheras, 2016), promueven el reciclaje de nutrientes (Belmonte et al., 2018) y fortalecen los servicios ecosistémicos, mejorando la sostenibilidad del viñedo (Chourasiya et al., 2021; Lampkin, 1998; Trouvelot et al., 2015).

---

Además, incrementan la biodiversidad del suelo y del agroecosistema, disminuyendo la incidencia de plagas (Sáenz-Romo et al., 2019) y, bajo una gestión adecuada de la competencia hídrica, pueden mejorar tanto el rendimiento a largo plazo como la calidad de la uva (Chaves et al., 2010; Ibáñez et al., 2013; Pérez-Álvarez et al., 2015).

En este contexto, y entre las diversas especies empleadas como cubierta, las leguminosas son clave por su doble función agroecológica: fijan el nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* y, además, al asociarse con hongos micorrícicos arbusculares, mejoran la absorción de agua y nutrientes e incluso potencian la propia fijación del N (Gorgia & Tsikou, 2025; Javaid, 2010). Esto favorece el desarrollo de la vid, refuerza su resiliencia frente al estrés climático y reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos, contribuyendo así a la sostenibilidad y fertilidad del sistema (D. Liu et al., 2020; Sharma et al., 2020).

Sin embargo, la eficacia de las cubiertas vegetales no depende solo de la especie utilizada, sino también del manejo y del tipo de implantación. Según las condiciones del entorno y los objetivos del viñedo, pueden ser: permanentes o temporales, ocupar total o parcialmente el suelo, y establecerse mediante siembra o como flora espontánea (Ibáñez et al., 2013; Ramírez & Lasheras, 2016). La gestión del riego y la adaptación a las condiciones edafoclimáticas también son determinantes (Novara et al., 2011).

En los viñedos, sobre todo de regiones más cálidas, las cubiertas vegetales pueden competir por agua y nutrientes si no se gestionan adecuadamente (Fleishman et al., 2023; Ruiz-Colmenero et al., 2011). Esto puede afectar al desarrollo vegetativo (vigor) y rendimiento (Marques et al., 2015) y, por tanto, crear reticencia de los agricultores a utilizarlas. Además, su interacción con el cambio climático podría modificar la composición del mosto, generando incertidumbres sobre la calidad del vino (Mocali et al., 2020; H. Romero et al., 2021). A esto se suman barreras económicas y culturales, así como los costes iniciales de implementación, que pueden dificultar su adopción (Alaoui et al., 2022).

A pesar de dichos inconvenientes, las cubiertas vegetales constituyen una herramienta fundamental para la adaptación y mitigación al cambio climático, promoviendo una viticultura, diversificada y resiliente, con beneficios ambientales, económicos y sociales a largo plazo (Daryanto et al., 2018; Kaye & Quemada, 2017; D. Liu et al., 2020; Snapp et al., 2005).

## 1.6. Justificación del estudio

El cambio climático está afectando seriamente la sostenibilidad de la viticultura mediterránea, especialmente en regiones semiáridas como el centro de España. El aumento de temperaturas, la irregularidad de las precipitaciones, junto con la degradación del suelo por la agricultura tradicional, están reduciendo la disponibilidad hídrica y afectando la productividad y calidad del vino, adelantando la maduración de la uva y alterando su composición: más azúcar, mayor grado alcohólico y menor acidez (Droulia & Charalampopoulos, 2022; Sastre et al., 2020). Esto contrasta con la demanda creciente de vinos más saludables, con menor azúcar, contenido alcohólico y mayor riqueza fenólica (P. Romero et al., 2022)

En este contexto, el riego, se presenta como una herramienta clave para mitigar los efectos del estrés hídrico y térmico, ayudando a mantener el rendimiento y mejorar ciertos parámetros de calidad de la uva (Pérez-Álvarez et al., 2021; Sastre et al., 2020). No obstante, su uso debe ser eficiente y sostenible ante la creciente escasez de agua.

Paralelamente, la reconversión y expansión del viñedo hacia zonas más frescas del norte y centro de Europa está intensificando la competencia internacional (Sastre et al., 2020), lo que subraya la necesidad urgente de adoptar prácticas agroecológicas adaptativas – cada vez más demandadas (P. Romero et al., 2022) – en las regiones tradicionalmente productoras como el área mediterránea (Pomarici, 2016; Santillán et al., 2019).

Entre estas prácticas, las cubiertas vegetales (CV) destacan por su capacidad para mejorar la salud del suelo, incrementar la materia orgánica, promover la biodiversidad edáfica y contribuir al secuestro de carbono, motivo principal de su bonificación por la Política Agraria Común. Su integración resulta especialmente relevante en nuevas plantaciones que, además de ser más vulnerables a la erosión y a la competencia por recursos hídricos y nutrientes (Rodrigo-Comino et al., 2018), se están consolidando como una opción estratégica para mantener o mejorar el potencial enológico del viñedo, dada su mayor dotación fenólica (Sanmartin et al., 2017).

Aunque el uso combinado de CV y riego representa una estrategia aún incipiente, puede desempeñar un papel clave desde las etapas iniciales del cultivo, a fin de evitar posibles efectos adversos sobre el desarrollo de la vid (Abad et al., 2023). Asimismo, la elección de variedades de maduración tardía, más adaptadas al estrés térmico e hídrico, junto con portainjertos vigorosos, también resulta estratégica en un contexto de cambio climático (Santillán et al., 2019; Sastre et al., 2020). No obstante, todas estas prácticas aún se aplican de forma aislada y requieren un enfoque más integrado desde las primeras etapas del cultivo.

Ante esta complejidad, se vuelve fundamental entender cómo interactúan distintos factores – como el tipo de CV leguminosa, la disponibilidad de agua y la variedad de vid – en contextos mediterráneos. Por ello, el presente ensayo, desarrollado en condiciones semi-controladas (invernadero) con suelo previamente labrado, similar al de nuevas plantaciones, permite anticipar y mejorar la respuesta de vides jóvenes ante escenarios climáticos futuros (Morales et al., 2016). Esto sienta las bases para ensayos en campo que orienten hacia una gestión más sostenible y resiliente del viñedo.

---

---

## 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo general del presente estudio es evaluar el efecto combinado de las cubiertas vegetales (CV) leguminosas y el cambio climático simulado (incremento de temperatura y estrés hídrico) sobre el sistema suelo-planta al final del primer ciclo vegetativo (primera savia) en vides jóvenes de dos variedades (una tinta y otra blanca) en condiciones semi-controladas.

Para alcanzarlo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el efecto individual y conjunto de los factores Cubierta (*Medicago truncatula* L. y *Trifolium subterraneum* Gaertn. y suelo desnudo), Riego (óptimo y reducido al 15 %) y Variedad (Airén y Tempranillo) sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como sobre el crecimiento y estado nutricional de las vides jóvenes bajo incremento térmico.
2. Evaluar el potencial de las CV leguminosas, bajo distintos regímenes de riego y en condiciones de incremento térmico, para mejorar la funcionalidad del suelo y contribuir a un mejor establecimiento y nutrición de las vides jóvenes.
3. Identificar las combinaciones más favorables de Variedad y Cubierta Vegetal para reforzar la adaptación y resiliencia de las vides frente al cambio climático, equilibrando protección del suelo para reducir la erosión, y estado nutricional de la vid.

Las hipótesis planteadas son las siguientes:

- Las CV leguminosas mejoraran la salud del suelo, lo que favorecerá el crecimiento, desarrollo y la nutrición de la vid.
- El efecto beneficioso de las CV leguminosas estará condicionado por la disponibilidad de agua y la variedad de vid.
- El efecto negativo de las CV sobre la vid en comparación con el suelo desnudo será más acusado en condiciones de estrés hídrico que en disponibilidad óptima.

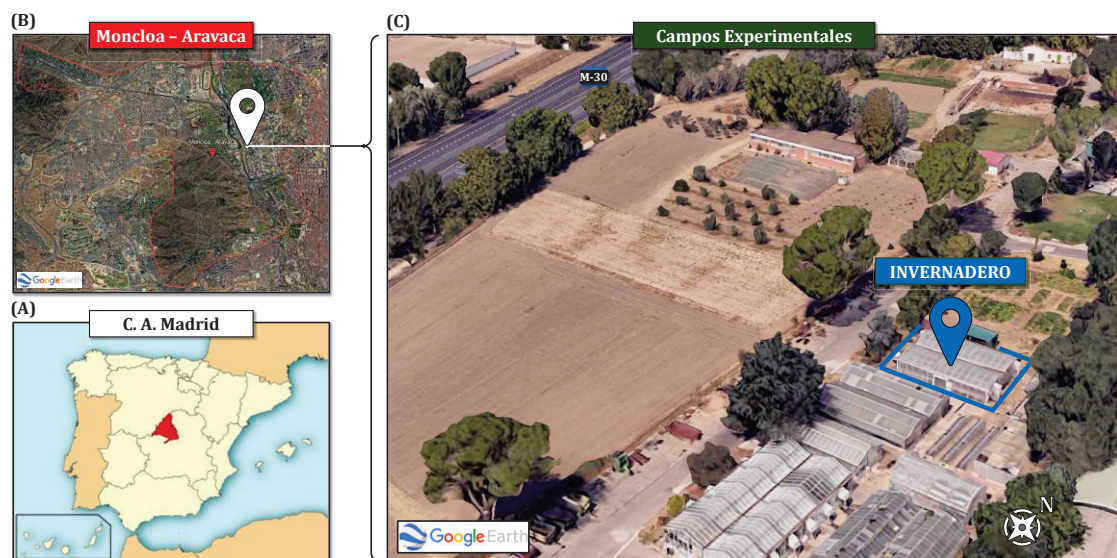
### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del ensayo

El experimento se llevó a cabo en condiciones semi-controladas dentro de un invernadero modular (Figura 1C) localizado en los campos experimentales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Estas instalaciones se ubican en el distrito de Moncloa-Aravaca, en Madrid (España), a una altitud de 600 metros sobre el nivel del mar. Su localización geográfica se muestra en las Figura 1A y 1B, y sus coordenadas son 40°26'49"N, 3°44'19"W.

Según la clasificación climática de Köppen, la zona presenta un clima mediterráneo típico (Csa), caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos suaves y lluviosos.



**Figura 1.** (A y B) Ubicación geográfica del ensayo y (C) vista aérea del invernadero.

#### 3.2. Diseño experimental

El presente ensayo, desarrollado de febrero a septiembre de 2024, se enmarca en un experimento más amplio, cuyo diseño original contempló la combinación de cuatro factores de estudio, con sus correspondientes niveles (Tabla 1):

- 1) Temperatura del aire: Actual (ambiente) o Elevada (incremento de +2 °C).
- 2) Cubierta: Suelo desnudo, Trifolium o Medicago.
- 3) Disponibilidad de agua: Riego óptimo o Reducido (reducción del 15 %).
- 4) Variedad de vid: Tempranillo o Airén.

Para simular los dos niveles del primer factor experimental, se emplearon dos módulos o cabinas independientes con control climático diferenciado (véase la subsubsección 3.3.1).

**Tabla 1.** Factores de estudio y niveles del diseño experimental.

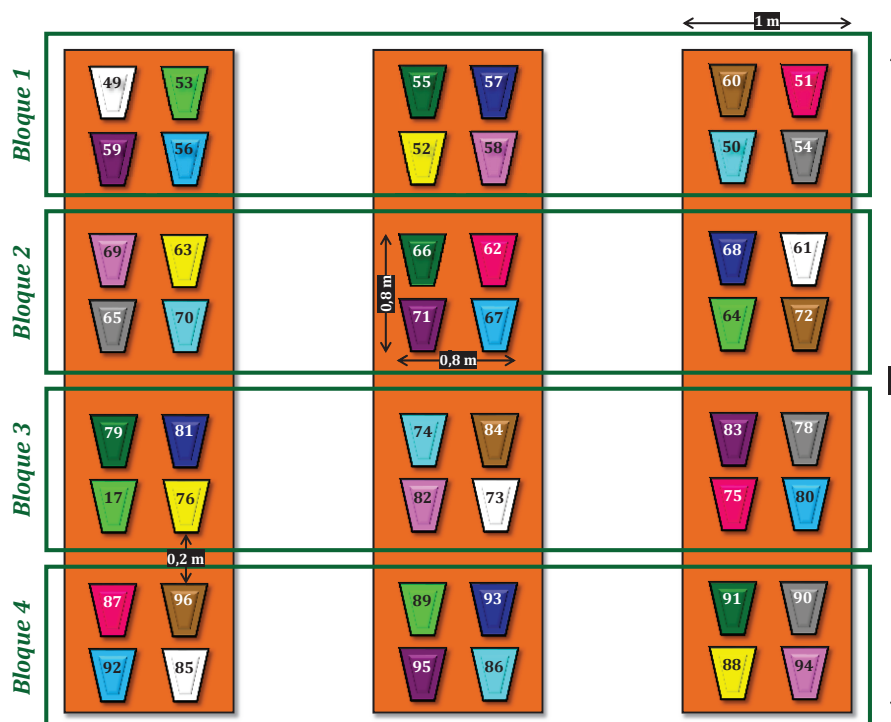
Factor de Estudio		Nivel		
1	Temperatura del aire (T)	Actual	Elevada	—
3	Cubierta (C)	Suelo desnudo	Trifolium	Medicago
4	Disponibilidad de agua (R)	Riego óptimo	Riego reducido	—
4	Variedad de vid (V)	Tempranillo	Airén	—

Las cubiertas vegetales se seleccionaron por su rusticidad y capacidad de adaptación a condiciones de escasez hídrica, con el objetivo de limitar su competencia con la vid. Por su parte, las variedades Tempranillo (tinta) y Airén (blanca) fueron elegidas por su elevada representatividad en el viñedo nacional. Para más detalles, véase la subsección 3.3.

La combinación de los niveles de dichos factores experimentales dio lugar a 12 tratamientos distintos, cada uno de ellos representado por un microcosmos o unidad experimental independiente que albergaba el suelo y una planta de vid en su primer año de establecimiento.

Para asegurar la robustez de los resultados, se establecieron cuatro bloques. Cada tratamiento se replicó cuatro veces dentro de cada uno de ellos siguiendo un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA). Esto permitió controlar la heterogeneidad debida al efecto de los posibles gradientes ambientales (orientación, iluminación, temperatura, etc.). Este diseño generó un total de 48 microcosmos por módulo (12 tratamientos x 4 repeticiones por bloque) y, por tanto, 96 en total.

## MÓDULO CON INCREMENTO TÉRMICO

**Figura 2.** Distribución de los microcosmos en el módulo de temperatura elevada.

Debido a una incidencia técnica en el sistema de refrigeración durante el desarrollo del experimento, fue necesario descartar todas las unidades asociadas al módulo de la condición térmica actual. El presente trabajo aborda los efectos al término del experimento y, en consecuencia, se realizó considerando los factores de Cubierta, Disponibilidad de agua y Variedad de vid, tomando únicamente los microcosmos correspondientes a la condición de temperatura elevada (Figura 2. Distribución de los microcosmos en el módulo de temperatura elevada.), de la cual también se perdió una planta.

### 3.3. Establecimiento y desarrollo del experimento

#### 3.3.1. Gestión climática de los módulos

Ambos módulos del invernadero se configuraron con un régimen térmico distinto, en función del factor de estudio Temperatura del aire: el nivel Actual se programó para mantener las condiciones térmicas esperables según los datos medios de una estación meteorológica representativa de las condiciones climáticas del centro peninsular; el nivel Elevado se programó para presentar un incremento medio de +2 °C sobre el nivel anterior, simulando un escenario de cambio climático, basándose en proyecciones climáticas para la región mediterránea (Jacob et al., 2018).

Se tomaron como referencia los registros históricos de la serie normalizada 1991–2020 de la estación meteorológica de la finca experimental "El Encín" (IMIDRA), situada en Alcalá de Henares, para simular un clima mediterráneo típico del centro peninsular (Csa, según Köppen & Geiger, 1936). Esta finca, de especial relevancia, alberga además la segunda Colección de Variedades de Vides más importante de Europa.

La simulación se llevó a cabo mediante sensores y un sistema automatizado de control (ventanas cenitales, luz artificial, calefacción y refrigeración), que registraba de forma continua temperatura, humedad relativa y luminiscencia, en el interior de cada módulo, mediante un *datalogger*.

No obstante, la precisión de la recreación exacta de las condiciones previstas se vio limitada por las características del invernadero y su dependencia del clima exterior. En la Tabla 2 se recogen las condiciones reales alcanzadas en el módulo de Temperatura elevada durante el desarrollo del experimento, en el cual se logró un incremento medio real de 2,1 °C (20,4 °C frente a los 18,3 °C de la serie climática de referencia).

**Tabla 2.** Valores medios mensuales registrados durante el ensayo para las distintas variables meteorológicas en el módulo de temperatura elevada.

Mes	T (°C)	HR (%)	RPA (MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )
Marzo	15,4	61,4	31,1
Abril	17,9	57,2	44,9
Mayo	19,5	57,9	31,0
Junio	23,4	60,3	28,0
Julio	23,4	62,1	62,4
Agosto	23,1	65,5	56,4
Septiembre	20,0	66,4	44,4

T: temperatura; HR: humedad relativa; RPA: radiación solar fotosintéticamente activa.

### 3.3.2. Preparación de los microcosmos

El suelo utilizado en el ensayo se extrajo de la capa superficial (0 – 20 cm) de un *Typic Xerorthents* que había sido previamente labrado y destinado de forma eventual a cultivos hortícolas. Localizado en los mismos campos experimentales y contiguo a una plantación de viñedo (Figura 3), antes de su utilización, el suelo se cribó *in situ* para eliminar restos vegetales y partículas gruesas.



**Figura 3.** Vista aérea de la parcela de donde se obtuvo el suelo para el ensayo.

Para el montaje de los microcosmos, se emplearon macetas de 22 × 22 × 27 cm (volumen de 11 L y peso aproximado de 300 g). Cada unidad se rellenó con 0,57 kg de grava comercial (capa de 2 cm) para facilitar el drenaje. A continuación, se añadieron 12 kg del suelo, mezclado con 1,2 kg de arena de sílice de río (fracción 0,25 – 0,50 mm), lavada y esterilizada en autoclave (121 °C, 1 h), con el fin mejorar la aireación y reducir la compactación.

Esta mezcla final se añadió en pequeñas paladas, dejando 5 cm libres hasta el borde superior de la maceta; sus propiedades fisicoquímicas se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Caracterización fisicoquímica del sustrato utilizado en el ensayo.

Variable	Media ± D.E.
pH <sub>1:2,5</sub>	8,16 ± 0,09
CE <sub>1:2,5</sub> (dS/m)	0,14 ± 0,03
CO (%)	1,45 ± 0,20
MO (%)	2,49 ± 0,34
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1,22 ± 0,15
Textura	Franca

pH: pH en agua; CE: Conductividad eléctrica; CO: Carbono orgánico; MO: Materia orgánica; Da: Densidad aparente. D.E.: Desviación Estándar.

Una vez etiquetados, los microcosmos se colocaron sobre las mesas instaladas en cada módulo, conforme al diseño experimental descrito anteriormente (Figura 2).

### 3.3.3. Plantación de las vides

Se emplearon dos variedades: *Vitis vinifera* cv. Tempranillo (tinta) y Airén (blanca), que constituyen los niveles del factor de estudio Variedad de vid.

- Tempranillo se caracteriza por su brotación y maduración tempranas, vigor moderado-alto y buena fertilidad, con racimos grandes con bayas negro-azuladas. Tolerante al frío y moderadamente resistente a la sequía, aunque sensible a enfermedades fúngicas. Demanda mucho potasio, algo menos de nitrógeno y fósforo, pero poco magnesio. Produce vinos de color rojo intenso, suaves (baja acidez y taninos), pero muy aromáticos (Álvarez & Villarías, 2012).
- Airén, por su parte, se trata de una cepa muy productiva, de brotación y maduración tardías, con racimos grandes y bayas verde-amarillentas. Se adapta bien a suelos pobres, es muy resistente a la sequía y tolera plagas y enfermedades. Sus vinos son de color amarillo pálido, baja acidez, buena graduación alcohólica y escaso contenido aromático (Álvarez & Villarías, 2012).

Estas vides se compraron a la empresa “Viveros Plantvid S.L.”, y todas ellas se encontraban injertadas sobre el patrón 110 Richter (110R). Este híbrido de *Vitis berlandieri* Rössigier nº2 × *Vitis rupestris* cv. Martin, resistente a la filoxera y hongos de la raíz, especialmente compatible con Tempranillo, es idóneo para suelos secos, pobres y profundos. Aunque sensible a nematodos, salinidad, suelos calcáreos y encharcamiento, el 110R aporta alto vigor, buena fertilidad, producción abundante y un ligero retraso en el ciclo vegetativo, características beneficiosas para climas mediterráneos (Álvarez & Villarías, 2012; MAPA, s. f.).

El día anterior a la plantación, y siguiendo las indicaciones del proveedor, se realizó un recorte de raíces dejando unos 10 cm de longitud para favorecer el enraizamiento, manteniendo las plantas hidratadas durante 24 horas. Tras su inserción en el suelo, se aplicó un riego de 1 litro por microcosmos para facilitar el arraigo inicial. Finalmente, se colocó un tutor de bambú para guiar el crecimiento vertical y apoyar el desarrollo morfológico de las vides.

### 3.3.4. Siembra y manejo de la cubierta vegetal

Como parte del factor de estudio Cubierta, se utilizaron dos especies de leguminosas anuales de la familia Fabaceae, ampliamente reconocidas por su valor forrajero, su capacidad de adaptación y su aptitud para desarrollarse en suelos poco fértiles del entorno mediterráneo (Nichols et al., 2013). Estas especies constituyeron dos de los tres niveles establecidos para este factor.

El *Medicago truncatula* Gaertn. (en adelante Medicago), también denominado carretón y pariente cercano de la alfalfa, es una planta autofértil de hojas trifoliadas con macha negra central, flores amarillas y frutos espinosos. Se caracteriza por su rápido desarrollo, alto potencial de ahijamiento y buena adaptación a suelos bien drenados con pH neutro a alcalino (May & Dixon, 2004; UPNA, 2024), especialmente en regiones con veranos secos. Se empleó el cultivar Caliph, de ciclo corto y adaptación a bajas precipitaciones (Nair et al., 2006), que fue suministrado por la empresa “Semillas Batlle S.A”. La siembra se realizó a razón de 30 semillas ( $\approx 0,20$  g) por microcosmos a una profundidad de 1 cm.

Por otro lado, el *Trifolium subterraneum* L. (en adelante Trifolium), también denominado trébol subterráneo, tiene un porte más bajo, hojas vellosas con una mancha triangular distintiva y flores blanquecinas (iNaturalist Mexico, 2024). Valorado por su crecimiento rápido y adaptación a suelos bien drenados, con pH neutro a ácido, tiene un efecto alelopático contra las malezas (Scavo et al., 2020; UPNA, 2024). Además, es resistente a la sequía y las bajas temperaturas. Se utilizó el cultivar Dalkeith, de ciclo medio-precoz.

La siembra se realizó el día posterior a la plantación de las vides, a razón de 30 semillas de Medicago ( $\approx 0,20$  g) y 20 de Trifolium ( $\approx 0,34$  g), en los microcosmos correspondientes, a una profundidad de 1 cm. Para favorecer la germinación, se aplicaron 0,5 litros de agua en cada unidad experimental inmediatamente después de la siembra.

Durante el experimento, en los tratamientos con CV se eliminaron manualmente otras hierbas para evitar competencia, mientras que, en aquellos con suelo desnudo (tercer nivel) se eliminó cualquier vegetación adventicia simulando la siega. Finalmente, 73 días después de la siembra, las cubiertas vegetales fueron cortadas y sus residuos se dejaron sobre la superficie del suelo en forma de mulch.

### **3.3.5. Riego utilizado**

Para el factor Disponibilidad de agua, se definieron dos niveles de Riego:

- Riego óptimo: basado en la precipitación media anual (1991–2020) de la finca “El Encín”, con un suplemento de 150 mm en verano. Posteriormente, se incrementó ligeramente para favorecer el establecimiento de las vides, como es habitual en nuevas plantaciones.
- Riego reducido: consistió en un 15 % menos de agua respecto al riego óptimo, reproduciendo así un escenario de menor disponibilidad hídrica asociadas a la disminución de precipitaciones prevista por el cambio climático (Droulia & Charalampopoulos, 2022).

Las dosis de agua se aplicaron de forma controladas y programada a lo largo del ciclo. Desde el inicio del ensayo hasta finales de mayo, se aportaron entre 400-500 mm de agua en el riego óptimo y 360-425 mm en el riego reducido, distribuidos en 1-2 riegos semanales. A partir de entonces, los aportes se incrementaron a 600 mm y 510 mm, respectivamente, aplicados con una frecuencia de 2–3 veces por semana hasta la finalización del ensayo.

Durante este periodo, se llevaron a cabo mediciones no destructivas periódicas en el suelo y las plantas. Sin embargo, dichos datos no se analizaron en el presente trabajo, centrado únicamente en los obtenidos al término de este.

---

### 3.4. Finalización del ensayo y obtención de muestras de suelo y planta

El ensayo concluyó en septiembre de 2024 con el desmontaje de los microcosmos. Previamente, se registraron las mediciones finales tanto en el suelo (temperatura, humedad, infiltración y resistencia a la penetración) como en la planta (longitud y grosor del pámpano).

Las plantas se extrajeron cuidadosamente, separando raíces (primarias y finas) y parte aérea. Todo el material vegetal se lavó cuidadosamente con agua de grifo y destilada. Posteriormente, se secó a 60 °C durante 72 horas, tras lo cual se pesó, clasificó y fraccionó. Una submuestra fue molida y enviada a un laboratorio externo para su análisis.

El suelo de cada microcosmos se homogeneizó tras retirar la porción de suelo inferior que contenía la grava y se dividió en dos fracciones: una secada al aire y tamizada para análisis fisicoquímicos, y otra conservada húmeda a 4 °C para análisis biológicos.

### 3.5. Determinaciones en el suelo

#### 3.5.1. Caracterización física

- Temperatura y humedad del suelo

La temperatura del suelo (°C) se midió con un termómetro digital de punción a 6 cm de profundidad. La humedad del suelo volumétrica (HV, v/v) se midió en la capa 0-12 cm con el equipo portátil Hydrosense II (Campbell Scientific) basado en la constante dieléctrica del suelo, la cual varía según su contenido de agua presente.

Adicionalmente, en laboratorio se determinó la humedad gravimétrica (p/p) por pérdida de peso tras secado a 105 °C durante 48 horas, con el fin de estandarizar los resultados en base a suelo seco.

- Infiltración (INF)

La velocidad de infiltración o conductividad hidráulica ( $\text{cm h}^{-1}$ ), indicadora de la textura y porosidad del suelo, se midió mediante el método del anillo simple (Bouwer, 1986), adaptado a las condiciones singulares del microcosmos. Se utilizaron anillo de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura, que se insertaron a 2 cm de profundidad. Tras añadir una lámina de agua equivalente a 2 pulgadas, se contabilizó el tiempo hasta su completa infiltración.

- Resistencia a la Penetración (RP)

Indicativa de la compactación superficial del suelo, se midió a una profundidad de 0,5 cm (RP\_0,5) usando un penetrómetro de bolsillo de punta plana. Se realizaron tres mediciones por microcosmos y los resultados se expresaron en  $\text{kg cm}^{-2}$ .

- Densidad aparente (Da)

Esta propiedad, expresada en  $\text{g/cm}^3$ , también es indicadora de la porosidad y posible compactación del suelo.

Se determinó usando un cilindro metálico (Blake & Hartge, 1986) de acero biselado de 5 cm de altura y diámetro. Después de secar la muestra a 105°C, se separaron y pesaron los elementos gruesos (EG > 2 mm) para estimar su volumen. La densidad aparente se calculó dividiendo la masa seca de tierra fina entre el volumen total corregido, excluyendo los EG.

- Agregados Estables al Agua (AEA)

La estabilidad de los agregados refleja la capacidad del suelo para conservar su estructura frente al agua, clave para la infiltración y resistencia a la erosión hídrica.

Se determinaron mediante tamizado húmedo (Kemper & Rosenau, 1986), utilizando agregados secos al aire (1–2 mm) sometidos a un doble tamizado secuencial en agua y dispersante, con un tamiz de 0,25 mm. Los agregados inestables se desintegraron y atravesaron el tamiz, mientras los estables quedaron retenidos. Tras eliminar arena y restos vegetales (segunda inmersión en solución dispersante) se calculó el porcentaje de los AEA como la proporción del peso de agregados estables respecto al total.

### **3.5.2. Caracterización química**

- pH y Conductividad Eléctrica (CE)

El pH refleja la acidez o alcalinidad del suelo, y la conductividad eléctrica su concentración de sales solubles. Ambos se determinaron en una suspensión suelo-agua (1:2,5, p/v), agitada para su estabilización y equilibrado. El pH se midió con un potenciómetro Crison microPH 2000 calibrado a partir de soluciones tampón de pH 4,00 y 7,00. La CE a 25 °C se registró mediante conductímetro Crison microCM 2200 con calibración previa a partir de solución estándar de KCl y corrección automática de temperatura, expresándose en dS m<sup>-1</sup>.

- Carbono Orgánico Total (COT)

El carbono orgánico del suelo (%), que constituye aproximadamente el 58 % de la materia orgánica, es fundamental para su fertilidad, estructura y actividad biológica.

Se determinó mediante el método de (Walkley & Black, 1934), basado en la oxidación húmeda con dicromato potásico (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) en medio ácido. El exceso de reactivo no consumido se valoró por retroceso, utilizando ortofenantrolina como indicador y sal ferrosa (sal de Möhr).

- Carbono Orgánico Disuelto (COD)

El carbono orgánico disuelto, una fracción soluble y lábil fácilmente asimilable por los microorganismos, se determinó mediante extracción con sulfato potásico (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 2 M en una proporción 1:4 (suelo-reactivo), tras una pre-incubación del suelo. El extracto se digirió en reactores Savillex® siguiendo una adaptación del método de (Yakovchenko & and Sikora, 1998) para bajas concentraciones de carbono. Esta cantidad se valoró, expresando los resultados en mg C kg<sup>-1</sup> de suelo seco.

- Nutrientes

El nitrógeno total (N) y los nutrientes biodisponibles (macro y micronutrientes) del suelo fueron analizados por el laboratorio de Ionómica del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC).

La determinación del N total se basó en el método Dumas (Bremner, 1965), utilizando un analizador elemental LECO TruspecCN, que oxida la muestra a alta temperatura en presencia de oxígeno, transformando el nitrógeno en N<sub>2</sub>, el cual se cuantifica mediante un detector de conductividad térmica.

Los nutrientes biodisponibles, se extrajeron previamente con la solución Mehlich-3 (Mehlich, 1984), en proporción 1:10 (p/v), mediante agitación y filtrado. Posteriormente, los extractos se analizaron mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Los resultados, inicialmente expresados en mg L<sup>-1</sup>, se corrigieron con blancos y convertidos a mg kg<sup>-1</sup> de suelo seco.

### **3.5.3. Caracterización biológica**

- Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM)

Se determinó por el método de fumigación-extracción (Vance et al., 1987). Se fumigó el suelo con cloroformo para lisar microorganismos, extrayendo el carbono liberado (igual que el carbono orgánico disuelto). El CBM, expresado en mg C kg<sup>-1</sup> de suelo, se calculó por la diferencia entre muestras fumigadas y no fumigadas.

- Respiración basal (RB) y respiración inducida por sustrato (RIS)

Estos indicadores de actividad microbiana se evaluaron por la liberación de CO<sub>2</sub>, siguiendo el método descrito por (Anderson & Domsch, 1978).

Tras pre-incubación, las muestras de suelo frescas se incubaron en recipientes herméticos con trampas de sosa. La RB se midió a las 24 horas y la RIS a las 5 horas tras añadir glucosa. El sobrante de sosa (porción que no reaccionó con el CO<sub>2</sub>) se valoró con ácido clorhídrico (HCl) empleando fenolftaleína, y los resultados se expresaron en mg CO<sub>2</sub> 100 g<sup>-1</sup> de suelo h<sup>-1</sup>.

- Actividades enzimáticas

Se determinaron colorimétricamente en microplacas (ISO 20130, 2018) para las enzimas β-Glucosidasa (Glu), fosfatasa (Fos), N-Acetilglucosaminidasa (Nac) y ureasa (Ure).

Los extractos se prepararon con sustratos específicos. Tras incubación, se detuvieron las reacciones con las soluciones correspondientes y se midió la absorbancia en un fotómetro, interpolando los resultados con curvas patrón.

## 3.6. Determinaciones en la planta

### 3.6.1. Crecimiento y desarrollo

Se basó en la cuantificación del peso seco de las distintas fracciones de biomasa: hojas, pámpanos y raíces para determinar el efecto de los diferentes tratamientos sobre el crecimiento y desarrollo vegetativo.

### 3.6.2. Estado nutricional

Se analizó el contenido de macro y micronutrientes en las fracciones de biomasa. Las muestras se secaron, molieron y homogeneizaron antes de enviarse al CEBAS-CSIC. Allí, se determinaron el carbono y nitrógeno con un analizador elemental LECO TruspecCN, y el resto de los nutrientes mediante ICP-OES.

Las concentraciones obtenidas, expresadas en  $\text{g kg}^{-1}$  o  $\text{mg kg}^{-1}$  de materia seca, se convirtieron en contenido total por microcosmos multiplicándolas por la biomasa seca correspondiente a cada fracción. En el presente trabajo, se muestran únicamente los resultados correspondientes a la fracción foliar, debido a que su interpretación es la más ampliamente difundida.

## 3.7. Análisis estadístico

Para analizar los datos del presente ensayo, se utilizó el software Statgraphics® Centurion v19. Primero, se depuró la base de datos, identificando y corrigiendo los valores atípicos (outliers). Luego, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) paramétrico ( $p < 0.05$ ) para evaluar el efecto de los factores de estudio, previa verificación de la normalidad – mediante prueba de Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov ( $p > 0.05$ ) –, y homogeneidad de las varianzas, con la prueba de Levene ( $p > 0.05$ ). Si los datos no cumplían estos supuestos, se transformaron con Box-Cox. En las tablas de resultados las medias y desviación típica corresponden a los valores originales sin transformación.

Se construyeron Modelos Lineales Generalizados (MLG) con los factores individuales y sus interacciones (con el bloque como factor aleatorio). Cuando el ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ), se usó la prueba post hoc de Tukey DSH para identificar entre qué niveles se producían y se expresó el resultado con letras diferentes ( $p < 0.05$ ). La ausencia de letras en las tablas indica que no hubo diferencias significativas. El grado de significación se indicó de la siguiente manera:  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*). Ante interacciones significativas, se construyeron modelos específicos para determinados niveles de un factor.

Para las variables que no cumplieron los requisitos del análisis de varianza, incluso tras la transformación, se empleó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ) con corrección de Bonferroni. Finalmente, se calcularon coeficientes de correlación ( $r$ ) de Pearson para explorar asociaciones lineales entre variables.

---

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Efectos sobre el suelo

#### 4.1.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo mostraron respuestas diversas a los factores de manejo, siendo la Cubierta del suelo el de mayor impacto. Por su parte el Riego influyó sobre la humedad volumétrica y moduló los efectos de la Cubierta y de la Variedad, para ciertas variables (Tabla 4).

La velocidad de infiltración (INF) fue particularmente sensible al tipo de Cubierta (Tabla 4,  $p < 0,05$ ), con valores un 50 % superiores con *Trifolium* con respecto al suelo desnudo, pero solo bajo riego óptimo (Figura 4A). *Medicago* mostró una respuesta intermedia y sin diferencia significativas con respecto al suelo desnudo bajo ningún nivel de Riego. No obstante, bajo restricción hídrica *Medicago* potenció la INF en comparación con el riego óptimo y *Airén* incrementó un 32% la infiltración en comparación con *Tempranillo*.

Estos resultados sugieren que ambas cubiertas vegetales (CV), posiblemente a través de su sistema radicular combinado con el de la vid y la consiguiente formación de bioporos, favorecen la infiltración, aunque con distinta sensibilidad al régimen hídrico. Ensayos previos en viñedos mediterráneos con CV leguminosas y no leguminosas (Abad et al., 2023; García-Díaz et al., 2018; Monteiro & Lopes, 2007; Novara et al., 2021) respaldan este comportamiento, asociado a una mayor porosidad y estabilidad estructural. Este efecto positivo es clave para reducir la erosión hídrica en viñedos recién establecidos.

La resistencia a la penetración superficial (RP<sub>0,5</sub>) se vio fuertemente influida por la Cubierta (Tabla 4,  $p < 0,001$ ), registrándose incrementos significativos de hasta un 23 % con CV, sobre todo *Trifolium*, frente al suelo desnudo. Esto puede estar asociado a procesos de desecación más frecuentes (Gabriel et al., 2021), a una mayor cohesión estructural o costra biológica. Sin embargo, los valores se mantuvieron por debajo del umbral crítico de 30 kg cm<sup>-2</sup> (Bartzen et al., 2019; Lipiec & Håkansson, 2000) y no se observaron efectos negativos sobre la infiltración, lo que descarta procesos de compactación superficial restrictiva.

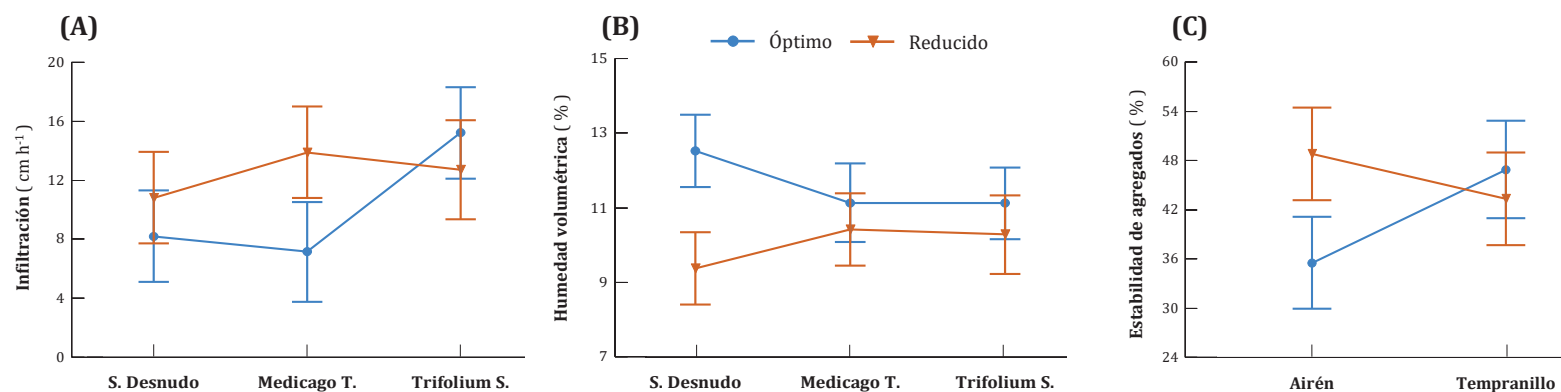
No obstante, algunos estudios como los de Blavet et al. (2009) y Morlat & Jacquet (2003), han documentado una reducción tanto de la RP como del encostramiento superficial en suelos con CV, tanto en viñedos mediterráneos como en otras regiones secas. Estas discrepancias podrían atribuirse al tipo de especies utilizada, el manejo agronómico y las condiciones edafoclimáticas locales y, sobre todo, a la duración del ensayo. Con el tiempo las CV mejoran la estructura del suelo y reducen la tendencia a formar costra.

La humedad volumétrica del suelo (HV) fue muy sensible al régimen hídrico (Tabla 4,  $p < 0,001$ ), con un aumento del 16 % bajo riego óptimo frente al reducido, aunque solo con suelo desnudo (Tabla 4, Figura 4B). En condiciones de menor disponibilidad hídrica, las CV tendieron a mantener una mayor HV que el suelo desnudo, lo que sugiere mejor conservación tras su siega y uso como mulch (Gabriel et al., 2021; Novara et al., 2012), efecto que podría intensificarse con el tiempo.

**Tabla 4.** Propiedades físicas de suelo según los factores y sus niveles de estudio al final del ensayo.

Factor / Nivel	INF ( $\text{cm h}^{-1}$ )	RP_0,5 <sup>†</sup> ( $\text{kg cm}^{-2}$ )	HV (%)	AEA (%)
<b>Cubierta (C)</b>	*	***		
S. Desnudo	9,48 ± 3,97 <b>a</b>	1,56 ± 0,29 <b>a</b>	10,95 ± 2,62	44,60 ± 9,80
Medicago T.	10,50 ± 5,93 <b>ab</b>	1,92 ± 0,26 <b>b</b>	10,73 ± 1,66	41,50 ± 14,29
Trifolium S.	14,14 ± 6,36 <b>b</b>	2,03 ± 0,36 <b>b</b>	10,71 ± 1,69	44,69 ± 9,76
<b>Riego (R)</b>			***	
Óptimo	10,15 ± 5,67	1,81 ± 0,42	11,60 ± 2,04 <b>b</b>	41,02 ± 12,17
Reducido	12,51 ± 5,66	1,85 ± 0,31	10,00 ± 1,67 <b>a</b>	46,15 ± 9,91
<b>Variedad (V)</b>				
Airén	12,29 ± 6,35	1,87 ± 0,38	10,78 ± 2,35	42,23 ± 11,56
Tempranillo	10,28 ± 4,89	1,79 ± 0,35	10,82 ± 1,66	45,12 ± 10,98
<b>Interacciones</b>				
C x R	*		*	
C x V				
R x V				**
C x R x V				

INF: infiltración; RP\_0,5: resistencia a la penetración a 0,5 cm; HV: humedad volumétrica; AEA: agregados estables al agua. Los valores indican media ± desviación estándar. Para cada variable, letras distintas en cada factor indican diferencias significativas entre los distintos niveles con grados de significancia de  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*), según el test (DSH) de Tukey. La ausencia de letras indica que no existieron diferencias entre los niveles. † Variable transformada (Box-Cox).

**Figura 4.** Gráficos de interacción significativa entre factores según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ): (A) Infiltración, (B) Humedad volumétrica y (C) Agregados estables al agua.

La estabilidad de agregados al agua (AEA) mostró una respuesta compleja con una interacción significativa Riego × Variedad (Tabla 4, Figura 4C). Mientras que Tempranillo no difirió entre regímenes, Airén mejoró este parámetro bajo riego reducido en comparación con el óptimo. Cuando solo se consideró riego óptimo, Tempranillo mostró valores de AEA un 33 % más altos que Airén, probablemente gracias a su mayor desarrollo radicular (Tabla 8) y, por tanto, un mayor aporte de C orgánico que favorece la agregación del suelo (Liu et al., 2005). Sin CV, Tempranillo también tendió a superar a Airén, indicando un mejor desempeño en su ausencia.

No se encontraron diferencias para el factor Cubierta, posiblemente por la corta duración del ensayo y en consecuencia el escaso aporte de biomasa de las CV. Este resultado se respalda con estudio previos, que señalan que los beneficios de las CV sobre la AEA suelen manifestarse tras varios años de implantación, gracias a la acumulación progresiva de biomasa, exudados radiculares y otros compuestos orgánicos que estimulan actividad microbiana del suelo (Abad et al., 2023; Peregrina et al. 2010a; Virto et al., 2012).

#### **4.1.2. Propiedades químicas**

Las propiedades químicas del suelo mostraron un comportamiento heterogéneo ante los factores evaluados, siendo la Cubierta y el Riego los principales moduladores. La Variedad de vid no presentó efectos significativos de forma aislada, y muchas propiedades no se vieron alteradas ni por los factores principales ni sus interacciones (Tablas 5 y 6).

El pH del suelo se mantuvo ligeramente alcalino (8,21 – 8,25) en todos los tratamientos, con efecto significativo de la Cubierta (Tabla 5,  $p < 0,01$ ). *Trifolium* elevó el pH en comparación con el suelo desnudo, pero solo bajo riego óptimo (Figura 5A), lo que sugiere que esta CV podría modular la acidez/alcalinidad del suelo según el régimen hídrico, posiblemente mediante el aporte de bases o la dinámica del nitrógeno y la materia orgánica.

La conductividad eléctrica (CE) también presentó diferencias significativas en función de la Cubierta (Tabla 5,  $p < 0,01$ ), con valores ligeramente inferiores en presencia de *Trifolium*. En cambio, no se observaron efectos del Riego ni de la Variedad, indicando una estabilidad general del contenido salino durante el ensayo.

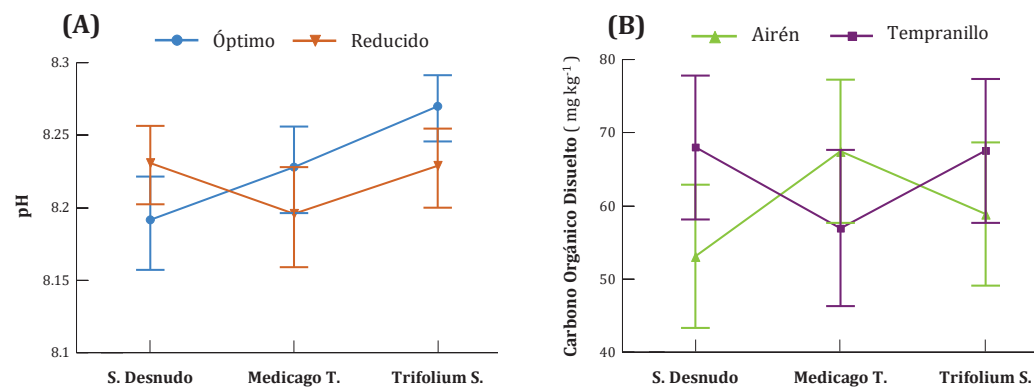
Es posible que el uso de microcosmos y la falta de drenaje natural hayan influido en las variaciones observadas que, si bien fueron estadísticamente significativas, tuvieron una magnitud reducida y poca repercusión agronómica. Estudios como los de Gattullo et al. (2020) no detectaron variaciones relevantes de pH ni CE tras el establecimiento de CV no leguminosas en viñedos mediterráneos irrigados.

El carbono orgánico total (COT) no se vio significativamente afectado por ninguno de los factores ni sus interacciones, aunque se observaron valores ligeramente superiores con ambas CV, riego reducido y Tempranillo (Tabla 5). Esta ausencia de cambios detectables puede atribuirse a la corta duración del ensayo, insuficiente para modificar esta fracción más estable, especialmente considerando que el muestreo abarcó toda la profundidad del microcosmos ( $\approx 25$  cm) y probablemente diluyó posibles efectos superficiales. Este resultado concuerda con estudios que destacan la necesidad de varios años para apreciar incrementos en el COT, especialmente con leguminosas (Abad et al., 2021b), aunque otros como Gattullo et al. (2020) los detectaron ya en el primero año.

**Tabla 5.** Propiedades químicas de suelo según los factores y sus niveles de estudio al final del ensayo.

Factor / Nivel	pH <sub>1:2,5</sub> <sup>†</sup>	CE <sub>1:2,5</sub> <sup>†</sup> (dS m <sup>-1</sup> )	COT (g 100 g <sup>-1</sup> )	COD (mg kg <sup>-1</sup> )	N (g 100 g <sup>-1</sup> )	C/N <sup>†</sup>
<b>Cubierta (C)</b>	**	**				
S. Desnudo	8,21 ± 0,06 <b>a</b>	0,21 ± 0,02 <b>b</b>	1,44 ± 0,11	60,50 ± 35,50	0,10 ± 0,01	15,18 ± 1,62
Medicago T.	8,21 ± 0,05 <b>a</b>	0,20 ± 0,01 <b>b</b>	1,47 ± 0,13	63,68 ± 29,77	0,10 ± 0,02	14,36 ± 0,97
Trifolium S.	8,25 ± 0,04 <b>b</b>	0,19 ± 0,01 <b>a</b>	1,45 ± 0,12	63,14 ± 31,94	0,09 ± 0,02	15,17 ± 1,19
<b>Riego (R)</b>					*	***
Óptimo	8,23 ± 0,06	0,20 ± 0,02	1,43 ± 0,11	65,43 ± 33,54	0,09 ± 0,02 <b>a</b>	15,53 ± 1,45 <b>b</b>
Reducido	8,22 ± 0,04	0,20 ± 0,02	1,47 ± 0,12	59,53 ± 30,60	0,10 ± 0,01 <b>b</b>	14,37 ± 0,93 <b>a</b>
<b>Variedad (V)</b>						
Airén	8,22 ± 0,04	0,20 ± 0,01	1,43 ± 0,12	59,77 ± 32,18	0,10 ± 0,02	15,24 ± 1,57
Tempranillo	8,22 ± 0,06	0,20 ± 0,02	1,47 ± 0,11	65,18 ± 32,00	0,10 ± 0,01	14,59 ± 0,91
<b>Interacciones</b>						
C x R	**					
C x V				*		
R x V						
C x R x V						

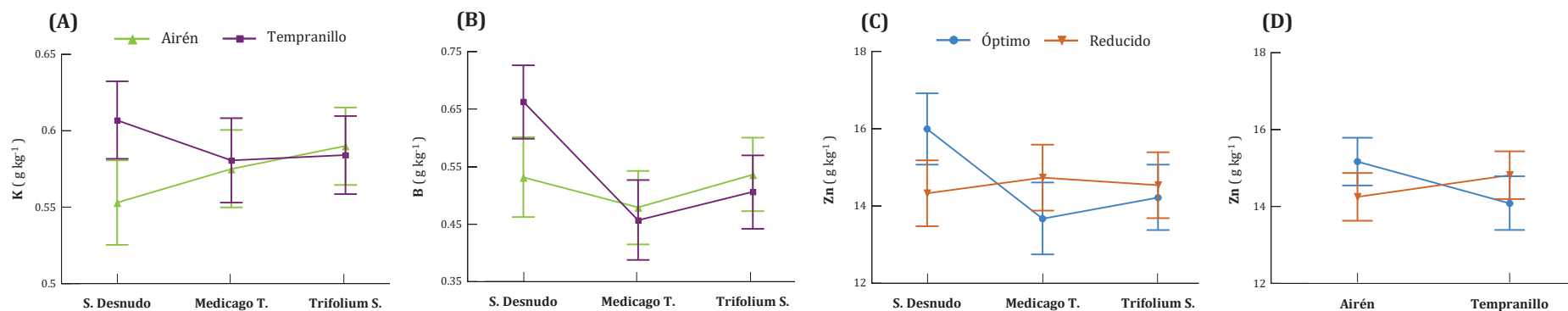
pH: pH en agua; CE: conductividad eléctrica; N: nitrógeno total; C/N: relación carbono-nitrógeno; COT: carbono orgánico total; COD: carbono orgánico disuelto. Los valores indican media ± desviación estándar. Para cada variable, letras distintas en cada factor indican diferencias significativas entre los distintos niveles con grados de significancia de  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*), según el test (DSH) de Tukey. La ausencia de letras indica que no existieron diferencias entre los niveles. † Variable transformada (Box-Cox).

**Figura 5.** Gráficos de interacción significativa entre factores según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ) en: (A) pH en agua y (B) Carbono orgánico disuelto.

**Tabla 6.** Concentraciones de macro y micronutrientes en el suelo según los factores y sus niveles de estudio al final del ensayo.

Factor / Nivel	$(g\ kg^{-1})$				$(mg\ kg^{-1})$				
	P	K	Ca	Mg	Fe	B	Zn	Na	
<b>Cubierta (C)</b>					*	**			
S. Desnudo	0,59 ± 0,02	0,585 ± 0,050	4,72 ± 0,23	0,36 ± 0,02	59,31 ± 6,68 <b>b</b>	0,61 ± 0,17 <b>b</b>	15,08 ± 2,36	53,17 ± 15,84	
Medicago T.	0,58 ± 0,02	0,582 ± 0,053	4,71 ± 0,22	0,35 ± 0,02	53,24 ± 5,05 <b>a</b>	0,46 ± 0,16 <b>a</b>	14,36 ± 1,36	52,67 ± 14,02	
Trifolium S.	0,58 ± 0,03	0,587 ± 0,050	4,73 ± 0,22	0,35 ± 0,03	58,57 ± 7,77 <b>ab</b>	0,52 ± 0,15 <b>a</b>	14,38 ± 1,37	54,02 ± 14,52	
<b>Riego (R)</b>		*							
Óptimo	0,58 ± 0,02	0,576 ± 0,041 <b>a</b>	4,74 ± 0,22	0,35 ± 0,02	56,96 ± 7,19	0,51 ± 0,18	14,68 ± 2,08	53,13 ± 14,23	
Reducido	0,58 ± 0,03	0,593 ± 0,056 <b>b</b>	4,70 ± 0,22	0,35 ± 0,03	57,28 ± 7,01	0,55 ± 0,16	14,53 ± 1,41	53,46 ± 15,09	
<b>Variedad (V)</b>									
Airén	0,58 ± 0,03	0,576 ± 0,043	4,70 ± 0,22	0,35 ± 0,02	57,32 ± 6,91	0,52 ± 0,16	14,71 ± 2,01	51,16 ± 14,94	
Tempranillo	0,59 ± 0,02	0,593 ± 0,055	4,74 ± 0,22	0,36 ± 0,03	56,91 ± 7,28	0,54 ± 0,18	14,49 ± 1,45	55,53 ± 14,04	
<b>Interacciones</b>									
C x R							**		
C x V		*				*			
R x V							*		
C x R x V									

P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Fe: hierro; B: boro; Zn: zinc y Na: sodio. Los valores indican media ± desviación estándar. Para cada variable, letras distintas en cada factor indican diferencias significativas entre los distintos niveles con grados de significancia de  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*), según el test (DSH) de Tukey. La ausencia de letras indica que no existieron diferencias entre los niveles.

**Figura 6.** Gráficos de interacción significativa entre factores según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ) en: (A) Potasio, (B) Boro y (C y D) Zinc.

En contraste, el carbono orgánico disuelto (COD), fracción más lábil para los microorganismos, sí presentó una interacción significativa Cubierta × Variedad (Tabla 5, Figura 5B), aunque en general solo se observaron tendencias y patrones diferentes según la combinación. En suelo desnudo Tempranillo presentó un 26 % más de COD que Airén ( $p < 0,05$ ). Bajo riego óptimo, Tempranillo tendió a incrementarlo con Trifolium ( $p < 0,1$ ); por otra parte, Airén alcanzó el valor máximo con Medicago ( $p < 0,1$ ), frente al valor mínimo de Tempranillo con esta mismas CV. Sin embargo, estudios como los de Steenwerth & Belina (2008) describen incrementos significativos de COD en el primer año al usar CV no leguminosas en viñedos de clima mediterráneo. Estos resultados sugieren que ciertas combinaciones de Variedad y CV, por sus exudados radiculares y el aporte de biomasa tras la siega, pueden favorecer la acumulación de esta fracción de relevancia microbiológica, mejorando la estructura e infiltración del suelo (Six et al., 2004; Steenwerth & Belina, 2008).

El contenido de nitrógeno total (N) solo fue afectado por el régimen hídrico (Tabla 5,  $p < 0,05$ ), con valores más altos bajo riego reducido, debido a una menor extracción de N asociada a la menor producción de biomasa en esta condición (Tabla 8 y Tabla 9). Los factores Cubierta y Variedad no mostraron efectos significativos, posiblemente por la corta duración del ensayo y/o a un efecto dilución similar al observado para el COT.

Esta falta de respuesta coincide con estudio previos en contextos mediterráneos, donde la competencia por el N y su inmovilización microbiana – sobre todo con CV leguminosas – restringen su disponibilidad inmediata (Abad et al., 2023; Sulas et al., 2017). Aunque estas especies tienen el potencial de aumentar el contenido de N en el suelo a largo plazo, su eficacia depende de factores clave como el manejo de la siega, las condiciones de humedad del suelo y la época del año (Abad et al., 2021a; Pérez-Álvarez et al., 2015). Además, su gestión adecuada podría reducir la necesidad de fertilización nitrogenada en el futuro.

La relación C/N fue significativamente mayor bajo riego óptimo (Tabla 5,  $p < 0,001$ ), en línea con la mayor extracción de N bajo estas condiciones (Tabla 9). En cambio, no se observaron diferencias significativas para el factor Cubierta, lo que coincide con los resultados de Abad et al. (2023) tras varios años de implantación de leguminosas en viñedos mediterráneos irrigados.

Entre los macronutrientes extraíbles, solo el potasio (K) mostró diferencias significativas entre regímenes hídricos (Tabla 6,  $p < 0,05$ ), siendo un 11 % mayor bajo riego reducido, posiblemente por la menor extracción asociada a una menor biomasa en esta condición (Tabla 8 y Tabla 9). Además, la interacción significativa Cubierta × Variedad (Tabla 6, Figura 6A) muestra, en ausencia de CV, mayor contenido de K en Tempranillo que en Airén. Esto concuerda con su menor extracción en la biomasa foliar del Tempranillo (Tabla 9).

Fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg) no mostraron variaciones significativas con ningún factor ni interacción, probablemente por la corta duración del ensayo. Esto concuerda con estudios previos que indican que los efectos de las CV sobre P (y K) suelen manifestarse a largo plazo, especialmente en sistemas más húmedos y donde se dejan como mulch, que favorecen la descomposición de biomasa rica en nutrientes (Abad et al., 2021a; DeVetter et al., 2015). En el caso de Ca y Mg, aunque la evidencia es limitada, se han reportado aumentos de Mg con leguminosas tras varios años de siega (Pérez-Álvarez et al., 2015). No obstante, en regiones semiáridas los efectos suelen ser mínimos o incluso negativos, sobre todo con CV no leguminosas (Tescic et al., 2007).

En este caso, la ausencia de diferencias también podría deberse a que la extracción de nutrientes por parte de la vid y las CV no fue suficiente como para alterar de forma significativa la fracción extraíble del suelo (Mehlich-3), un resultado coincidente con el descrito por Pérez-Álvarez et al. (2015) en viñedos de clima mediterráneo. Esta estabilidad se refleja en las bajas correlaciones encontradas entre las concentraciones de nutrientes en el suelo y su extracción en la biomasa foliar, que sí mostró variabilidad (Tabla 9).

Por otra parte, el hierro (Fe) y el boro (B) se vieron afectados por el factor Cubierta (Tabla 6), quizás por sus concentraciones naturalmente bajas. Medicago redujo los niveles de Fe en el suelo en un 11 % respecto al suelo desnudo ( $p < 0,05$ ), probablemente asociado a una mayor extracción por parte de la vid en presencia de esta CV (Tabla 9).

En cuanto al B, su concentración disminuyó un 16 % con Trifolium y un 31 % con Medicago ( $p < 0,01$ ) en comparación con el suelo desnudo, aunque solo en combinación con Tempranillo (Figura 6B). Esta reducción no se asoció a una mayor extracción por parte de la vid, lo que sugiere una alta competencia de las CV por este micronutriente. Además, en ausencia de leguminosas, el suelo mostró mayores concentraciones de B con Tempranillo que con Airén, diferencia que fue significativa ( $p < 0,05$ ) en un análisis específico para esta condición y que podría atribuirse a su menor extracción de este micronutriente (Tabla 9). Estos resultados indican que el contenido de B en el sistema suelo-planta depende tanto de la presencia de CV como de la capacidad extractiva de la vid.

La respuesta del zinc (Zn) fue más compleja, con dos interacciones significativas (Tabla 6). Por un lado, Cubierta  $\times$  Riego (Figura 6C): la concentración de Zn en el suelo disminuyó en presencia de CV, pero solo bajo riego óptimo. Esto sugiere una mayor competencia de las CV por este micronutriente, puesto que dicha reducción no estuvo relacionada con una mayor extracción por parte de la vid. Por otro lado, Riego  $\times$  Variedad (Figura 6D): bajo riego óptimo, el suelo tendió a presentar mayores concentraciones de Zn con Airén que con Tempranillo, diferencias que tampoco se puede atribuir a una mayor extracción por parte de esta última (Tabla 9).

Finalmente, el sodio (Na) no mostró variaciones significativas ni por efectos individuales ni por interacciones, coincidiendo con lo descrito por Tesic et al. (2007).

#### **4.1.3. Propiedades biológicas**

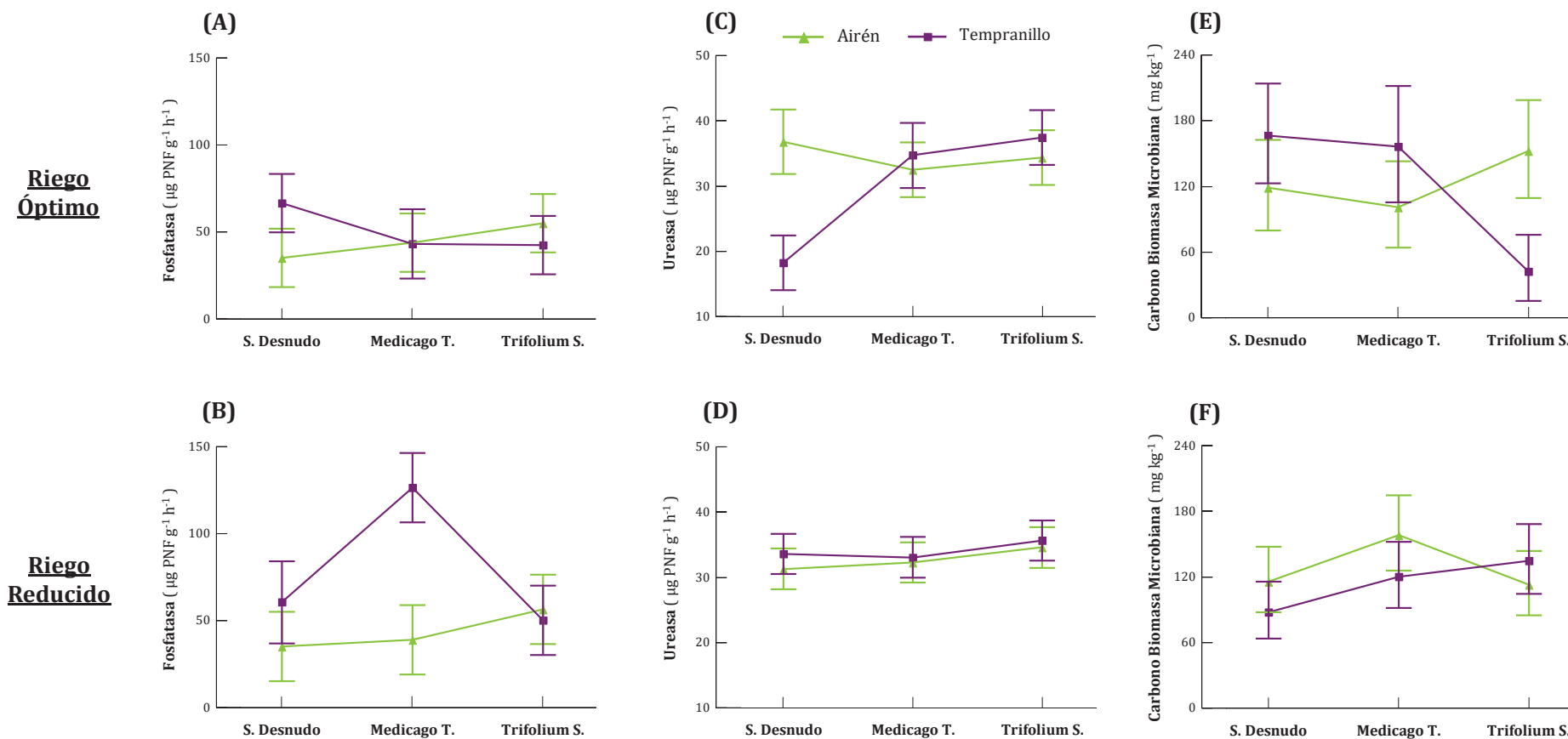
La respuesta biológica del suelo a los factores estudiados también fue compleja, destacando tanto la influencia de las CV sobre ciertas actividades enzimáticas como la aparición de interacciones triples (Cubierta  $\times$  Riego  $\times$  Variedad), que evidencian la alta sensibilidad del microbioma edáfico al manejo. Las actividades fosfatasa, ureasa y el carbono de la biomasa microbiana mostraron las respuestas más complejas (Tabla 7).

La actividad fosfatasa (Fos) aumentó bajo riego reducido (+30 %,  $p < 0,01$ ) y con la variedad Tempranillo (+50 %,  $p < 0,001$ ), aunque estas respuestas dependieron de interacciones triples significativas (Tabla 7). Solo la combinación Medicago-Tempranillo-riego reducido mostró incrementos significativos respecto a suelo desnudo, Trifolium y Airén (Figuras 7A y 7B). Esto pone de relieve la importancia del análisis multifactorial, pues las medias generales pueden ocultar efectos que solo se evidencia al analizar estas interacciones, como también señalaron Gattullo et al. (2020).

**Tabla 7.** Propiedades biológicas de suelo según los factores y sus niveles de estudio al final del ensayo.

Factor / Nivel	Glu		Fos		Nac		Ure		RB		RIS		CBM <sup>†</sup>	
	$(\mu\text{g PNF g}^{-1} \text{ h}^{-1})$													
<b>Cubierta (C)</b>	<b>**</b>				<b>*</b>		<b>***</b>		<b>*</b>		<b>***</b>			
S. Desnudo	30,93 ± 13,66	<b>a</b>	49,16 ± 22,81		2,20 ± 0,94	<b>a</b>	29,50 ± 7,76	<b>a</b>	0,38 ± 0,21	<b>a</b>	2,81 ± 1,21	<b>a</b>	124,00 ± 46,03	
Medicago T.	43,54 ± 15,29	<b>b</b>	64,18 ± 42,41		2,42 ± 0,94	<b>ab</b>	33,02 ± 2,81	<b>b</b>	0,63 ± 0,23	<b>b</b>	4,31 ± 1,42	<b>b</b>	132,36 ± 47,97	
Trifolium S.	45,37 ± 11,01	<b>b</b>	51,00 ± 16,20		3,17 ± 1,10	<b>b</b>	35,45 ± 3,10	<b>b</b>	0,58 ± 0,25	<b>ab</b>	4,13 ± 1,12	<b>b</b>	111,42 ± 50,44	
<b>Riego (R)</b>			<b>**</b>											
Óptimo	40,20 ± 16,34		47,52 ± 17,71	<b>a</b>	2,65 ± 1,10		32,06 ± 7,50		0,54 ± 0,21		3,69 ± 1,45		122,15 ± 58,62	
Reducido	39,55 ± 13,15		61,87 ± 36,41	<b>b</b>	2,56 ± 1,05		33,32 ± 2,76		0,51 ± 0,28		3,79 ± 1,38		122,61 ± 36,12	
<b>Variedad (V)</b>			<b>***</b>											
Airén	40,76 ± 17,48		44,10 ± 18,26	<b>a</b>	2,57 ± 1,11		33,46 ± 3,22		0,54 ± 0,22		3,74 ± 1,33		128,22 ± 43,68	
Tempranillo	38,94 ± 11,25		66,26 ± 34,59	<b>b</b>	2,64 ± 1,03		31,98 ± 7,14		0,51 ± 0,28		3,74 ± 1,50		116,30 ± 52,26	
<b>Interacciones</b>														
C x R			<b>**</b>				<b>*</b>						<b>*</b>	
C x V			<b>***</b>				<b>***</b>						<b>*</b>	
R x V			<b>**</b>				<b>**</b>							
C x R x V			<b>***</b>				<b>***</b>						<b>***</b>	

Glu: actividad enzimática  $\beta$ -Glucosidasa; Fos: fosfatasa; Nac: N-Acetilglucosaminidasa; Ure: ureasa; RB: respiración basal; RIS: respiración inducida por sustrato y CBM: carbono de la biomasa microbiana. Los valores indican media  $\pm$  desviación estándar. Para cada variable, letras distintas en cada factor indican diferencias significativas entre los distintos niveles con grados de significancia de  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*), según el test (DSH) de Tukey. La ausencia de letras indica que no existieron diferencias entre los niveles. † Variable transformada (Box-Cox).



**Figura 7.** Gráficos de interacción triple significativa entre factores según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ), visualizados como la interacción doble entre Cubierta y Variedad, diferenciada por el régimen de Riego (óptimo arriba y reducido abajo) para: (A y B) actividad enzimática Fosfatasa; (C y D) actividad enzimática Ureasa y (E y F) Carbono de la biomasa microbiana.

De manera similar, la actividad ureasa (Ure) incrementó significativamente en presencia de CV (+12 % con *Medicago* y +20 % con *Trifolium*,  $p < 0,001$ ), aunque su comportamiento también fue variable y estuvo condicionado por una interacción triple (Tabla 7). En este caso, se observó una marcada reducción de la actividad en la combinación de Suelo desnudo con Tempranillo y riego óptimo (Figuras 7C y 7D). Lo cual contrasta con lo encontrado en otras variables donde en suelo desnudo (COD) y con riego óptimo (AEA) Tempranillo mostraba mejor respuesta que Airén.

Por su parte, las actividades  $\beta$ -Glucosidasa (Glu) y N-Acetilglucosaminidasa (Nac) aumentaron de forma significativa en presencia de CV, sobre todo *Trifolium* (Tabla 7), con incrementos del 47 % y 45 % respectivamente en comparación con el suelo desnudo ( $p < 0,01$  y  $p < 0,05$ ).

La respiración microbiana reflejó igualmente una clara respuesta al tipo de Cubierta (Tabla 7). La respiración basal (RB) se incrementó un 64 % con *Medicago* ( $p < 0,05$ ), con *Trifolium* en posición intermedia, aunque sin diferenciarse estadísticamente del suelo desnudo. En cambio, la respiración inducida por sustrato (RIS) sí aumentó significativamente con ambas leguminosas: +53 % con *Medicago* y +47 % con *Trifolium* ( $p < 0,001$ ) frente al suelo sin CV.

Estos aumentos en Glu, Nac y RIS (y parcialmente RB) se asocian a una mayor disponibilidad de materia orgánica fácilmente degradable, aportada por los restos frescos de las CV, lo que favorece un entorno microbiano más activo. Este patrón concuerda con lo reportado por Gattullo et al. (2020) y Abad et al. (2023) en otros viñedos mediterráneos.

El carbono de la biomasa microbiana (CBM) no presentó efectos de los factores individuales, pero sí una interacción triple significativa (Tabla 7). En particular, la combinación de *Trifolium* con Tempranillo bajo riego óptimo redujo significativamente el CBM en comparación con suelo desnudo, *Medicago* y Airén (Figuras 7E y 7F). Dicha disminución podría atribuirse al menor aporte de biomasa por parte de *Trifolium*, que presentó un promedio de 16,75 g de biomasa en peso seco por microcosmo, frente a los 19,88 g medidos en *Medicago*.

Esto refleja la alta sensibilidad del CBM a combinaciones específicas de manejo. Esto difiere con lo encontrado en otras variables, en donde bajo riego óptimo, Tempranillo se comporta mejor que Airén (como AEA), la combinación Tempranillo-*Trifolium* beneficiaba (COD, biomasa radicular y total) mientras que Airén-*Trifolium* perjudicaba (biomasa foliar y total, extracción de Ca, Mg y K).

Probablemente por la corta duración del ensayo o el efecto dilución derivado del muestreo en profundidad, no se observó una relación directa entre el uso de CV y un aumento del CBM. Esto contrasta con estudios realizados en zonas más húmedas, donde se han observado incrementos significativos desde el primero año (Virto et al., 2012), pero se respalda con otros, en viñedos mediterráneos, que describen estos aumentos a largo plazo, sobre todo en capa superficial del suelo (Abad et al., 2023; Gattullo et al., 2020).

## 4.2. Efectos sobre la planta

### 4.2.1. Crecimiento y desarrollo

La producción de biomasa en las vides estuvo fuertemente influenciada por el régimen de Riego, seguido de la Cubierta, mientras que la Variedad mostró respuestas diferenciadas según la fracción evaluada. Las interacciones entre factores revelaron patrones específicos, cuyos valores medios y significancia estadística se detallan en la Tabla 8.

El riego óptimo generó incrementos altamente significativos en todas las fracciones de biomasa en comparación con el riego reducido (Tabla 8,  $p < 0,001$ ), destacando su papel clave en el crecimiento vegetativo de la vid. En concreto, se observó un aumento del 28 % en la biomasa foliar, pero solo en suelo desnudo (Figura 8A), un 46 % en pámpanos y más del 40 % en raíces y biomasa total, en línea con lo reportado en otros viñedos mediterráneos (Pérez-Álvarez et al., 2021).

Las CV redujeron significativamente la biomasa foliar respecto al suelo desnudo (Tabla 8,  $p < 0,001$ ), con descensos del 28 % para *Trifolium* y del 17 % para *Medicago*, aunque únicamente bajo riego óptimo (Figuras 8A) y en combinación con Airén, como se observa en los análisis específicos para esta condición (Figura 8B). La biomasa total también se redujo significativamente con *Medicago* (-12 %) y *Trifolium* (-12 %) frente al suelo desnudo (Tabla 8,  $p < 0,001$ ), igualmente solo bajo riego óptimo (Figura 8D). En cuanto a la biomasa del pámpano, solo *Trifolium* causó una disminución significativa del 20 % respecto al suelo desnudo (Tabla 8,  $p < 0,05$ ).

En contra de lo esperado, la biomasa radicular no se vio afectada por las CV. Otros estudios han descrito que, ante la competencia, las vides desarrollan raíces más profundas como respuesta compensatoria (Celette et al., 2008; Hatch et al., 2011; Keller, 2025); sin embargo, en microcosmos con espacio limitado, esta estrategia difícilmente puede manifestarse.

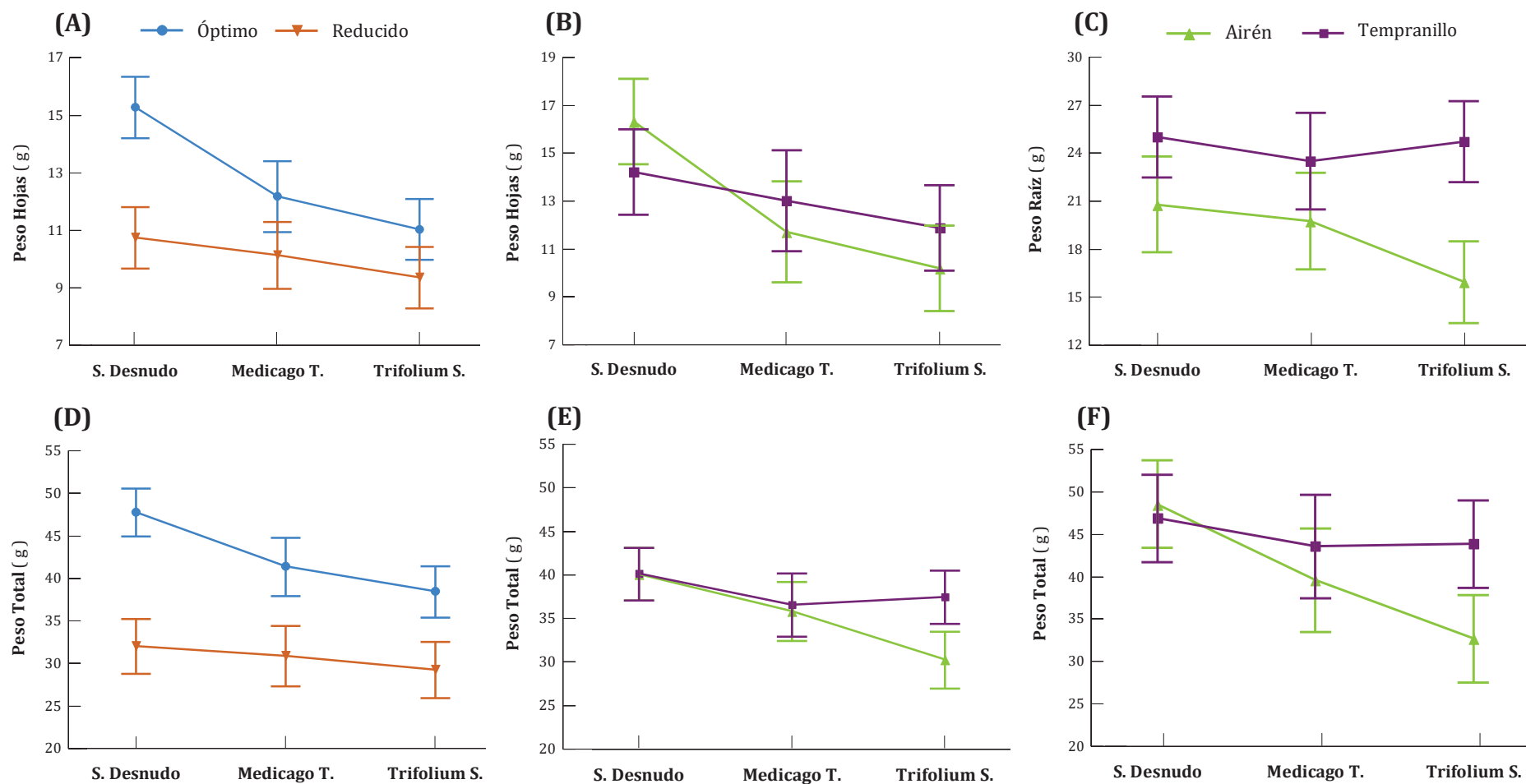
Entre variedades, Airén presentó un 14 % más de biomasa de pámpano que Tempranillo (Tabla 8,  $p < 0,05$ ), la cual acumuló mayor biomasa radicular (+23 %,  $p < 0,001$ ) y total (+8 %,  $p < 0,05$ ) que Airén, pero solo en combinación con *Trifolium* (Figuras 8C y 8F). Bajo riego óptimo, Airén mostró una biomasa total significativamente menor en combinación con *Trifolium* que en suelo desnudo (Figura 8E). Este conjunto de resultados refuerza el mejor desempeño de la combinación Tempranillo-*Trifolium* y, por el contrario, el peor comportamiento observado en Airén-*Trifolium*, coherente con lo detectado en otras variables del estudio.

El efecto adverso de las CV en algunos parámetros de crecimiento de la vid coincide con lo descrito por Olmstead et al. (2012), quienes también observaron menor crecimiento en viñedos jóvenes con CV frente a suelo desnudo en clima mediterráneo. Sin embargo, cabe destacar que, aunque las CV redujeron la biomasa aérea de la vid, aumentaron la relación biomasa raíz/biomasa aérea. Según señalan Santesteban & Royo (2017), aunque ambos están relacionados, un menor y moderado desarrollo aéreo favorece proporcionalmente el crecimiento radicular. Este ajuste sugiere que, ante la competencia generada por las CV, las vides jóvenes priorizan el sistema radicular y, con ello, sus reservas, contribuyendo a un equilibrio vegetativo beneficioso y mejor establecimiento durante los primeros años.

**Tabla 8.** Biomasa de las diferentes fracciones de las vides según los factores y sus niveles de estudio al final del ensayo.

Factor / Nivel	Hoja	Pámpano	Raíz	Total <sup>†</sup>
	(g)			
<b>Cubierta</b>	***	*		***
S. Desnudo	13,00 ± 2,79 <b>b</b>	6,92 ± 1,95 <b>b</b>	19,90 ± 5,70	39,82 ± 9,04 <b>b</b>
Medicago T.	11,15 ± 1,41 <b>a</b>	6,71 ± 1,74 <b>ab</b>	17,80 ± 4,96	35,66 ± 7,26 <b>a</b>
Trifolium S.	10,19 ± 1,82 <b>a</b>	5,78 ± 1,92 <b>a</b>	17,73 ± 4,96	33,70 ± 7,27 <b>a</b>
<b>Riego</b>	***	***	***	***
Óptimo	12,89 ± 2,46 <b>b</b>	7,70 ± 1,62 <b>b</b>	22,02 ± 4,31 <b>b</b>	42,60 ± 6,71 <b>b</b>
Reducido	10,10 ± 1,36 <b>a</b>	5,26 ± 1,30 <b>a</b>	15,18 ± 3,59 <b>a</b>	30,54 ± 4,15 <b>a</b>
<b>Variedad</b>		*	***	*
Airén	11,37 ± 2,82	6,90 ± 1,99 <b>b</b>	16,80 ± 4,47 <b>a</b>	35,07 ± 8,40 <b>a</b>
Tempranillo	11,56 ± 1,95	5,98 ± 1,74 <b>a</b>	20,32 ± 5,43 <b>b</b>	37,87 ± 7,93 <b>b</b>
<b>Interacciones</b>				
C x R	*			*
C x V				*
R x V				
C x R x V				

Los valores indican media ± desviación estándar. Para cada variable, letras distintas en cada factor indican diferencias significativas entre los distintos niveles con grados de significancia de  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*), según el test (DSH) de Tukey. La ausencia de letras indica que no existieron diferencias entre los niveles. † Variable transformada (Box-Cox).



**Figura 8.** Gráficos de interacción significativa entre factores según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ) en: (A y B) Biomasa foliar, (C) Biomasa radicular y (D, E y F) Biomasa total.

Aunque se esperaba que el riego óptimo redujera la competencia entre las CV y la vid – como han señalado estudios previos en viñedos jóvenes, donde la competencia es mayor bajo riego limitado (Abad et al., 2021b; Monteiro & Lopes, 2007) –, en el presente estudio se observó lo contrario: las CV provocaron una mayor reducción de la biomasa (foliar y total) precisamente bajo riego óptimo. Por el contrario, bajo restricción hídrica las CV ayudaron a mitigar el efecto del estrés hídrico y no se diferenciaron del suelo desnudo en cuanto a los efectos sobre la vid.

Esta aparente discrepancia con la literatura podría explicarse por las condiciones específicas del presente ensayo (microcosmos y riego controlado), la intensidad competitiva, el tipo de cubierta utilizada o el estado de desarrollo de las vides, por lo que sería necesario confirmar estos resultados en condiciones en campo.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la importancia de regular cuidadosamente la competencia durante los primeros años del viñedo, combinando un manejo adecuado del riego y de la siega de las CV (Abad et al., 2023; Gattullo et al., 2020).

#### **4.2.2. Estado nutricional**

El estado nutricional de las vides, en términos de extracción de nutrientes en la biomasa foliar, estuvo fuertemente influenciado por el régimen de Riego, seguido por el tipo de Cubierta, sus interacciones y, en menor medida, por la Variedad (Tabla 9).

El riego óptimo favoreció de forma significativa la extracción de todos los nutrientes analizados frente al riego reducido. Estos aumentos, que rondaron entre el 16 % y el 63 %, fueron más acusados en Fe, mientras que fueron menos pronunciados en N y K (Tabla 9). Este patrón coincide con estudios previos en viñedos mediterráneos, donde una mayor disponibilidad hídrica favorece la asimilación de N, P y K (Martínez-Vidaurre et al., 2024).

El efecto del factor Cubierta solo se manifestó bajo riego óptimo: el suelo desnudo favoreció claramente la extracción de nutrientes como Ca, Mg, B y Zn, mientras que las CV mantuvieron valores similares entre sí, sin diferencias significativas y próximos a los del riego reducido (Figuras 9D, 9F, 9H y 9I). En términos generales, *Trifolium* resultó más competitiva, reduciendo la extracción de nutrientes por la vid entre un 25 % y un 48 % respecto al suelo desnudo; *Medicago* mostró un efecto más moderado, con reducciones del 9 % al 26 %, posiblemente por sus distintas demandas nutricionales.

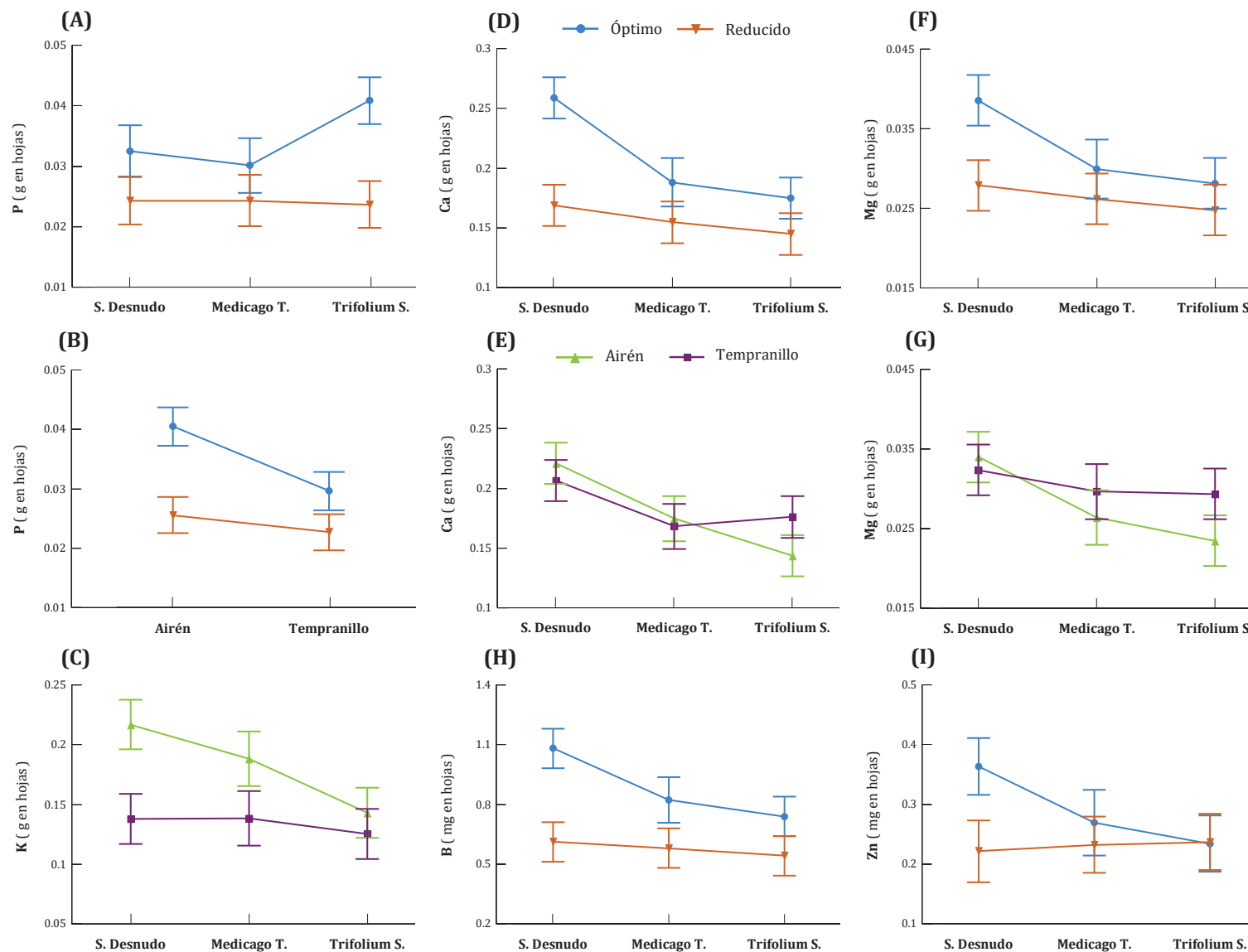
Al considerar únicamente el riego óptimo, *Trifolium* aumentó significativamente la extracción de P por la vid en comparación con el suelo desnudo (Figura 9A), posiblemente por un efecto positivo de estas CV sobre la micorrización de la vid (Deguchi et al., 2012; Javaid, 2010).

La Variedad también mostró ciertos efectos, aunque más específicos. Airén logró una mayor extracción de P que Tempranillo, pero únicamente bajo riego óptimo (Figura 9B), y una mayor extracción de K, con suelo desnudo y *Medicago*. Cabe destacar que, en general, Airén fue más sensible al factor Cubierta que Tempranillo: ambas CV redujeron significativamente la extracción de Ca y Mg (Figuras 9C y 9E), mientras que, en K, solo el *Trifolium* (Figura 9G), lo que refleja de nuevo el peor desempeño de la combinación Airén-*Trifolium*.

**Tabla 9.** Extracción de diferentes nutrientes en la biomasa foliar de las vides según los factores y sus niveles de estudio al final del ensayo.

Factor / Nivel	(g en hojas)				(mg en hojas)			
	N	P	K	Ca	Mg	Fe <sup>†</sup>	B	Zn
<b>Cubierta</b>		*	***	***	***	**	***	*
S. Desnudo	0,21 ± 0,04	0,028 ± 0,007 <b>ab</b>	0,18 ± 0,05 <b>b</b>	0,21 ± 0,06 <b>b</b>	0,033 ± 0,007 <b>b</b>	2,12 ± 0,83 <b>b</b>	0,85 ± 0,29 <b>b</b>	0,29 ± 0,11 <b>b</b>
Medicago T.	0,20 ± 0,04	0,027 ± 0,008 <b>a</b>	0,16 ± 0,04 <b>b</b>	0,17 ± 0,03 <b>a</b>	0,028 ± 0,004 <b>a</b>	2,16 ± 1,15 <b>b</b>	0,68 ± 0,17 <b>a</b>	0,25 ± 0,06 <b>ab</b>
Trifolium S.	0,18 ± 0,03	0,032 ± 0,011 <b>b</b>	0,13 ± 0,03 <b>a</b>	0,16 ± 0,04 <b>a</b>	0,026 ± 0,005 <b>a</b>	1,43 ± 0,32 <b>a</b>	0,64 ± 0,16 <b>a</b>	0,23 ± 0,05 <b>a</b>
<b>Riego</b>	**	***	***	***	***	***	***	**
Óptimo	0,21 ± 0,03 <b>b</b>	0,035 ± 0,008 <b>b</b>	0,17 ± 0,05 <b>b</b>	0,21 ± 0,05 <b>b</b>	0,032 ± 0,007 <b>b</b>	2,37 ± 0,92 <b>b</b>	0,89 ± 0,21 <b>b</b>	0,29 ± 0,09 <b>b</b>
Reducido	0,18 ± 0,03 <b>a</b>	0,024 ± 0,006 <b>a</b>	0,15 ± 0,04 <b>a</b>	0,16 ± 0,03 <b>a</b>	0,026 ± 0,004 <b>a</b>	1,46 ± 0,55 <b>a</b>	0,58 ± 0,12 <b>a</b>	0,23 ± 0,05 <b>a</b>
<b>Variedad</b>		***	***				*	
Airén	0,19 ± 0,03	0,032 ± 0,010 <b>b</b>	0,18 ± 0,05 <b>b</b>	0,18 ± 0,05	0,028 ± 0,007	1,97 ± 0,97	0,78 ± 0,24 <b>b</b>	0,26 ± 0,09
Tempranillo	0,20 ± 0,03	0,027 ± 0,007 <b>a</b>	0,13 ± 0,02 <b>a</b>	0,18 ± 0,04	0,030 ± 0,006	1,81 ± 0,78	0,67 ± 0,21 <b>a</b>	0,26 ± 0,07
<b>Interacciones</b>								
C x R		*		**	*		*	**
C x V			*	*	*			
R x V		*						
C x R x V								

N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Fe: hierro; B: boro; Zn: zinc. Los valores indican media ± desviación estándar. Para cada variable, letras distintas en cada factor indican diferencias significativas entre los distintos niveles con grados de significancia de  $p < 0,05$  (\*),  $p < 0,01$  (\*\*) y  $p < 0,001$  (\*\*\*), según el test (DSH) de Tukey. La ausencia de letras indica que no existieron diferencias entre los niveles. † Variable transformada (Box-Cox).



**Figura 9.** Gráficos de interacción significativa entre factores según DSH Tukey ( $p < 0,05$ ): (A y B) Fósforo, (C) Potasio, (D y E) Calcio, (F y G) Magnesio, (H) Boro y (I) Zinc.

---

Aunque las leguminosas tienen potencial para aportar N al sistema, en el presente ensayo – como también ocurrió con el N total del suelo – la extracción foliar de este nutriente solo se vio afectado por el régimen hídrico, en este caso, con valores significativamente más altos bajo riego óptimo (Tabla 9). Los factores Cubierta, Variedad y las interacciones no mostraron efectos significativos. Esta podría deberse a la corta duración del ensayo o, como ya se mencionó con anterioridad: “efecto dilución por profundidad, competencia por las CV a corto plazo e inmovilización microbiana (no sé cómo poner esto no me gusta)”.

En la literatura, los resultados también son diversos. En viñedos jóvenes de Brasil, Brunetto et al., (2017) observaron un efecto inicial positivo de las CV sobre el N foliar que revirtió al final del ciclo por la competencia hídrica y nutricional. En estudio de larga duración en el Mediterráneo, Abad et al. (2023) y Sweet & Schreiner (2010) no encontraron desequilibrios nutricionales tras años de uso de leguminosas, e incluso reportaron mejoras en el N foliar. Para otros nutrientes (P, K, Mg y Zn) el efecto parece depender más de la época y de las condiciones edáficas que del tipo de cubierta (Pérez Álvarez et al., 2015).

Aunque en el presente ensayo no se detectaron cambios significativos en la fertilidad edáfica a corto plazo (véase subsección 4.1.2), el estado nutricional de la vid mostró una menor extracción de nutrientes en presencia de CV, especialmente con *Trifolium*. Esto refleja una competencia por los nutrientes bajo condiciones de alta disponibilidad de agua, que impacta directamente en la nutrición de la planta. Este resultado pone de manifiesto que los análisis de suelo por sí solos no siempre permiten evidenciar esta competencia.

Además, las fuertes correlaciones entre la extracción de los distintos nutrientes sugieren que esta menor extracción en presencia de CV ocurre de manera conjunta y no de forma aislada. Aunque autores como Baumgartner et al. (2009) y Olmstead et al. (2012), señalan que los cambios en la nutrición foliar no siempre se relacionan con un menor crecimiento vegetativo, mientras se mantengan los niveles críticos, en el presente ensayo es la mayor biomasa observada en suelo desnudo parece explicar las mayores extracciones detectadas.

En conjunto, estos resultados evidencian que, al menos en las condiciones del presente estudio y bajo riego óptimo, las CV pueden reducir la disponibilidad de nutrientes para la vid y comprometer su correcto establecimiento y crecimiento a corto plazo.

### 4.3. Resumen de los resultados

A continuación, se recogen los resultados más relevantes del ensayo, destacando los efectos y tendencias de los distintos factores e interacciones sobre el suelo y la vid.

#### 4.3.1. Factores e interacciones

La Cubierta fue el factor que más influyó en las propiedades del suelo, especialmente en las biológicas y estructurales, mientras que el Riego afectó sobre todo al desarrollo y la nutrición de la vid, siendo el nivel óptimo, el que evidenció diferencias entre tipos de Cubierta, apenas existentes bajo restricción hídrica. La Variedad mostró efectos más específicos y de menor magnitud, pero relevantes en interacción con los otros factores.

Las interacciones desempeñaron un papel fundamental, destacando especialmente las dobles – sobre todo Cubierta × Riego –, mientras que las triples solo afectaron a algunos parámetros biológicos concretos.

#### 4.3.2. Suelo

##### ➤ Parámetros físicos

Las CV, especialmente Trifolium, mejoraron la infiltración (INF) del suelo gracias al sistema radicular conjunto (CV + vid), el aporte de biomasa, la formación de bioporos y el aumento del COD.

Bajo restricción hídrica: Airén y Medicago favorecieron la INF, y solo Airén mejoró la estabilidad de agregados (AEA), probablemente por la tendencia de mayor carbono orgánico disuelto (COD) en Airén + Medicago asociado al aporte de biomasa y exudados de la CV. Con riego óptimo: Tempranillo incrementó la AEA frente a Airén, asociado a su mayor desarrollo radicular y al mayor COD en combinación con Trifolium. Incluso sin CV, Tempranillo tendió a mejorar la AEA con respecto a Airén.

En conjunto, las CV favorecieron INF, AEA, COD tras la siega, mejorando la funcionalidad del suelo y reduciendo su vulnerabilidad a la erosión, con efectos positivos que podrían intensificarse a largo plazo.

##### ➤ Parámetros químicos

El COT no varió, probablemente por la corta duración del ensayo y la profundidad del muestreo, mientras que el COD fue más sensible: sin CV se elevó con Tempranillo, y con CV tendió a aumentar con Tempranillo-Trifolium y Airén-Medicago, en ciertas condiciones.

La fertilidad apenas varió a corto plazo, sin diferencias por Cubierta y con algo más de sensibilidad en Airén para K y B con CV. El N total disminuyó bajo riego óptimo (posible mayor extracción por la vid); P, Ca y Mg se mantuvieron estables; K fue más sensible; y Fe, B y Zn tendieron a reducirse con CV, con respuestas complejas según combinación de factores.

##### ➤ Parámetros biológicos

Las CV mejoraron el microbioma del suelo, con efectos modulados según Variedad y Riego. Destacó Trifolium, al aumentar las actividades enzimáticas y el carbono de la biomasa microbiana (CBM), mientras que Medicago favoreció la respiración y la actividad de la fosfatasa, mostrando patrones distintos de respuesta a los de otras propiedades.

---

---

### **4.3.3. Planta**

#### ➤ Crecimiento y desarrollo

Bajo riego óptimo: las CV (sobre todo Trifolium) redujeron la biomasa aérea y total, especialmente en Airén, aunque mejoraron la relación biomasa radicular/biomasa aérea, favoreciendo un equilibrio vegetativo beneficioso para un mejor establecimiento; Tempranillo + Trifolium alcanzó mayor biomasa radicular y total (lo que implicaría mayores reservas y favorecería una mejor implantación), mientras que Airén + Trifolium redujo más la biomasa foliar y total.

Bajo riego reducido no hubo diferencias, por lo que las CV, en comparación con el suelo desnudo, aportarían beneficios ambientales sin perjudicar el crecimiento de la vid.

#### ➤ Estado nutricional

El riego óptimo favoreció la extracción de N, K y Fe. Bajo este régimen: las CV, sobre todo Trifolium, redujeron la extracción de B y Zn, así como de Ca y Mg, siendo este efecto más marcado en Airén. Además, Trifolium potenció la extracción de P (probablemente por estimular la micorrización), algo beneficioso para el equilibrio vegetativo en nuevas plantaciones, con una extracción de Airén superior a la de Tempranillo.

Bajo riego reducido tampoco hubo diferencias significativas, manteniéndose los beneficios ambientales de las CV sin efectos negativos para la vid.

## 5. CONTRIBUCIÓN A OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El presente trabajo promueve la sostenibilidad del sector vitivinícola mediante estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático, centradas en el uso de cubiertas vegetales (CV) como práctica sostenible de manejo del suelo.

La Figura 10 muestra el grado de alineación del estudio con los ODS, según una escala de contribución (1: nulo, 2: parcial, 3: total) a cada una de sus metas específicas.

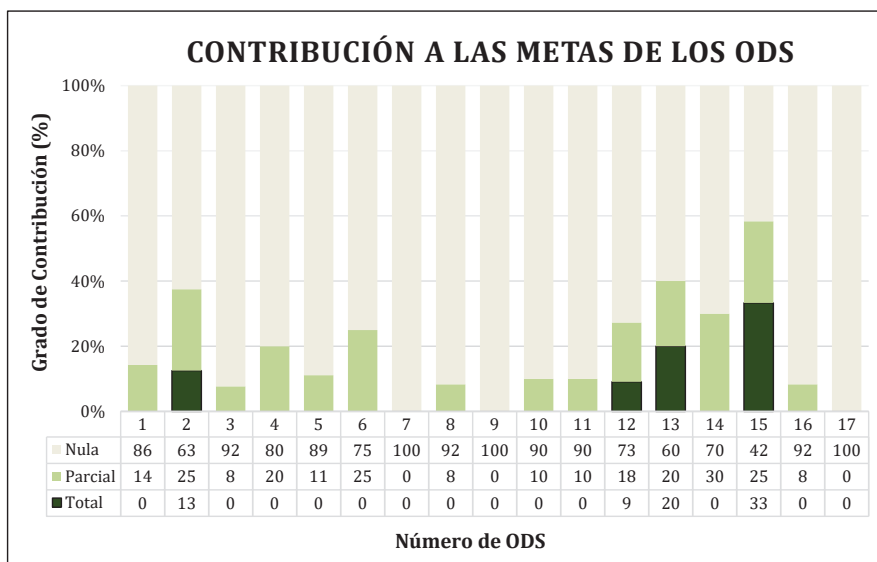


Figura 10. Contribución (en %) del ensayo a las metas específicas de los ODS.

Como se puede observar esta estrategia se alinea principalmente con los ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), 13 (Acción por el clima), 12 (Producción y consumo responsables) y 2 (Hambre Cero), contribuyendo a las siguientes metas:

- ODS 15: Conservación y uso sostenible de los ecosistemas (Meta 15.1), combate contra la desertificación (Meta 15.3), protección de la biodiversidad (Meta 15.5) e integración de los ecosistemas en las políticas de desarrollo (Meta 15.9).
- ODS 13: Aumento de la resiliencia frente al cambio climático (Meta 13.1) e incorporación de medidas climáticas en políticas nacionales (Meta 13.2).
- ODS 12: Gestión sostenible de los recursos naturales (Meta 12.2).
- ODS 2: Mejora de la sostenibilidad y la productividad agrícola (Meta 2.4).

---

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

- Las repuestas del sistema suelo-planta fueron complejas y dependieron sobre todo de las interacciones entre factores más que de sus efectos individuales, destacando la necesidad de estudiarlas en profundidad para mejorar el comportamiento de nuevas plantaciones de viñedo frente al cambio climático y definir estrategias de manejo sostenibles y resilientes.
- Los resultados confirman que las cubiertas vegetales leguminosas mejoraron la salud del suelo; no obstante, tantos estos efectos como los observados sobre el crecimiento y nutrición de la vid dependieron de la disponibilidad de agua y la variedad, sin llegar a mostrar ventajas claras frente al suelo desnudo.
- Contrario a lo esperado, las cubiertas vegetales no afectaron negativamente el crecimiento ni la nutrición de la vid bajo estrés hídrico, aportando beneficios como mejorar la salud del suelo y reducir la erosión, reforzando su papel como herramienta sostenible para aumentar la resiliencia de nuevas plantaciones de viñedo frente a la escasez de agua. Bajo riego óptimo, además, pueden ayudar a controlar el vigor y potencialmente mejorar la calidad.
- A pesar de la corta duración, se observaron diferencias significativas en múltiples variables, donde la vid respondió de forma más rápida y evidente que la del suelo; destacando que las combinaciones Tempranillo-Trifolium (riego óptimo) y Airén-Medicago (riego reducido), resultaron más favorables, aunque su respuesta varió según las propiedades evaluadas.
- Los resultados aportan información valiosa y novedosa para mejorar el manejo de nuevas plantaciones con cubiertas vegetales, aunque se basan exclusivamente en parámetros y condiciones específicas del ensayo. Para confirmar su solidez y aplicabilidad, así como la persistencia de las tendencias con la evolución del sistema, es esencial realizar estudios más amplios y prolongados (2-3 años) en condiciones de campo, no confinadas y bajo una diversidad de contextos edafoclimáticos.

---

---

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J., Marín, D., Imbert, B., Virto, I., Garbisu, C., & Santesteban, L. G. (2023). Under-vine cover crops: Impact on physical and biological soil proprieties in an irrigated Mediterranean vineyard. *Scientia Horticulturae*, 311, 111797. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111797>
- Abad, J., Mendoza, I. H. de, Marín, D., Orcaray, L., & Santesteban, L. G. (2021a). Cover crops in viticulture. A systematic review (1): Implications on soil characteristics and biodiversity in vineyard. *OENO One*, 55(1), Article 1. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.1.3599>
- Abad, J., Mendoza, I. H. de, Marín, D., Orcaray, L., & Santesteban, L. G. (2021b). Cover crops in viticulture. A systematic review (2): Implications on vineyard agronomic performance. *OENO One*, 55(2), Article 2. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.2.4481>
- Afi. (2023). *La relevancia económica y social del sector vitivinícola en España, 2023*. [https://interprofesionaldelvino.es/wp-content/uploads/2023/11/Informe\\_relevancia\\_economica\\_y\\_social\\_del\\_sector\\_vitivinicola\\_en-Espana\\_2023\\_OIVE\\_vf.pdf](https://interprofesionaldelvino.es/wp-content/uploads/2023/11/Informe_relevancia_economica_y_social_del_sector_vitivinicola_en-Espana_2023_OIVE_vf.pdf)
- Alaoui, A., Barão, L., Ferreira, C. S. S., & Hessel, R. (2022). An Overview of Sustainability Assessment Frameworks in Agriculture. *Land*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/land11040537>
- Álvarez, J. C., & Villarías, J. L. (2012). *Decálogo del Viticultor: Cuidados de la viña para obtener grandes vinos*. EDICIONES AGROTÉCNICAS.
- Anderson, J. P. E., & Domsch, K. H. (1978). A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 10(3), 215-221. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
- Bahram, M., Hildebrand, F., Forslund, S. K., Anderson, J. L., Soudzilovskaia, N. A., Bodegom, P. M., Bengtsson-Palme, J., Anslan, S., Coelho, L. P., Harend, H., Huerta-Cepas, J., Medema, M. H., Maltz, M. R., Mundra, S., Olsson, P. A., Pent, M., Pöhlme, S., Sunagawa, S., Ryberg, M., ... Bork, P. (2018). Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature*, 560(7717), 233-237. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0386-6>
- Bartzen, B. T., Hoelscher, G. L., Ribeiro, L. L. O., & Seidel, E. P. (2019). How the Soil Resistance to Penetration Affects the Development of Agricultural Crops? *Journal of Experimental Agriculture International*, 1-17. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2019/46589>
- Baumgartner, K., Steenwerth, K., & Veilleux, L. (2009). Cover-Crop Systems Affect Weed Communities in a California Vineyard. *Weed Science*, 56, 596-605. <https://doi.org/10.1614/WS-07-181.1>
- Belmonte, S. A., Celi, L., Stahel, R. J., Bonifacio, E., Novello, V., Zanini, E., & Steenwerth, K. L. (2018). Effect of Long-Term Soil Management on the Mutual Interaction Among Soil Organic Matter, Microbial Activity and Aggregate Stability in a Vineyard. *Pedosphere*, 28(2), 288-298. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60015-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60015-3)
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. En A. Klute (Ed.), *SSSA Book Series* (pp. 363-375). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Blavet, D., De Noni, G., Le Bissonnais, Y., Leonard, M., Maillo, L., Laurent, J. Y., Asseline, J., Leprun, J. C., Arshad, M. A., & Roose, E. (2009). Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*, 106(1), 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.010>
- Bouwer, H. (1986). Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. En *Methods of Soil Analysis* (pp. 825-844). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c32>
- 
-

- Bremner, J. M. (1965). Total Nitrogen. En *Methods of Soil Analysis* (pp. 1149-1178). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Brunetto, G., Lorensini, F., Ceretta, C. A., Avelar Ferreira, P. A., da Rosa Couto, R., De Conti, L., Nara Ciotta, M., Kulmann, M., Schneider, R. O., Michelon Somavilla, L., Tiecher, T. L., Giacomini, S. J., Bastos de Melo, G. W., & Videira de Abreu F. Carranca, C. L. (2017). Contribution of mineral N to young grapevine in the presence or absence of cover crops. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(3), 570-580. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000300002>
- Calvo de Anta, R., Luís, E., Febrero-Bande, M., Galiñanes, J., Macías, F., Ortiz, R., & Casás, F. (2020). Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma*, 370, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 29(4), 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007>
- Chaves, M. M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J. M., Santos, T., Regalado, A. P., Rodrigues, M. L., & Lopes, C. M. (2010). Grapevine under deficit irrigation: Hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*, 105(5), 661-676. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq030>
- Chourasiya, D., Gupta, M. M., Sahni, S., Oehl, F., Agnihotri, R., Buade, R., Maheshwari, H. S., Prakash, A., & Sharma, M. P. (2021). Unraveling the AM fungal community for understanding its ecosystem resilience to changed climate in agroecosystems. *Symbiosis*, 84(3), 295-310. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00761-9>
- Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P.-A., & Zhao, W. (2018). Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Reviews*, 185, 357-373. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>
- Deguchi, S., Uozumi, S., Touno, E., Kaneko, M., & Tawarayama, K. (2012). Arbuscular mycorrhizal colonization increases phosphorus uptake and growth of corn in a white clover living mulch system. *Soil Science and Plant Nutrition*, 58(2), 169-172. <https://doi.org/10.1080/00380768.2012.662697>
- DeVetter, L. W., Dille, C. A., & Nonnecke, G. R. (2015). Mulches Reduce Weeds, Maintain Yield, and Promote Soil Quality in a Continental-Climate Vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(1), 54-64. <https://doi.org/10.5344/ajev.2014.14064>
- Droulia, F., & Charalampopoulos, I. (2022). A Review on the Observed Climate Change in Europe and Its Impacts on Viticulture. *Atmosphere*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/atmos13050837>
- European Court of Auditors. (2018). *Combating desertification in the EU: a growing threat in need of more action*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2865/425778>
- FAO. (2016). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016: Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria*. Food and Agriculture Organization. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0552bb86-fe45-4528-95cc-911dabda0fb5/content>
- FAO. (2022). *Conservation Agriculture*. Food and Agriculture Organization. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/024e17be-9fad-4556-be94-a8e2f229023d/content>
- FAO, & ITPS. (2016). *Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS)—Resumen Técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo.

- 
- FEGA. (2024). *Ecorregímenes | Portal Web del FEGA*. <https://www.fega.gob.es/es/pepac-2023-2027/ayudas-directas/ecorregimenes>
- Fernández, L. H., & Hidalgo, J. (2019). *Tratado de viticultura. Volumen I y II*. Mundiprensa.
- Fleishman, S. M., Eissenstat, D. M., Hoffer, G. M., & Centinari, M. (2023). Cover crops and a devigorating rootstock can impart substantial agroecosystem services to high-resource vineyards: A multi-year study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *344*, 108287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108287>
- Gabriel, J. L., García-González, I., Quemada, M., Martin-Lammerding, D., Alonso-Ayuso, M., & Hontoria, C. (2021). Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. *Geoderma*, *386*, 114911. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114911>
- García-Díaz, A., Marqués, M. J., Sastre, B., & Bienes, R. (2018). Labile and stable soil organic carbon and physical improvements using groundcovers in vineyards from central Spain. *Science of The Total Environment*, *621*, 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.240>
- García-Palacios, P., & Chen, J. (2022). Emerging relationships among soil microbes, carbon dynamics and climate change. *Functional Ecology*, *36*(6), 1332-1337. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14028>
- Gattullo, C. E., Mezzapesa, G. N., Stellacci, A. M., Ferrara, G., Occhiogrosso, G., Petrelli, G., Castellini, M., & Spagnuolo, M. (2020). Cover Crop for a Sustainable Viticulture: Effects on Soil Properties and Table Grape Production. *Agronomy*, *10*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091334>
- Gobbi, A., Acedo, A., Imam, N., Santini, R. G., Ortiz-Álvarez, R., Ellegaard-Jensen, L., Belda, I., & Hansen, L. H. (2022). A global microbiome survey of vineyard soils highlights the microbial dimension of viticultural terroirs. *Communications Biology*, *5*(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03202-5>
- Gong, S., Zhang, T., Guo, R., Cao, H., Shi, L., Guo, J., & Sun, W. (2015). Response of soil enzyme activity to warming and nitrogen addition in a meadow steppe. *Soil Research*, *53*, 242-252. <https://doi.org/10.1071/SR14140>
- Gorgia, P., & Tsikou, D. (2025). Tripartite Symbiosis Between Legumes, Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Nitrogen Fixing Rhizobia: Interactions and Regulation. *Plant, Cell & Environment*, *n/a*(n/a). <https://doi.org/10.1111/pce.15341>
- Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, *4*(1), 4-18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>
- Hatch, T. A., Hickey, C. C., & Wolf, T. K. (2011). Cover Crop, Rootstock, and Root Restriction Regulate Vegetative Growth of Cabernet Sauvignon in a Humid Environment. *American Journal of Enology and Viticulture*, *62*(3), 298-311. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.11001>
- Holland, J. M. (2004). The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: Reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *103*(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.018>
- Ibáñez, S., Andreu, L., Garcia-Muñoz, S., Giralt, L., Ramírez Pérez, P., Sagüés, A., Yuste, J., & Miras-Avalos, J. (2013). *Guía de mantenimiento del suelo en viñedo mediante cubiertas vegetales*.
- iNaturalist Mexico. (2024). *Trifolium subterraneum*. <https://mexico.inaturalist.org/taxa/60201-Trifolium-subterraneum>
- IPBES. (2018). *The IPBES assessment report on land degradation and restoration*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237393>
-

- 
- ISO 20130. (2018). *Soil quality—Measurement of enzyme activity patterns in soil samples using colorimetric substrates in micro-well plates*. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/70/67074.html>
- Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S. P., Vautard, R., Donnelly, C., Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., Damm, A., Sakalli, A., & van Vliet, M. T. H. (2018). Climate Impacts in Europe Under +1.5°C Global Warming. *Earth's Future*, 6(2), 264-285. <https://doi.org/10.1002/2017EF000710>
- Javaid, A. (2010). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Nitrogen Fixation in Legumes. En M. S. Khan, J. Musarrat, & A. Zaidi (Eds.), *Microbes for Legume Improvement* (pp. 409-426). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-211-99753-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-211-99753-6_17)
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3), 319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Kaye, J., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Keller, M. (2025). *The Science of Grapevines* (4th ed). Elsevier Science & Technology.
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate Stability and Size Distribution. En *Methods of Soil Analysis* (pp. 425-442). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Knorr, W., Prentice, I. C., House, J. I., & Holland, E. A. (2005). Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433(7023), 298-301. <https://doi.org/10.1038/nature03226>
- Köppen, W., & Geiger, R. (1936). Das geographische System der Klimat. *Handbuch der Klimatologie*, 1, 46.
- Lal, R. (2021). Soil management for carbon sequestration. *South African Journal of Plant and Soil*, 38(3), 231-237. <https://doi.org/10.1080/02571862.2021.1891474>
- Lampkin, N. (1998). *Agrucultura Ecológica*. Mundi-Prensa.
- Lipiec, J., & Håkansson, I. (2000). Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil and Tillage Research*, 53, 87-94. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00094-X)
- Liu, A., Ma, B. L., & Bomke, A. A. (2005). Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides. *Soil Science Society of America Journal*, 69(6), 2041-2048. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0032>
- Liu, D., Chen, Q., Zhang, P., Chen, D., & Howell, K. S. (2020). The Fungal Microbiome Is an Important Component of Vineyard Ecosystems and Correlates with Regional Distinctiveness of Wine. *mSphere*, 5(4), 10.1128/msphere.00534-20. <https://doi.org/10.1128/msphere.00534-20>
- MAPA. (s. f.). *Material vegetal. Portainjertos*. <https://www.mapa.gob.es/app/MaterialVegetal/fichaMaterialVegetal.aspx?idFicha=515>
- MAPA. (2024). *El cultivo de la vid en España*. <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/publicaciones-archivo-biblioteca/archivo/Cultivo.aspx>
- Marques, M. J., Bienes, R., Cuadrado, J., Ruiz-Colmenero, M., Barbero-Sierra, C., & Velasco, A. (2015). Analysing Perceptions Attitudes and Responses of Winegrowers about Sustainable Land Management in Central Spain. *Land Degradation & Development*, 26(5), 458-467. <https://doi.org/10.1002/ldr.2355>
-

- Márquez-García, F., González-Sánchez, E. J., Castro-García, S., & Ordóñez-Fernández, R. (2013). Improvement of soil carbon sink by cover crops in olive orchards under semiarid conditions. Influence of the type of soil and weed. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013112-3558>
- Martínez-Vidaurre, J. M., Pérez-Álvarez, E. P., García-Escudero, E., Ramos, M. C., & Peregrina, F. (2024). Differences in Soil Water Holding Capacity and Available Soil Water along Growing Cycle Can Explain Differences in Vigour, Yield, and Quality of Must and Wine in the DOCa Rioja. *Horticulturae*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040320>
- May, G. D., & Dixon, R. A. (2004). Medicago truncatula. *Current Biology*, 14(5), R180-R181. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2004.02.013>
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15(12), 1409-1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2008). *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación*. <https://www.unccd.int/sites/default/files/naps/spain-spa2008.pdf>
- Mocali, S., Kuramae, E. E., Kowalchuk, G. A., Fornasier, F., & Priori, S. (2020). Microbial Functional Diversity in Vineyard Soils: Sulfur Metabolism and Links With Grapevine Plants and Wine Quality. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00075>
- Monteiro, A., & Lopes, C. M. (2007). Influence of cover crop on water use and performance of vineyard in Mediterranean Portugal. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121(4), 336-342. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.11.016>
- Morales, F., Antolín, M. C., Aranjuelo, I., Goicoechea, N., & Pascual, I. (2016). From vineyards to controlled environments in grapevine research: Investigating responses to climate change scenarios using fruit-bearing cuttings. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 28(2), 171-191. <https://doi.org/10.1007/s40626-016-0065-7>
- Morlat, R., & Chaussod, R. (2008). Long-term Additions of Organic Amendments in a Loire Valley Vineyard. I. Effects on Properties of a Calcareous Sandy Soil. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59(4), 353-363. <https://doi.org/10.5344/ajev.2008.59.4.353>
- Morlat, R., & Jacquet, A. (2003). Grapevine Root System and Soil Characteristics in a Vineyard Maintained Long-term with or without Interrow Sward. *American Journal of Enology and Viticulture*, 54(1), 1-7. <https://doi.org/10.5344/ajev.2003.54.1.1>
- Morugán-Coronado, A., Pérez-Rodríguez, P., Insolia, E., Soto-Gómez, D., Fernández-Calviño, D., & Zornoza, R. (2022). The impact of crop diversification, tillage and fertilization type on soil total microbial, fungal and bacterial abundance: A worldwide meta-analysis of agricultural sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 329, 107867. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107867>
- Nair, R. M., Howie, J. H., & Delalande, M. (2006). Medicago truncatula cultivars. *The Medicago truncatula handbook*. <http://www.noble.org/MedicagoHandbook>. <https://www.academia.edu/download/92066055/m-truncatula-cultivars.pdf>
- Nichols, P. G. H., Foster, K. J., Piano, E., Pecetti, L., Kaur, P., Ghamkhar, K., & Collins, W. J. (2013). Genetic improvement of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.). 1. Germplasm, traits and future prospects. *Crop and Pasture Science*, 64(4), 312-346. <https://doi.org/10.1071/CP13118>
- Novara, A., Cerda, A., Barone, E., & Gristina, L. (2021). Cover crop management and water conservation in vineyard and olive orchards. *Soil and Tillage Research*, 208, 104896. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104896>

- Novara, A., Gristina, L., Saladino, S. S., Santoro, A., & Cerdà, A. (2011). Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. *Soil and Tillage Research*, *117*, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.007>
- Novara, A., La Mantia, T., Barbera, V., & Gristina, L. (2012). Paired-site approach for studying soil organic carbon dynamics in a Mediterranean semiarid environment. *CATENA*, *89*(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.09.008>
- OIV. (2023). *Actualidad de la coyuntura del sector vitivinícola mundial en 2022*. [https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/OIV\\_Actualidad\\_de\\_la\\_coyuntura\\_del\\_sector\\_vitivinicola\\_mundial\\_en\\_2022\\_0.pdf](https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/OIV_Actualidad_de_la_coyuntura_del_sector_vitivinicola_mundial_en_2022_0.pdf)
- Olmstead, M., Miller, T. W., Bolton, C. S., & Miles, C. A. (2012). *Weed Control in a Newly Established Organic Vineyard*. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.22.6.757>
- Peregrina, F., Larrieta, C., Ibáñez, S., & García-Escudero, E. (2010b). Labile Organic Matter, Aggregates, and Stratification Ratios in a Semiarid Vineyard with Cover Crops. *Soil Science Society of America Journal*, *74*(6), 2120-2130. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0081>
- Peregrina, F., López, D., Zaballa, O., Villar, M. T., González, G., & García-Escudero, E. (2010a). Calidad de los suelos de viñedo en la Denominación de Ori-gen Rioja: Índice de riesgo de encostramiento (FAO-PNUMA), contenido de carbono orgánico y relación con la fertilidad del suelo. *Revista de Ciências Agrárias*, *33*(1), Article 1. <https://doi.org/10.19084/rca.15845>
- Pérez-Álvarez, E. P., García-Escudero, E., & Peregrina, F. (2015). Soil Nutrient Availability under Cover Crops: Effects on Vines, Must, and Wine in a Tempranillo Vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture*, *66*(3), 311-320. <https://doi.org/10.5344/ajev.2015.14092>
- Pérez-Álvarez, E. P., Intrigliolo Molina, D. S., Vivaldi, G. A., García-Esparza, M. J., Lizama, V., & Álvarez, I. (2021). Effects of the irrigation regimes on grapevine cv. Bobal in a Mediterranean climate: I. Water relations, vine performance and grape composition. *Agricultural Water Management*, *248*, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106772>
- Pomarici, E. (2016). Recent trends in the international wine market and arising research questions. *Wine Economics and Policy*, *5*(1), 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2016.06.001>
- Prăvălie, R., Patriche, C., Borrelli, P., Panagos, P., Roșca, B., Dumitrașcu, M., Nita, I.-A., Săvulescu, I., Birsan, M.-V., & Bandoc, G. (2021). Arable lands under the pressure of multiple land degradation processes. A global perspective. *Environmental Research*, *194*, 110697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110697>
- Ramírez, P., & Lasheras, J. M. (2016). *Guía de cubiertas vegetales en viñedo*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera - Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/406aee3d-31f0-4f40-8415-9526cf178cf3>
- Requier-Desjardins, M., & Caron, P. (2005). *La Lutte Contre La Désertification: Un Bien Public Mondial Environnemental? Des Éléments de Réponse...*. Comité Scientifique Français de la Désertification CSFD.
- Rodrigo-Comino, J., Brevik, E. C., & Cerdà, A. (2018). The age of vines as a controlling factor of soil erosion processes in Mediterranean vineyards. *Science of The Total Environment*, *616-617*, 1163-1173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.204>
- Román-Vázquez, J., Moreno-García, M., Repullo, M. A., de Torres, R., Veroz-González, O., Blanco, B. A. P., Kassam, A., Basch, G., & González-Sánchez, E. J. (2023). *Conservation Agriculture: Moving towards the preservation and improvement of biodiversity in agricultural ecosystems*. [https://ecaf.org/wp-content/uploads/2023/09/CA\\_Biodiversity\\_report\\_ECAF.pdf](https://ecaf.org/wp-content/uploads/2023/09/CA_Biodiversity_report_ECAF.pdf)

- Romero, H., Pott, D. M., Vallarino, J. G., & Osorio, S. (2021). Metabolomics-Based Evaluation of Crop Quality Changes as a Consequence of Climate Change. *Metabolites*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/metabo11070461>
- Romero, P., Navarro, J. M., & Ordaz, P. B. (2022). Towards a sustainable viticulture: The combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. A review and update. *Agricultural Water Management*, 259, 107216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107216>
- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., Eldridge, D. J., & Marques, M. J. (2013). Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *CATENA*, 104, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.007>
- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., & Marques, M. J. (2011). Soil and water conservation dilemmas associated with the use of green cover in steep vineyards. *Soil and Tillage Research*, 117, 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.004>
- Ryan, J., Pala, M., Masri, S., Singh, M., & Harris, H. (2008). Rainfed wheat-based rotations under Mediterranean conditions: Crop sequences, nitrogen fertilization, and stubble grazing in relation to grain and straw quality. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.05.008>
- Sáenz-Romo, M. G., Veas-Bernal, A., Martínez-García, H., Campos-Herrera, R., Ibáñez-Pascual, S., Martínez-Villar, E., Pérez-Moreno, I., & Marco-Mancebón, V. S. (2019). Ground cover management in a Mediterranean vineyard: Impact on insect abundance and diversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283, 106571. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106571>
- Sánchez-Monge, E. (2001). *Diccionario de plantas de interés agrícola*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones.
- Sanmartin, C., Venturi, F., Taglieri, I., Ferroni, G., Scalabrelli, G., Narkabulova, N., & Zinnai, A. (2017). Restoration of an old vineyard by replanting of missing vines: Effects on grape production and wine quality. *Agrochimica*, 61, 154-163. <https://doi.org/10.12871/00021857201725>
- Santesteban, L. G., & Royo, J. B. (2017). Importancia del manejo en los primeros años del viñedo para mejorar su comportamiento frente a enfermedades. *Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal*, 288, 60-63.
- Santillán, D., Iglesias, A., La Jeunesse, I., Garrote, L., & Sotes, V. (2019). Vineyards in transition: A global assessment of the adaptation needs of grape producing regions under climate change. *Science of The Total Environment*, 657, 839-852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.079>
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., Costafreda-Aumedes, S., Kartschall, T., Menz, C., Molitor, D., Junk, J., Beyer, M., & Schultz, H. R. (2020). A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/app10093092>
- Sastre, B., Álvarez, B., Antón, O., Pérez, M. Á., Marques, M. J., Bienes, R., & García-Díaz, A. (2020). Groundcovers in Olive Groves in Semiarid Climates: Are They Always Beneficial? *Water*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w12082230>
- Scavo, A., Restuccia, A., Lombardo, S., Fontanazza, S., Abbate, C., Pandino, G., Anastasi, U., Onofri, A., & Mauromicale, G. (2020). Improving soil health, weed management and nitrogen dynamics by *Trifolium subterraneum* cover cropping. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(3), 18. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00621-8>

- Sharma, M. P., Grover, M., Chourasiya, D., Bharti, A., Agnihotri, R., Maheshwari, H. S., Pareek, A., Buyer, J. S., Sharma, S. K., Schütz, L., Mathimaran, N., Singla-Pareek, S. L., Grossman, J. M., & Bagyaraj, D. J. (2020). Deciphering the Role of Trehalose in Tripartite Symbiosis Among Rhizobia, Arbuscular Mycorrhizal Fungi, and Legumes for Enhancing Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. *Frontiers in Microbiology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.509919>
- Shukla, P. R., Skeg, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Diemen, S. van, Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J. P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., ... Malley, J. (Eds.). (2019). *Climate Change and Land: An Ipc Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, *79*(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Snapp, S. S., Swinton, S. M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J. R., Leep, R., Nyiraneza, J., & O'Neil, K. (2005). Evaluating Cover Crops for Benefits, Costs and Performance within Cropping System Niches. *Agronomy Journal*, *97*(1), 322-332. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0322a>
- Souza, A. M., Maciel, J. C., Barroso, G. M., Silva, R. S., Garraffoni, A. R. S., Neves, C. A., Soares, M. A., & Santos, J. B. (2021). Ecotoxicological effects of commercial herbicides on the reproductive system of aquatic arthropod *Limnocois submontandoni* (Hemiptera: Naucoridae). *Brazilian Journal of Biology*, *84*, e247487. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.247487>
- Steenwerth, K., & Belina, K. M. (2008). Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. *Applied Soil Ecology*, *40*(2), 359-369. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.06.006>
- Sulas, L., Mercenaro, L., Campesi, G., & Nieddu, G. (2017). Different Cover Crops Affect Nitrogen Fluxes in Mediterranean Vineyard. *Agronomy Journal*, *109*(6), 2579-2585. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0283>
- Sweet, R. M., & Schreiner, R. P. (2010). Alleyway Cover Crops Have Little Influence on Pinot noir Grapevines (*Vitis vinifera* L.) in Two Western Oregon Vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, *61*(2), 240-252. <https://doi.org/10.5344/ajev.2010.61.2.240>
- Tesic, D., Keller, M., & Hutton, R. J. (2007). Influence of Vineyard Floor Management Practices on Grapevine Vegetative Growth, Yield, and Fruit Composition. *American Journal of Enology and Viticulture*, *58*(1), 1-11. <https://doi.org/10.5344/ajev.2007.58.1.1>
- Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K., & Wagg, C. (2012). Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *4*(5), 523-528. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.004>
- Tischelmayer, N. (2024). *Vid americana*. wein.plus. <https://glossaire.wein.plus/vid-americana-2>
- Trouvelot, S., Bonneau, L., Redecker, D., van Tuinen, D., Adrian, M., & Wipf, D. (2015). Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(4), 1449-1467. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0329-7>
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., Vandermeer, J., & Whitbread, A. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, *151*(1), 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.01.068>
- UPNA. (2024). *Trifolium subterraneum* L. Herbario de la Universidad Pública de Navarra. [https://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Trif\\_subt\\_p.htm](https://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Trif_subt_p.htm)

- 
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). Microbial biomass measurements in forest soils: Determination of *k*C values and tests of hypotheses to explain the failure of the chloroform fumigation-incubation method in acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 689-696. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90050-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90050-2)
- Virto, I., Imaz, M. J., Fernández-Ugalde, O., Urrutia, I., Enrique, A., & Bescansa, P. (2012). Soil quality evaluation following the implementation of permanent cover crops in semi-arid vineyards. Organic matter, physical and biological soil properties. *SPANISH JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH*, 10, 1121-1132. <https://doi.org/10.5424/sjar/2012104-613-11>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method: *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Winkler, A. J. (1974). *General Viticulture* (J. A. Cook, W. M. Kliewer, L. A. Lider, & A. J. Winkler, Eds.). University of California Press. <https://doi.org/10.1525/9780520353183>
- Yakovchenko, V. P., & and Sikora, L. J. (1998). Modified dichromate method for determining low concentrations of extractable organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(3-4), 421-433. <https://doi.org/10.1080/00103629809369955>