



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Curso Académico 2024-2025

Trabajo de Fin
de Máster

Evaluación de los efectos de diferentes *mulching* sobre la
calidad del suelo y la nutrición de las plantas en horticultura
orgánica de invernadero

Autor

Santiago Feijoó-Montenegro Dopazo

Carmela Monterroso Martínez, Profesora do Departamento de Edafoloxía e Química Agrícola da Universidade de Santiago de Compostela,

INFORMA:

Que Santiago Feijoó-Montenegro Dopazo realizou baixo a súa dirección e a de Javier Montalvo, director da Fundación Matrix, o traballo titulado “*Evaluación de los efectos de diferentes mulching sobre la calidad del suelo y la nutrición de las plantas en horticultura orgánica de invernadero*” co obxectivo de cubrir os créditos correspondentes ao Traballo Fin de Máster e obter o título de Máster Oficial en Enxeñaría Ambiental da Universidade de Santiago de Compostela.

Santiago de Compostela, 11 de xuño de 2025

A TITORA

O ALUMNO

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS.....	6
3. METODOLOGÍA	7
3.1. Diseño experimental.....	7
3.2. Toma de muestras	9
3.3. Caracterización de los suelos	9
3.4. Determinación de los nutrientes de las muestras vegetales	12
3.5. Tratamiento de datos	12
4. RESULTADOS	13
4.1. Caracterización del suelo.....	13
4.2. Efecto del acolchado sobre las propiedades del suelo	15
4.3. Efecto del acolchado sobre el contenido de nutrientes de los cultivos.....	20
4.3.1. <i>Lechuga verde</i>	20
4.3.2. <i>Lechuga roja</i>	22
4.3.3. <i>Pimiento</i>	24
4.3.4. <i>Tomate cherry</i>	27
5. DISCUSIÓN	30
5.1. Efecto del acolchado sobre las propiedades del suelo	31
5.2. Efecto del acolchado sobre el contenido de nutrientes de los cultivos.....	33
6. CONCLUSIONES.....	36
7. BIBLIOGRAFÍA.....	37

RESUMEN

La horticultura orgánica de invernadero es una práctica cada vez más extendida, que necesita de métodos sostenibles y de bajo coste para optimizar la gestión del suelo y mejorar el rendimiento de los cultivos. El acolchado o *mulching* con tejidos geotextiles es una práctica muy utilizada para el control de las malas hierbas y para la conservación de la humedad del suelo. Sin embargo, resulta una importante fuente de contaminación por microplásticos. Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación que busca optimizar la gestión agronómica en la horticultura orgánica de invernadero en el “Baixo Miño”, aplicando prácticas sostenibles para reducir el uso de fertilizantes y fitosanitarios, además de mejorar la eficiencia de uso del agua y la producción. Para ello, se evaluaron los efectos de diferentes tipos de acolchados (geotextil, corteza de pino y helecho) sobre la calidad del suelo y la nutrición de cultivos hortícolas. Se caracterizó el suelo de cultivo y se determinó su contenido de humedad, pH, cationes de cambio y capacidad de intercambio catiónico, fósforo disponible, carbono total, carbono lábil, nitrógeno biodisponible y composición de la disolución del suelo. También se determinó el contenido de macro y micronutrientes de las especies cultivadas (lechuga verde, lechuga roja, pimiento y tomate cherry). Los resultados revelaron la viabilidad del *mulching* de corteza de pino como una técnica alternativa y sostenible a la malla geotextil para la horticultura orgánica.

1. INTRODUCCIÓN

La horticultura orgánica en ambientes controlados, como es el caso de los invernaderos, ha ido cobrando cada vez más importancia a nivel global ya que permite optimizar la producción y la calidad de los cultivos, incluso bajo condiciones ambientales adversas.

En España, la superficie agraria utilizada (SAU) supone en torno a 23,9 millones de hectáreas según el último Censo Agrario publicado en el año 2020 por el Instituto Nacional de Estadística (Tabla 1) (INE. *Instituto Nacional de Estadística*, s. f.). Los invernaderos ocupan en torno a unas 65000 ha, lo que supone tan solo un 0,28% con respecto a la totalidad de la SAU. Sin embargo, resulta relevante el gran crecimiento que ha experimentado este tipo de agricultura en comparación con los datos reflejados en el anterior Censo Agrario, del año 2009, llegando a incrementarse en un 42%. La mayor parte de estos invernaderos se encuentran concentrados en el suroeste peninsular y en zonas del litoral, tanto del mediterráneo como de comarcas costeras de Galicia.

Tabla 1. Evolución de la composición de la SAU, según grandes cultivos. Fuente: Censo Agrario (INE).

Tipo de uso	Censo 2009	Censo 2020	Diferencia (ha)	% Variación
Tierra arable	11.242.408	11.655.762	413.354	3,68
Cultivos leñosos	4.084.141	4.657.182	573.041	14,03
Pastos permanentes	8.377.389	7.533.082	-844.307	10,08
Huertos	3.050	2.731	-319	10,47
SAU al aire libre	23.706.988	23.848.757	141.769	0,60
SAU en invernadero	45.700	64.925	19.225	42,07
SAU total	23.752.688	23.913.682	160.994	0,68

Sin embargo, a pesar de su rápida extensión en los últimos años, factores como el manejo de la temperatura, el control de la humedad del suelo, la utilización de fertilizantes y fitosanitarios o el crecimiento de hierbas adventicias (denominadas en adelante malas hierbas) continúan siendo grandes retos a los que se debe enfrentar la horticultura de invernadero. En este contexto, la utilización de técnicas como el acolchado o *mulching* se han convertido en estrategias comunes y eficaces a la hora de solventar estos desafíos, ofreciendo beneficios tanto agronómicos como ambientales.

El acolchado o *mulching* es una técnica que consiste en cubrir la superficie del suelo con materiales que actúan a modo de barrera física. Numerosos estudios han puesto de manifiesto

los beneficios que ofrece esta técnica, limitando en gran medida el crecimiento de las malas hierbas y contribuyendo a la regulación térmica, la conservación de la humedad, la formación de agregados, el control de la erosión y la fertilidad del suelo (Chalker-Scott, 2007; El-Beltagi *et al.*, 2022; Mulumba & Lal, 2008). Los acolchados también permiten reducir el uso de pesticidas y la frecuencia de riego de los cultivos, contribuyendo a un mejor aprovechamiento del agua y propiciando una producción más sostenible (Thakur & Kumar, 2021).

Los efectos del *mulching* pueden variar en función de diversos factores como el tipo del suelo, sus características edáficas, el clima de la zona, el cultivo y el material utilizado para el acolchado (Chalker-Scott, 2007). Estos materiales se pueden clasificar principalmente en dos grandes grupos: orgánicos e inorgánicos. Los acolchados de carácter orgánico se obtienen a partir de residuos como restos vegetales, paja, compost, cortezas de árboles o helechos, entre otros (Thakur & Kumar, 2021). Estos acolchados proporcionan beneficios adicionales al suelo, incrementando la retención de agua, el contenido en materia orgánica y la biodisponibilidad de nutrientes (Rossi *et al.*, 2024). Los acolchados obtenidos a partir de paja de cereales son ampliamente utilizados en un gran número de cultivos debido a que incrementan la fijación del nitrógeno en el suelo por parte de microorganismos, reducen su lixiviación e impiden el crecimiento de malas hierbas (Hooker *et al.*, 2008; Thakur & Kumar, 2021). Sin embargo, algunos estudios han demostrado que los acolchados orgánicos pueden competir con las plantas por la captación de los nutrientes y el agua, afectando negativamente al crecimiento de los cultivos (Griffin *et al.*, 2007).

Por otra parte, los acolchados inorgánicos consisten principalmente en gravas, rocas, láminas plásticas y mallas geotextiles. Estos acolchados se caracterizan por su elevada durabilidad y eficiencia, incrementando la producción de los cultivos, la retención de agua del suelo e impidiendo el crecimiento de las malas hierbas (Sonu *et al.*, 2023; Thakur & Kumar, 2021). Además, evitan la competencia por la obtención de nutrientes y recursos originada por los acolchados de origen orgánico. Entre los acolchados inorgánicos más utilizados se encuentran las láminas de polietileno negro, las láminas blancas transparentes y las láminas negras perforadas, entre otros (Thakur & Kumar, 2021). La mayoría de estos acolchados inorgánicos no son biodegradables, por lo que deben ser retirados y sustituidos cada cierto tiempo.

La utilización de acolchados inorgánicos en la agricultura de invernadero puede convertirse en una importante fuente de contaminación ambiental. La exposición prolongada a las condiciones ambientales como la radiación ultravioleta, la humedad o los cambios de temperatura, sumado

a los procesos de degradación química y a la acción de los microorganismos, puede descomponer estos acolchados en partículas más pequeñas, formando microplásticos (Ramanayaka *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2022). La acumulación de los microplásticos en el suelo afecta negativamente a su estructura, reduciendo la estabilidad y la capacidad de formación de agregados, lo que dificulta la retención de agua y nutrientes (Wang *et al.*, 2023). Los microplásticos también influyen en el comportamiento de diversas sustancias químicas comúnmente empleadas en la agricultura, tales como pesticidas y fertilizantes, así como en otros contaminantes orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Ramanayaka *et al.*, 2023). Además, los microplásticos pueden afectar a las diferentes comunidades de microorganismos (hongos, bacterias, etc.) presentes en el suelo, alterando su actividad metabólica y repercutiendo negativamente en la calidad del suelo (Shen *et al.*, 2023).

Por otra parte, los procesos de lixiviación y escorrentía pueden facilitar la dispersión de los microplásticos en cuerpos de agua superficiales y acuíferos. El reducido tamaño de los microplásticos facilita su ingestión por parte de los organismos acuáticos, lo que afecta negativamente a su actividad fisiológica (Issac & Kandasubramanian, 2021). Además, la acumulación de los microplásticos a lo largo de las redes tróficas puede presentar un efecto potencial negativo para la fauna y, en última instancia, para la salud humana (Blackburn & Green, 2022). Por ello, el desarrollo de acolchados plásticos biodegradables se ha visto incrementado en los últimos años, como una alternativa a los plásticos tradicionales (Serrano-Ruiz *et al.*, 2021; Touchaleaume *et al.*, 2016). Sin embargo, diversos factores técnicos (durabilidad, biodegradabilidad de los materiales, compatibilidad con los diferentes cultivos), económicos (alto coste de los materiales) y normativos dificultan su implementación inmediata y generalizada.

En este contexto, y ante una creciente expansión de la agricultura intensiva de invernadero en el territorio español, surge la necesidad de buscar alternativas sostenibles a los acolchados tradicionales, capaces de aportar los beneficios que supone esta técnica sin derivar en la aparición de microplásticos contaminantes. Dentro del grupo de los acolchados inorgánicos, la malla geotextil se utiliza de forma extendida en la horticultura de invernadero. Los geotextiles incrementan la humedad del suelo y lo protegen frente a la erosión, evitando también el crecimiento de malas hierbas. Además, a diferencia de los acolchados plásticos convencionales, permiten la infiltración natural del agua y la recarga hídrica de los suelos, evitando su recalentamiento (Giménez Morera, 2010). Sin embargo, su comportamiento frente a acolchados orgánicos como la corteza de pino triturada, utilizada por su alta disponibilidad y

bajo coste, o frondes de helecho común triturados, una potencial alternativa orgánica menos estudiada (Taylor & Thomson, 1998), no ha sido suficientemente explorado en la horticultura de invernadero.

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación llevado a cabo en colaboración con la Fundación Matrix, Investigación y Desarrollo Sostenible, que busca optimizar la gestión agronómica en la horticultura orgánica de invernadero en la comarca del “Baixo Miño”, aplicando prácticas sostenibles para reducir el uso de fertilizantes y fitosanitarios, además de mejorar la eficiencia del uso del agua y productividad de los cultivos. La hipótesis de partida es que, si bien la malla geotextil puede ofrecer mejores resultados en el control de malas hierbas, la producción de cultivos y la durabilidad a largo plazo, ciertos acolchados de origen orgánico como la corteza de pino o el helecho pueden presentar ventajas en términos de sostenibilidad y coste, contribuyendo a un modelo de economía circular y llegando a ser tan efectivos como el acolchado geotextil.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar la efectividad del uso de biomateriales (corteza de pino y helecho común) como técnicas de *mulching* alternativas a la malla geotextil en la horticultura orgánica de invernadero. Para ello, se realizó un ensayo de producción en invernadero de cuatro cultivos hortícolas (lechuga verde, lechuga roja, pimiento y tomate cherry) con tres tipos de acolchados (malla geotextil, corteza de pino y helecho), utilizando áreas sin acolchado como control. Los objetivos específicos consisten en:

- Caracterizar los suelos de invernadero y analizar el efecto de los distintos acolchados sobre las propiedades del suelo, tras un ciclo de cultivo.
- Determinar el contenido de macro y micronutrientes en tejidos vegetales (hojas y frutos) de las distintas especies hortícolas en el momento de la cosecha.
- Comparar y establecer relaciones entre las especies cultivadas, las características de los suelos de cultivo y el efecto de los acolchados sobre ellas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño experimental

El invernadero en el que se realizaron los ensayos forma parte de las instalaciones de la Fundación Matrix, situadas en Tabagón, en el municipio de O Rosal (Pontevedra), en la comarca del Baixo Miño (Figura 1).



Figura 1. Localización geográfica de Tabagón y vista general del invernadero en el que se realizaron los ensayos de cultivo. Fuente: Imágenes de Google.

La zona del Baixo Miño presenta un clima húmedo-cálido, con inviernos lluviosos y veranos cálidos con bajas precipitaciones. Las precipitaciones promedio anuales rondan los 1524 mm y la temperatura media anual observada ronda los 14.5 °C, según los datos obtenidos de la estación meteorológica de As Eiras (O Rosal) (MeteoGalicia, s. f.). La litología de la zona se compone mayoritariamente de sedimentos cuaternarios de origen fluvial y granitos, con una menor presencia de esquistos. Los suelos de la zona son ácidos ($\text{pH} = 4,5-5,5$), con texturas comprendidas entre franco a franco-arenosas y baja CICE dominada por Al^{3+} . El clima del suelo es mayoritariamente xérico típico, siendo perácuico típico en las zonas inundables (según las subdivisiones de Van Wambeke). En cuanto al uso del suelo y vegetación predominan los humedales (como juncales y cañaverales en las zonas más próximas al cauce del río Miño), los suelos de cultivo, los viñedos y las explotaciones forestales. Destacan grandes masas de coníferas, eucaliptales, matorrales y en menor medida especies frondosas (*Propiedades dos Solos de Galicia*, s. f.).

Antes del establecimiento del ensayo se realizó una preparación base del terreno que consistió en un fresado inicial del suelo y la formación de bancales en meseta, separados por pasillos de 1 m. Posteriormente, se realizó una fertilización de los bancales con *raspadallo* (abono orgánico de tojo combinado con estiércol). En cada bancal se establecieron 4 tratamientos: malla geotextil, corteza de pino triturada, helecho común triturado y control (sin acolchado). La malla sintética geotextil fue adquirida comercialmente, mientras que la corteza de pino (un material de bajo coste, altamente disponible en Galicia) fue cedida por la empresa Orgánica de Sustratos SL. Por otra parte, el helecho común (*Pteridium aquilinum* L.) se obtuvo a través de siega en pinares de la Comunidad de Montes Vecinales en Mano Común de Eiras, que posteriormente se secaron y trituraron antes de su aplicación.

En cada tratamiento se establecieron cuatro cultivos hortícolas por triplicado. Las especies y variedades hortícolas seleccionadas fueron las siguientes: lechuga verde (*Lactuca sativa* var. *Batavia*), lechuga roja (*L. sativa* var. *Rojica*), pimiento (*Capsicum annuum* var. *Meroño*) y tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. *Red Cherry*). De la superficie total ocupada en el invernadero, 9-10 m² se correspondieron con los bancales con cada tratamiento, mientras que 2-3 m² se correspondieron con los bancales de control, como se muestra en la Figura 2.

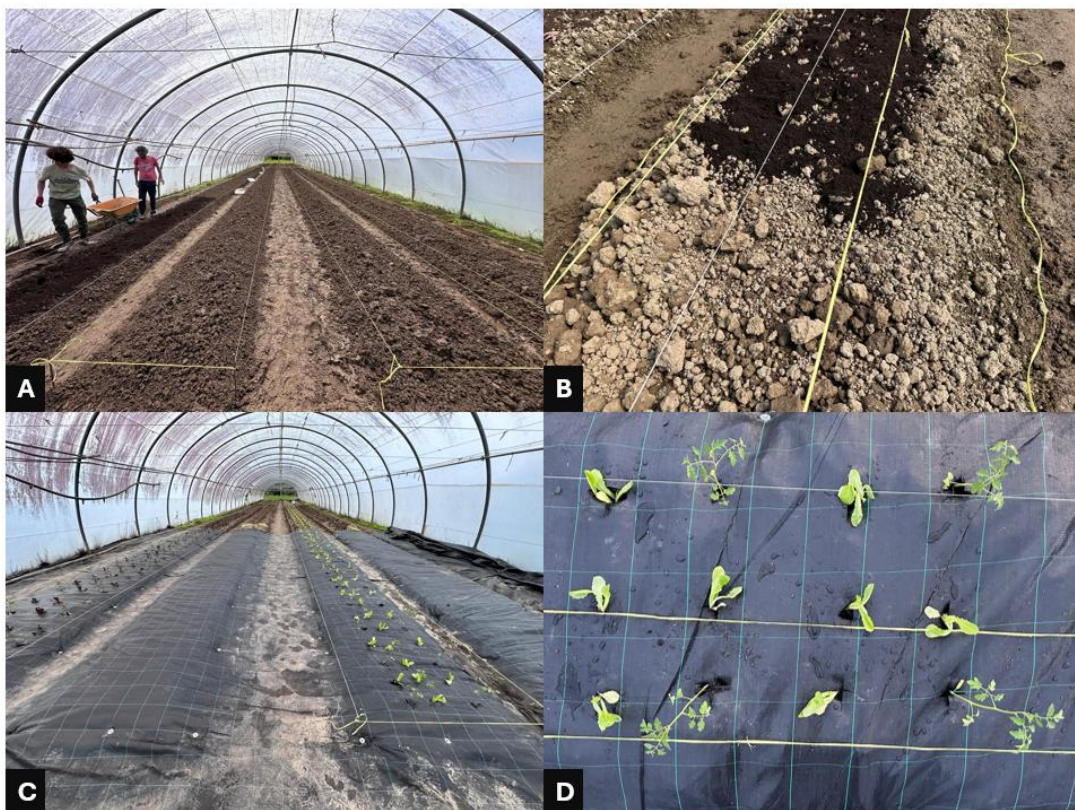


Figura 2. A) Vista general de bancales y acción de abonado con *raspadallo*. B) Detalle del bancal con abonado superficial. C) Vista general de bancales con malla geotextil. D) Bancal acolchado con geotextil y plantas. Imágenes cedidas por Javier Montalvo.

Los cultivos se dejaron crecer hasta su cosecha. Tras la cosecha se evaluó el efecto de los acolchados sobre la cobertura de malas hierbas y el rendimiento de los cultivos. Los resultados preliminares obtenidos fueron presentados en un trabajo previo (Montalvo *et al.*, 2024). Estos resultados mostraron que tanto el geotextil como la corteza de pino eran muy eficientes en el control de las malas hierbas y aumentaban considerablemente la producción de los cultivos (exceptuando el cultivo de pimiento en el caso de la corteza de pino), mientras que el acolchado con helecho produjo el efecto contrario.

3.2. Toma de muestras

Para el presente trabajo se realizaron dos campañas de campo para la toma de muestras durante los meses de mayo y octubre/noviembre de 2024. La primera campaña se realizó antes del establecimiento del ensayo y en ella se recolectaron 3 muestras compuestas de suelo, representativas de la superficie del invernadero dedicada al ensayo. La segunda campaña se realizó después del desarrollo de los cultivos establecidos en el ensayo (lechuga verde, lechuga roja, pimiento y tomate cherry) y justo antes de la cosecha. En esta campaña se recolectaron muestras de suelo para cada uno de los acolchados (geotextil, corteza de pino, helecho y control) en las áreas dedicadas al cultivo de pimiento y tomate cherry (3 réplicas de suelo compuesto por tratamiento), obteniéndose un total de 24 muestras de suelo. Además, se recolectaron muestras de tejidos vegetales (hoja y fruto) de las diferentes especies cultivadas en cada uno de los tratamientos (9 réplicas por tratamiento), obteniéndose un total de 114 muestras.

3.3. Caracterización de los suelos

Durante la primera campaña de muestreo se realizó una descripción del suelo *in situ*, siguiendo los criterios y definiciones indicados en la Soil Taxonomy. Además, se tomaron muestras inalteradas, utilizando cilindros de acero de 100 ml de volumen, que se trasladaron al laboratorio donde se realizaron los siguientes análisis:

Humedad, densidad aparente y porosidad. La muestra de suelo inalterado se pesó antes y después de secar a 40 °C y a 105 °C. El contenido de humedad se calculó por la diferencia de peso antes y después del secado, expresándose como el porcentaje de agua perdido durante el proceso. La densidad del suelo (g/cm^3) y la porosidad total (%) se calcularon mediante la relación entre peso seco (105 °C) y volumen (100 ml).

Las muestras secas a 40 °C se tamizaron por tamiz de malla 2 mm y en la fracción <2 mm se realizaron las siguientes determinaciones:

Distribución del tamaño de partícula y textura. Se realizó el análisis granulométrico siguiendo el Método Internacional, obteniéndose las siguientes fracciones: arena gruesa (0,5-2 mm), arena fina (0,05-0,5 mm), limo grueso (20-50 μm), limo fino (20-2 μm) y arcilla (<2 μm). La clasificación textural se realizó atendiendo a los criterios establecidos por la Soil Taxonomy utilizando el triángulo textural.

Análisis elemental. Se determinó el contenido de carbono y nitrógeno en la muestra molida (<100 μm) por detección infrarroja y termo-conductivimétrica, respectivamente, tras su combustión a 950°C mediante un autoanalizador LECO CHN 200.

Reacción del suelo: pH. El pH en agua de los suelos se determinó a partir de una suspensión de muestra con agua, en proporción 2:5. Para ello se empleó un pH-metro con electrodo de vidrio calibrado con soluciones buffer comerciales de pH 4 y 7. Para determinar el pH en KCl, se añadió a cada muestra KCl sólido y se volvió a medir el pH una vez transcurridas 2h.

Fósforo asimilable (Fósforo Olsen). Se realizó una extracción de P con una disolución de NaHCO_3 0.5M (pH 8.5), manteniendo una relación suelo-solución de 1:20. La muestra se dejó en agitación durante 30 minutos. Se determinó el contenido de fósforo por colorimetría UV/V con molibdato amónico y ácido ascórbico tras el desarrollo del color azul del complejo fosfomolibdico, utilizando un espectrofotómetro Jasco V-630.

Cationes de cambio y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CIC_e). Para determinar los cationes de cambio en las muestras de suelo se realizó un desplazamiento de los cationes empleando NH_4Cl 1N. A partir de las disoluciones, se determinó el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+}

mediante espectrometría de absorción atómica y el contenido de Na^+ y K^+ mediante espectrometría de emisión atómica de llama, empleando para ello un espectrofotómetro PerkinElmer PinAAcle 500. La capacidad de intercambio catiónica efectiva (CIC_e) se determinó a partir del sumatorio de los cationes de cambio, expresados en $\text{cmol}(+)/\text{kg}$.

Disolución de equilibrio. Se prepararon suspensiones de muestra de suelo con agua en proporción 1:5 (p/v), que se dejaron reaccionar durante 96 horas. Posteriormente, se determinó el pH y la conductividad empleando un pH-metro calibrado con soluciones buffer comerciales de pH 4 y 7 y un conductímetro calibrado con soluciones buffer a 20°C, respectivamente. A partir de las disoluciones obtenidas se determinó la concentración de los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) mediante espectrofotometría de absorción/emisión atómica de llama, utilizando un espectrofotómetro PerkinElmer PinAAcle 500; y de los aniones (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) utilizando un sistema de cromatografía iónica Thermo Dionex Aquion. Los iones PO_4^{3-} y NH_4^+ se determinaron por colorimetría. Se determinó también el contenido de carbono orgánico e inorgánico en disolución empleando un analizador Shimadzu TOC-L Series. Los resultados se expresaron en mg/L .

Carbono extraíble en agua caliente. Se realizó una extracción del suelo con agua caliente (80°C durante 16h) y en el extracto se determinó el contenido de carbono orgánico total empleando un analizador Shimadzu TOC-L Series. Los resultados se expresaron en mg/kg .

Nitrógeno biodisponible. Se realizó una extracción del suelo con una disolución de KCl 1N en proporción 1:5 (p/v). En el extracto, se determinaron los valores de NH_4^+ y NO_3^- mediante espectrometría UV/V. Los resultados se expresaron en mg/kg .

En las muestras recogidas en la segunda campaña de muestreo se realizaron las mismas determinaciones excepto la densidad, el análisis granulométrico y el análisis elemental.

3.4. Determinación de los nutrientes de las muestras vegetales

Las muestras vegetales recogidas se secaron en estufa a 40°C y se trituraron utilizando un molino de bolas automático Retsch MM400. En la muestra molida se determinó el contenido de C y N por combustión con autoanalizador LECO CHN 200. Además, se realizaron digestiones en placa, empleando un equipo digestor PerkinElmer SPB. A partir de las disoluciones obtenidas se determinaron los valores de los diferentes nutrientes (Ca, Mg, K, Fe, Cu, Mn, y Zn) mediante espectrofotometría de absorción atómica de llama, utilizando un espectrofotómetro PerkinElmer PinAAcle 500. El contenido de P se determinó por colorimetría UV/V, utilizando un espectrofotómetro Jasco V-630.

3.5. Tratamiento de datos

Se realizó el cálculo de estadísticos descriptivos (min, max, media, desviación estándar, error típico e intervalo de confianza para la media) utilizando el software de IBM SPSS versión 29. Se representaron los valores medios y el error estándar.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización del suelo

En las Tablas 2-4 se recogen los valores obtenidos para las propiedades edáficas de los suelos del invernadero antes del establecimiento del ensayo.

Tabla 2. Propiedades físicas de muestras de suelo del invernadero. Valores medios y desviación estándar (n=3).

Muestra	Humedad %	Densidad aparente	Partícula g/cm ³	Porosidad %	Análisis granulométrico (% p/p en fracción <2 mm)					Textura
					Arena Gruesa	Arena Fina	Limo Grueso	Limo Fino	Arcillas	
INV. 1	21,9	1,00	2,63	62,09	15,16	32,83	13,52	27,46	11,02	Franca
INV. 2	21,5	0,93	2,64	64,77	12,29	27,44	16,10	33,59	10,58	Franca
INV. 3	20,6	0,96	2,63	63,38	12,34	27,89	19,16	28,85	11,77	Franca
Media	21,3	0,96	2,63	63,42	13,26	29,39	16,26	29,97	11,13	
Desv. Est.	0,7	0,03	0,01	1,34	1,65	2,99	2,82	3,22	0,60	

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de muestras de suelo del invernadero. Valores medios y desviación estándar (n=3).

Muestra	pH H ₂ O	pH KCl	C total %	Mat. Org. %	N %	S %	C/N	P Olsen mg/kg	Complejo de cambio (determinado con ClNH ₄ , expresados en cmol _c /kg).					
									Ca	Mg	Na	K	Al	ClCe
INV. 1	7,8	7,2	5,00	8,60	0,21	0,04	23,8	394,73	13,19	4,10	0,60	1,27	0,00	19,16
INV. 2	7,5	6,9	1,92	3,30	0,23	0,04	8,3	360,87	13,07	3,81	0,70	1,56	0,00	19,15
INV. 3	7,6	7,1	1,72	2,96	0,21	0,04	8,2	363,00	13,18	3,92	0,83	1,83	0,00	19,76
Media	7,6	7,1	2,88	4,95	0,22	0,04	13,45	372,87	13,15	3,94	0,71	1,55	0,00	19,36
Desv. Est.	0,2	0,1	1,84	3,16	0,01	0,00	8,97	18,97	0,07	0,14	0,11	0,28	0,00	0,35

Tabla 4. Disolución del suelo (equilibrio, 1:5; p/v). (TOC = Carbono Orgánico Total, TIC = Carbono Inorgánico Total). Valores medios y desviación estándar (n=3).

Muestra	pH	Cond. mS/cm	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	TOC	TIC
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
INV. 1	7,34	262	14,94	5,51	16,04	15,03	0,91	1,05	5,25	0,31	1,53	7,84	25,45	20,12	15,09
INV. 2	7,37	341	17,43	5,76	20,91	24,77	1,27	1,12	7,30	0,66	5,82	13,20	28,18	30,34	16,44
INV. 3	7,49	372	16,47	5,75	26,32	29,99	1,20	1,15	13,23	0,24	2,45	12,21	43,16	29,57	16,25
Media	7,4	325	16,28	5,67	21,09	23,26	1,13	1,11	8,60	0,40	3,27	11,08	32,26	26,68	15,93
Desv. Est.	0,06	40	0,89	0,10	3,64	5,37	0,13	0,04	2,93	0,16	1,60	2,02	6,74	4,02	0,52

Se observa que el suelo presenta bastante homogeneidad en toda la superficie. Se trata de un suelo poroso, con una densidad en torno a 1g/cm^3 , una estructura moderada en bloques subangulares y una textura franca (Figura 3). Presenta una reacción en torno a la neutralidad y una elevada fertilidad química, con altas concentraciones de fósforo, nitrógeno y potasio. Sin embargo, el contenido en materia orgánica es relativamente bajo (3,0-3,3 %). El complejo de cambio se encuentra saturado con cationes básicos, con un dominio del Ca^{2+} , seguido a continuación del Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . La disolución del suelo presenta una conductividad eléctrica relativamente baja para un suelo de invernadero, aunque por su composición se aprecia la elevada fertilidad señalada con anterioridad, con altas concentraciones de iones fosfato, nitrato, amonio y potasio.

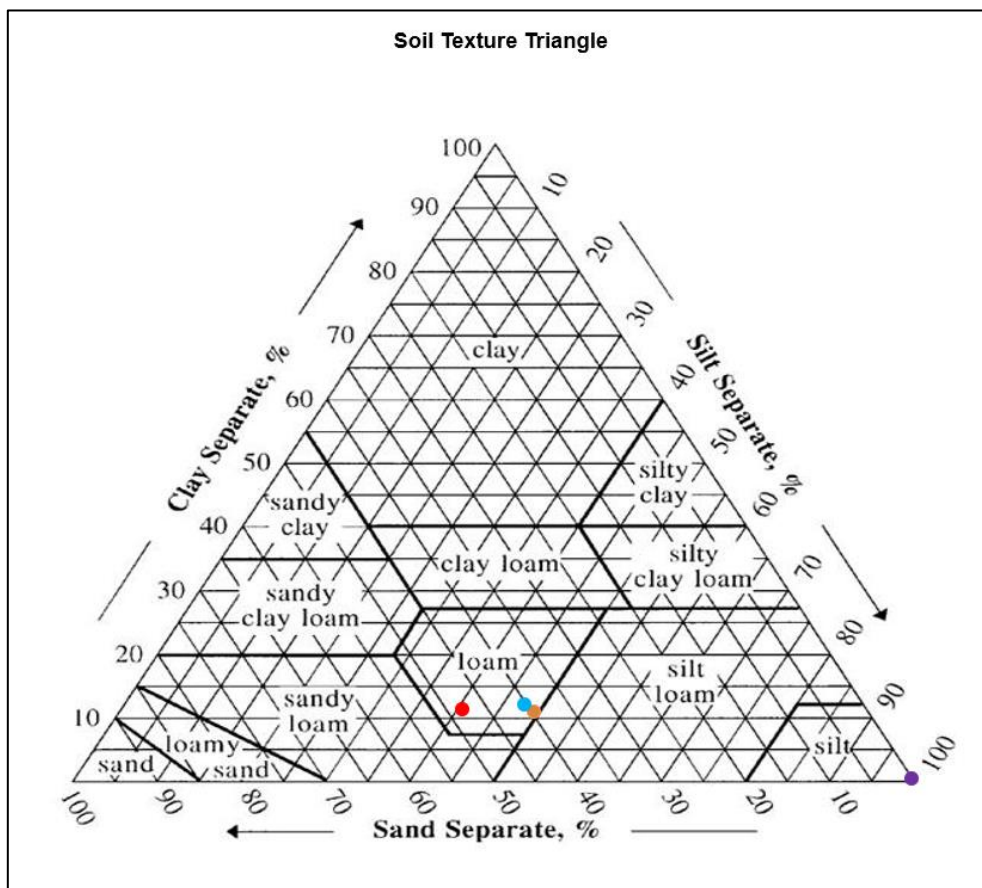


Figura 3. Cálculo de la textura de las tres muestras de suelo de invernadero.

4.2. Efecto del acolchado sobre las propiedades del suelo

En las Tablas 5-6 y Figuras 4-9 se presentan los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados a las muestras de suelo recogidas tras la aplicación de los distintos tratamientos y el desarrollo de cultivo en las parcelas dedicadas a la producción de pimiento y tomate cherry.

La humedad del suelo varió entre 19,3-23,1 % en los suelos donde se cultivó pimiento y entre 19,5-21,7 % en los que se cultivó tomate cherry (Figura 4). Para ambos cultivos los valores más elevados de humedad se obtuvieron en los suelos tratados con acolchado de corteza de pino y de helecho, superando la humedad de los suelos control sin tratamiento y tratados con malla geotextil.

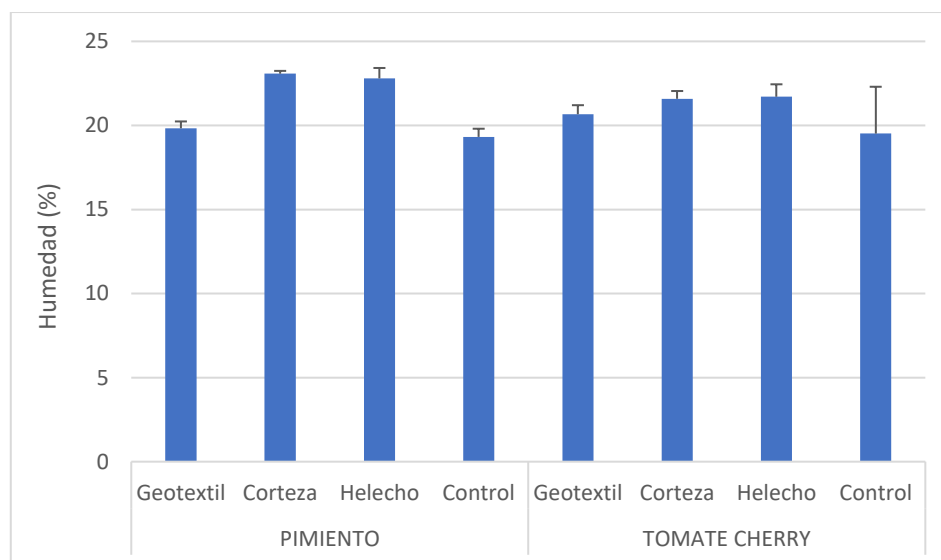


Figura 4. Contenido de humedad (%) de los suelos de cultivo de pimiento y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=3).

El pH del suelo en agua se mantuvo en torno a la neutralidad en todos los tratamientos en ambos cultivos, con valores medios comprendidos entre 7,3-7,5 en los suelos donde se cultivó pimiento, y entre 7,6-7,9 en los suelos donde se cultivó tomate cherry (Figura 5). El pH en cloruro de potasio (KCl), indicativo del potencial ácido del suelo, mostró valores más bajos en comparación con el pH obtenido en agua, aproximadamente de una unidad menos. En los suelos de cultivo de pimiento se obtuvieron valores entre 6,6-6,8, mientras que en los suelos donde se cultivó tomate cherry obtuvieron valores entre 6,9-7,1. Para ambos cultivos los valores más elevados se corresponden con los suelos tratados con el acolchado de corteza de pino, mientras que los más bajos se obtuvieron en los suelos tratados con helecho.

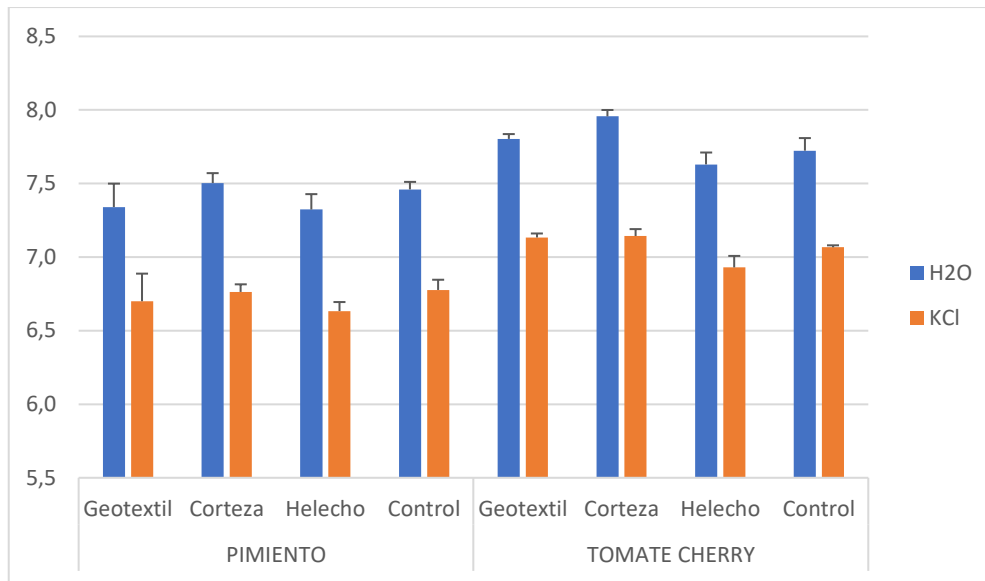


Figura 5. Reacción del suelo (pH en H₂O y KCl) en los suelos de cultivo de pimienta y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=3).

Los valores de CICE obtenidos en los suelos fueron de 20,1-22,7 cmol(+)/kg para los cultivos de pimienta y de 21,6-24,4 cmol(+)/kg para los cultivos de tomate cherry. Como se observa en la Figura 6, el complejo de cambio se encuentra saturado con cationes básicas, con un dominio del Ca²⁺, seguido a continuación del Mg²⁺, K⁺ y Na⁺. Para ambos cultivos, los valores más elevados de CICE se obtuvieron en los suelos tratados con el acolchado geotextil y la corteza de pino, mientras que los más bajos se obtuvieron en los suelos control (sin tratamiento) y con el acolchado de helecho.

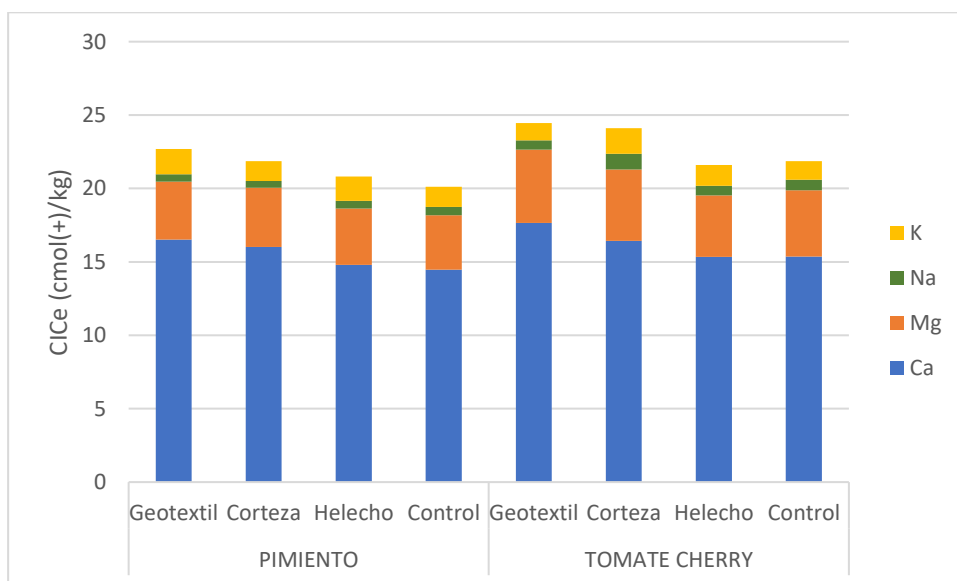


Figura 6. Cationes de cambio en los suelos de cultivo de pimienta y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios (n=3).

La disolución del suelo presentó altas concentraciones de iones fosfato, nitrato, amonio y potasio en los suelos de ambos cultivos (Tablas 5-6), indicativos de una elevada fertilidad. La disolución del suelo del cultivo de pimiento mostró un notable incremento del potasio en el tratamiento con el acolchado de helecho, alcanzando valores de 34,3 mg/L. Destaca la mayor concentración de nitrato y fosfato en geotextil y la elevada variabilidad del ion cloro entre los diferentes acolchados, descendiendo en los suelos tratados con corteza de pino (4,6 mg/L) e incrementándose notablemente en los suelos tratados con helecho (18,8 mg/L). Por otra parte, la disolución del suelo del cultivo de tomate cherry mostró un considerable incremento de los iones potasio (54,6 mg/L), sodio (33,9 mg/L) y sulfato (61,8 mg/L) en las muestras de suelo tratadas con corteza de pino.

Tabla 5. Cationes en disolución en los suelos de cultivo de pimiento y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios (n=3) y error estándar (Error. Est.).

		CATIONES (mg/L)									
		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺	
		Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.
Pimiento	Malla	20,07	1,38	6,20	0,19	15,32	0,92	30,76	10,85	1,63	0,30
	Corteza	20,90	0,88	6,19	0,39	14,51	2,69	24,43	1,62	1,51	0,12
	Helecho	21,68	2,13	7,14	0,61	16,71	1,17	34,30	0,48	2,37	0,31
	Control	20,25	1,66	6,42	0,36	17,67	0,89	22,61	3,49	1,45	0,05
Tomate Cherry	Malla	22,23	0,30	7,99	0,46	19,03	2,02	15,96	1,15	1,05	0,02
	Corteza	20,60	1,32	7,77	0,46	33,91	8,30	54,58	18,43	1,33	0,09
	Helecho	19,99	0,16	7,21	0,08	20,95	1,07	25,34	0,67	1,63	0,13
	Control	16,86	1,68	4,27	1,44	21,38	0,33	18,13	1,86	0,88	0,26

Tabla 6. Aniones en disolución en los suelos de cultivo de pimiento y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios (n=3) y error estándar (Error. Est.).

		ANIONES (mg/L)											
		F ⁻		Cl ⁻		NO ₂ ⁻		NO ₃ ⁻		PO ₄ ³⁻		SO ₄ ²⁻	
		Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.	Media	Error. Est.
Pimiento	Malla	0,77	0,07	8,40	2,35	0,85	0,14	3,58	1,22	20,79	7,37	19,09	4,52
	Corteza	0,81	0,07	4,63	0,79	0,26	0,06	0,74	0,25	17,64	2,59	13,35	5,92
	Helecho	0,96	0,07	18,85	5,42	0,19	0,05	0,44	0,14	18,47	2,26	11,52	0,54
	Control	1,09	0,05	9,00	3,41	0,28	0,15	0,61	0,32	19,31	3,30	13,56	1,62
Tomate Cherry	Malla	1,01	0,14	6,45	0,43	0,72	0,12	4,22	1,35	12,44	1,22	25,98	3,18
	Corteza	1,25	0,10	10,11	3,51	0,37	0,06	2,04	0,79	14,52	0,97	61,81	28,81
	Helecho	1,09	0,04	18,38	2,18	0,50	0,10	2,14	0,72	15,55	1,96	13,78	2,68
	Control	1,19	0,03	12,54	0,88	0,58	0,19	4,33	1,79	12,29	2,17	18,03	0,50

El contenido en carbono disuelto osciló entre 58,2-61,3 mg/L en los suelos de cultivo de pimiento y entre 51,4-64,4 mg/L en los suelos de tomate cherry, con predominio de la fracción carbono orgánico (TOC) en ambos casos (Figura 7). En el cultivo de tomate cherry se aprecia un notable incremento en el contenido de carbono orgánico del suelo bajo la acción de los diferentes acolchados.

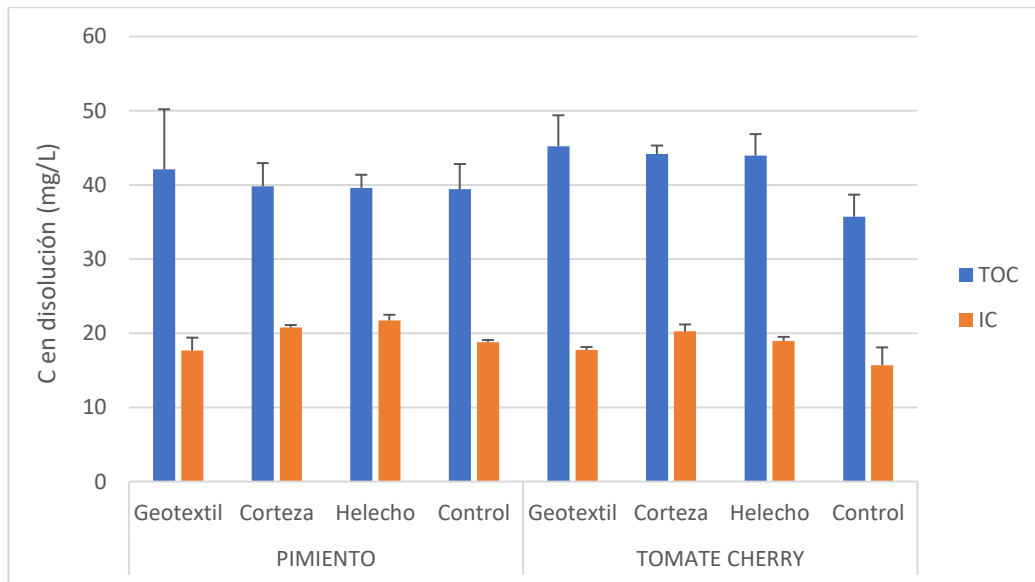


Figura 7. Carbono orgánico total (TOC) y carbono inorgánico (IC) en los suelos de cultivo de pimiento y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=3).

El contenido de carbono orgánico total extraíble en agua caliente obtenido fue de 1350,0-1547,3 mg/kg para los suelos en los que se cultivó pimiento y de 1325,0-1635,0 mg/kg en los suelos de cultivo de tomate cherry (Figura 8). En el cultivo de pimiento, los valores más elevados se obtuvieron en los suelos tratados con helecho, mientras que en el cultivo de tomate cherry los valores más elevados se corresponden con los suelos tratados con corteza de pino.

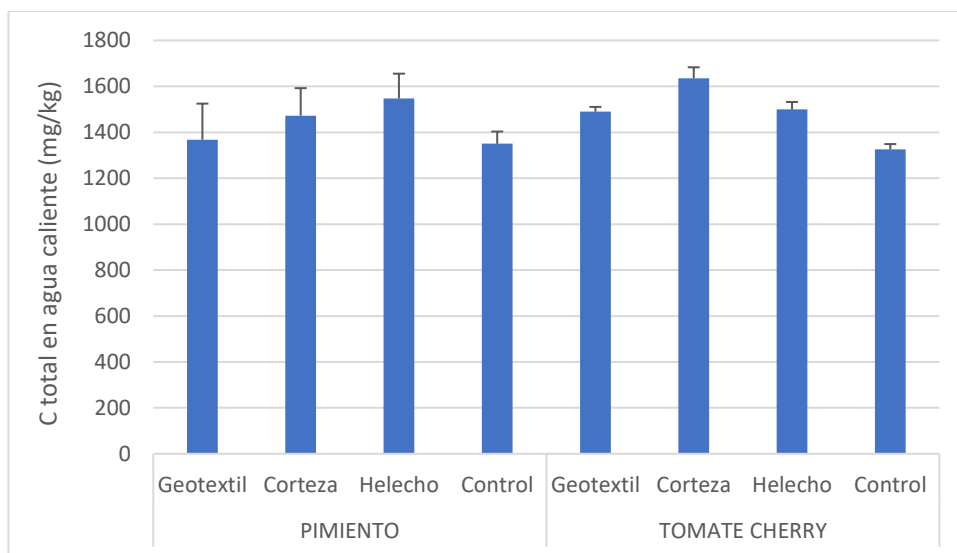


Figura 8. Carbono orgánico total en agua caliente en los suelos de cultivo de pimiento y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=3).

El nitrógeno biodisponible, obtenido mediante extracción de NH_4^+ y NO_3^- en KCl, se muestra en la Figura 9. Los suelos de cultivo de pimiento obtuvieron valores medios de NH_4^+ comprendidos entre 8,9-10,4 mg/kg y de NO_3^- entre 30,2-56,4 mg/kg. Por otra parte, los suelos de cultivo de tomate cherry obtuvieron valores medios de NH_4^+ comprendidos entre 2,6-11,7 mg/kg y de NO_3^- entre 39,2-55,4 mg/kg. En ambos cultivos los valores más elevados de NH_4^+ se obtuvieron en los suelos tratados con helecho, mientras que valores más elevados de NO_3^- se obtuvieron en los suelos tratados con malla geotextil.

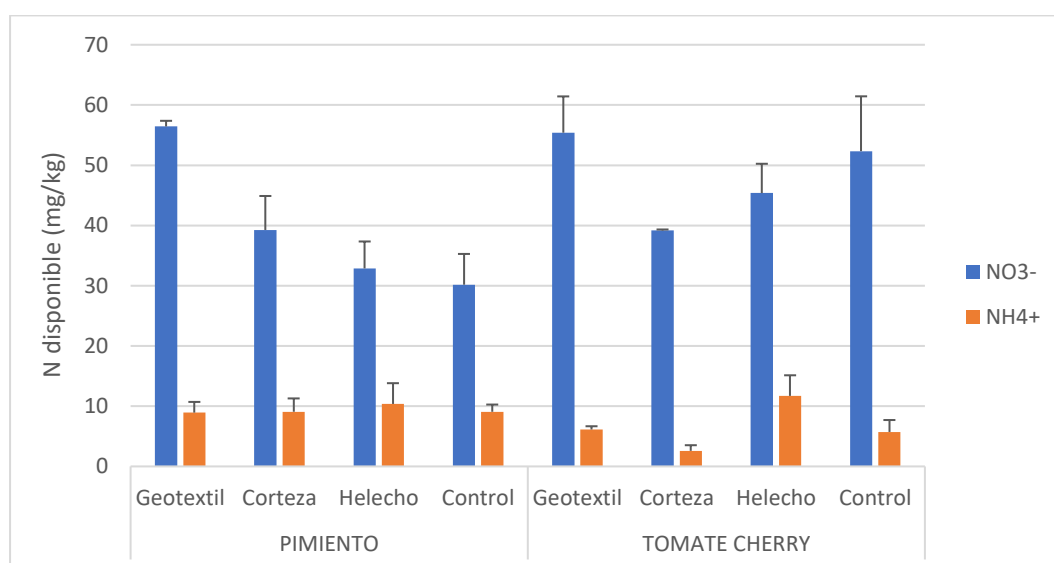


Figura 9. Extracción en KCl de NH_4^+ y NO_3^- en los suelos de cultivo de pimiento y tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=3).

4.3. Efecto del acolchado sobre el contenido de nutrientes de los cultivos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los nutrientes analizados para las especies cultivadas (lechuga verde, lechuga roja, pimiento y tomate cherry) bajo la acción de los acolchados (malla geotéxtil, corteza de pino, helecho) y control.

4.3.1. Lechuga verde

En las Figuras 10-12 se presentan los resultados obtenidos en los análisis del contenido de C, así como de los macro y micronutrientes de los cultivos de lechuga verde bajo los diferentes tratamientos.

El contenido de C en hoja mostró valores medios comprendidos entre 32,6-35,4 % (Figura 10). Se observó un menor contenido en C de las plantas en comparación con los resultados obtenidos en el control, especialmente en los cultivos con los acolchados de corteza de pino y malla geotéxtil.

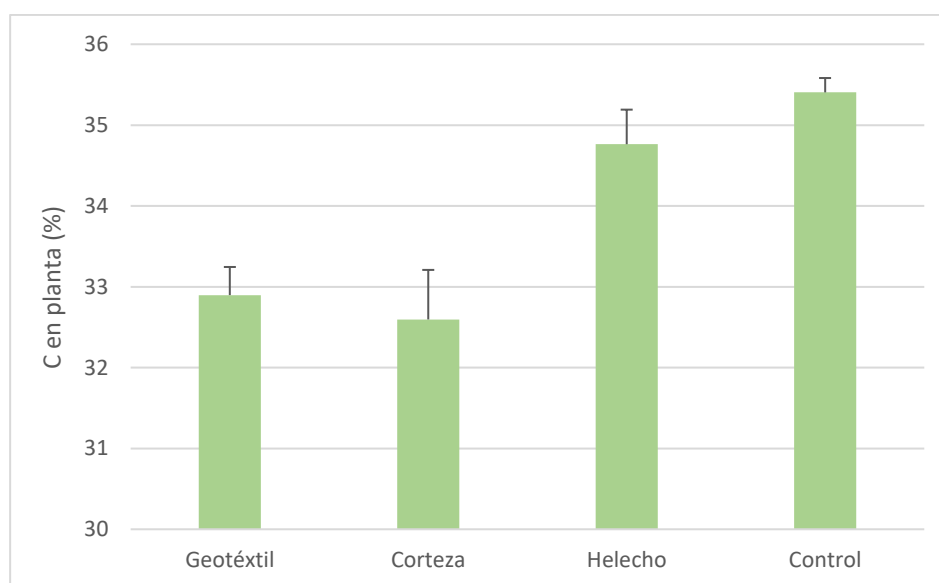


Figura 10. Porcentaje de C en planta en cultivo de lechuga verde bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error típico (n=9).

La Figura 11 muestra los resultados obtenidos para los macronutrientes analizados. De forma general, los acolchados aumentaron el contenido de macronutrientes del cultivo en comparación con el control. Destaca el elevado contenido de K obtenido en todos los tratamientos, con valores medios entre 85,4-116,6 g/kg, siendo los cultivos tratados con corteza de pino y malla geotextil los que obtuvieron los valores más altos. Los valores de Ca (16,7-22,2 g/kg), Mg (3,8-5,4 g/kg), N (11,2-17,3 g/kg) y P (3,5-4,7 g/kg) no mostraron diferencias destacables entre los diferentes acolchados.

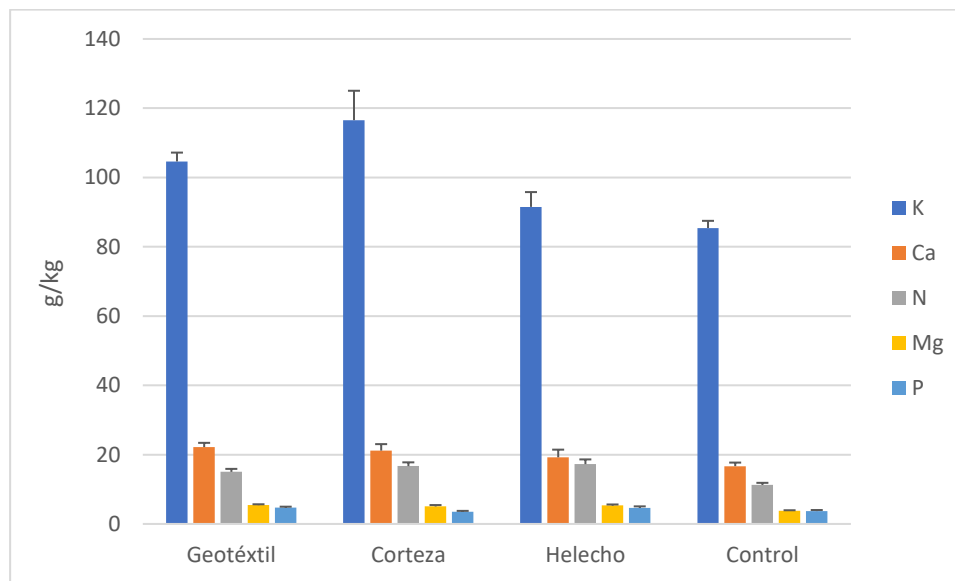


Figura 11. Macronutrientes en planta en cultivo de lechuga verde bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

La Figura 12 muestra los resultados obtenidos para los micronutrientes analizados. De forma general, se observó un efecto positivo de los acolchados utilizados, en comparación con el control. Destaca el elevado contenido de Fe, con valores medios entre 131,0-249,7 mg/kg. En los resultados obtenidos se apreció un notable incremento de este micronutriente en los cultivos tratados con la malla geotextil y, en mayor medida, con corteza de pino. El Zn (27,3-44,8 mg/kg) mostró resultados similares en los tratamientos de malla geotextil y helecho, pero se vio reducido en los cultivos tratados con corteza de pino. El contenido de Mn (34,0-43,2 mg/kg) se incrementó en los acolchados de corteza de pino y helecho, en comparación con la malla geotextil. Por último, los valores de Cu (3,9-4,8 mg/kg), no mostraron diferencias destacables entre los diferentes tratamientos.

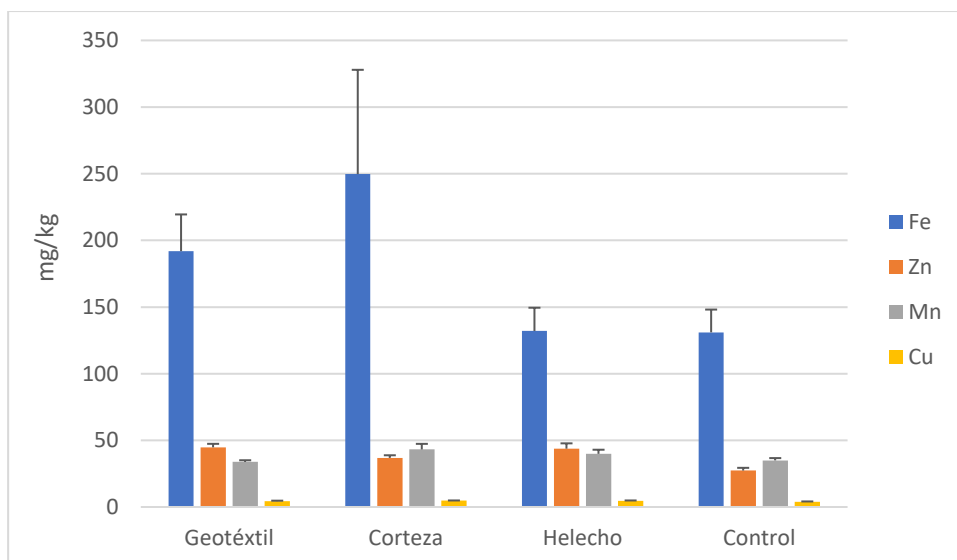


Figura 12. Micronutrientes en planta en cultivo de lechuga verde bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

4.3.2. Lechuga roja

En las Figuras 13-15 se presentan los resultados obtenidos en los análisis del contenido de C, así como de los macro y micronutrientes de los cultivos de lechuga roja bajo los diferentes tratamientos.

El contenido de C mostró valores medios comprendidos entre 34,8-37,0% (Figura 13). Para todos los acolchados, se observó un notable incremento del contenido de C de las plantas en comparación con los resultados obtenidos en la muestra control, especialmente en los cultivos tratados con helecho.

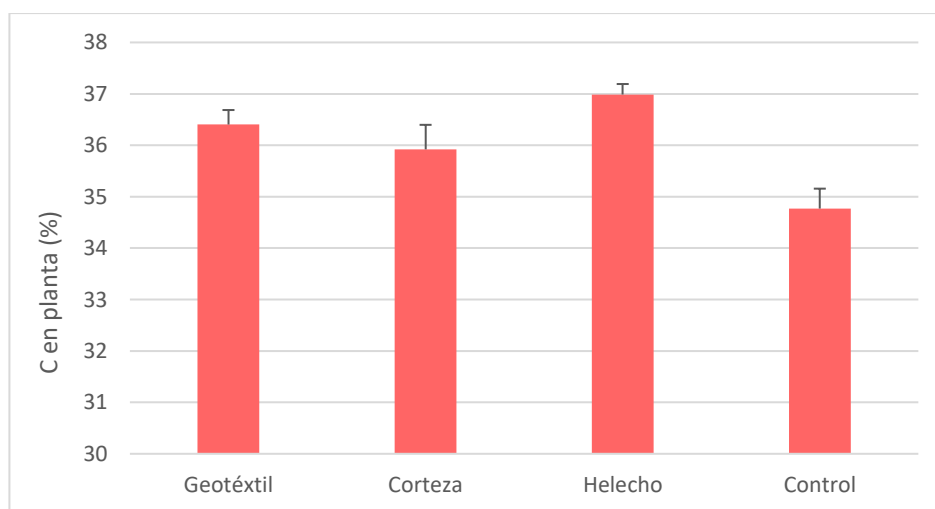


Figura 13. Porcentaje de C en planta en cultivo de lechuga roja bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos para los macronutrientes analizados. En general los acolchados redujeron la absorción de macronutrientes en comparación con el control. Destaca el elevado contenido de K obtenido en todos los tratamientos, con valores medios entre 73,7-83,5 g/kg. El Ca (16,7-22,6 g/kg) descendió en los cultivos tratados con corteza de pino. Por otra parte, el contenido en N (17,7-23,9 g/kg) se vio incrementado en los cultivos con acolchado de corteza de pino y malla geotextil respecto al control. Los valores de Mg (4,1-5,0 g/kg) no mostraron diferencias relevantes entre los diferentes tratamientos. Por último, el P (2,7-6,0 g/kg) se incrementó en los cultivos tratados con corteza de pino.

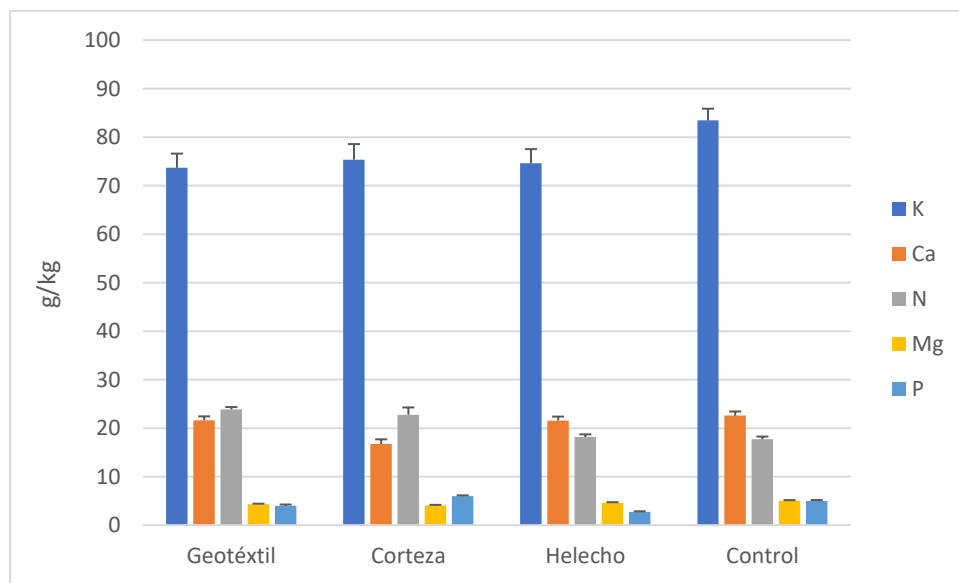


Figura 14. Macronutrientes en planta en cultivo de lechuga roja bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

La Figura 15 muestra los resultados obtenidos para los micronutrientes analizados. En general los acolchados aumentaron la absorción de los micronutrientes del cultivo en comparación con el control. En particular, el Fe, con valores medios entre 129,9-269,5 mg/kg, se redujo especialmente en los cultivos tratados con corteza de pino y helecho. El Zn (33,7-68,2 mg/kg) se incrementó en los cultivos tratados con geotextil y helecho, mientras que el Mn (27,8-37,1 mg/kg) se vio reducido en los cultivos tratados con corteza de pino. Por último, el Cu (4,9-6,8 mg/kg) no mostró variaciones destacables entre los acolchados.

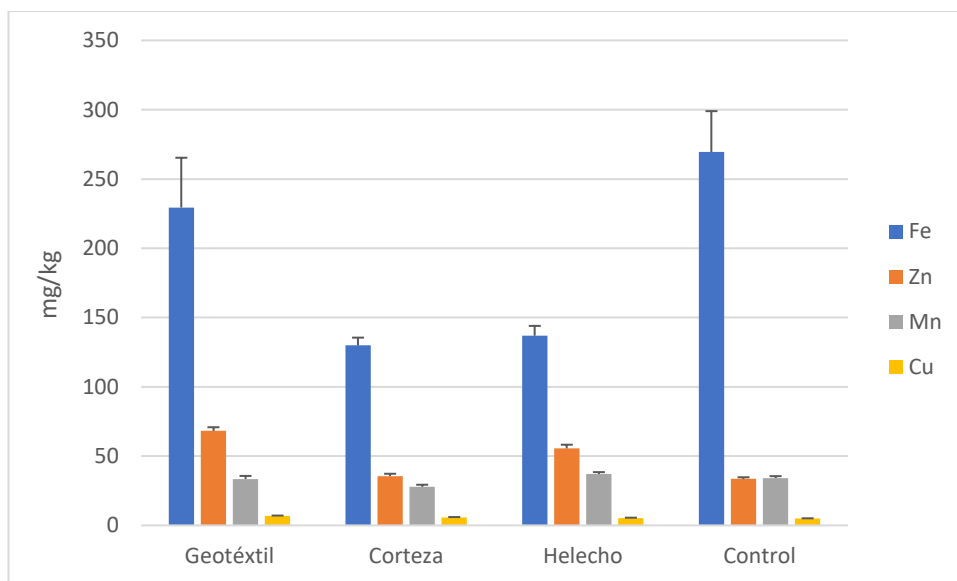


Figura 15. Micronutrientes en planta en cultivo de lechuga roja bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

4.3.3. Pimiento

En las Figuras 16-18 se presentan los resultados obtenidos en los análisis del contenido de C, así como de los macro y micronutrientes de los cultivos de pimiento (hoja y fruto) bajo los diferentes tratamientos. Para los análisis realizados en fruto no se obtuvieron datos de muestra control.

El contenido de C en hoja mostró valores medios comprendidos entre 39,4-40,2 % (Figura 16). No se observaron variaciones entre los acolchados, obteniendo los valores más altos en los cultivos tratados con corteza de pino. Por otra parte, el contenido de C en fruto mostró valores medios entre 40,6-42,7 %. En este caso, los valores más altos se obtuvieron en los cultivos tratados con malla geotextil.

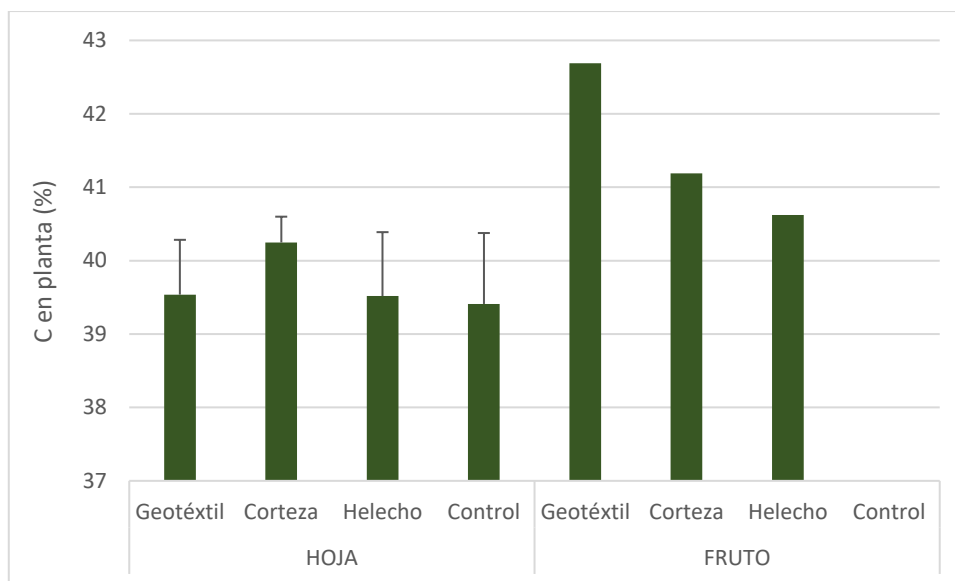


Figura 16. Porcentaje de C en hoja y fruto en cultivo de pimiento bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar en hoja (n=9).

La Figura 17 muestra los resultados obtenidos para los macronutrientes analizados. En los resultados obtenidos en hoja, se observó de forma general un efecto negativo de los acolchados en la absorción de los macronutrientes, en comparación con el control. Destaca el elevado contenido de K obtenido en todos los tratamientos, con valores medios entre 52,0-60,7 g/kg, obteniendo los cultivos con el acolchado geotextil los valores más elevados. El N (23,8-34,2 g/kg) también presentó un alto contenido en los diferentes tratamientos, especialmente en los cultivos tratados con corteza de pino. Por otra parte, el Ca (3,3-10,7 g/kg) y Mg (2,3-3,5 g/kg) mostraron un considerable descenso en los cultivos tratados con corteza de pino, mientras que el P (4,6-7,0 g/kg) descendió en los cultivos tratados con malla geotextil.

En los resultados obtenidos en fruto también destaca el elevado contenido de K (30,7-39,3 g/kg) y N (15,3-23,9 g/kg) obtenido en todos los tratamientos. El Ca (0,4-1,0 g/kg) también mostró un considerable descenso en las muestras tratadas con corteza de pino, mientras que el P (2,7-2,9 g/kg) y el Mg (1,5-1,7 g/kg) no presentaron variaciones entre los acolchados. Los valores más altos de macronutrientes en fruto del pimiento se obtuvieron en los cultivos tratados con malla geotextil.

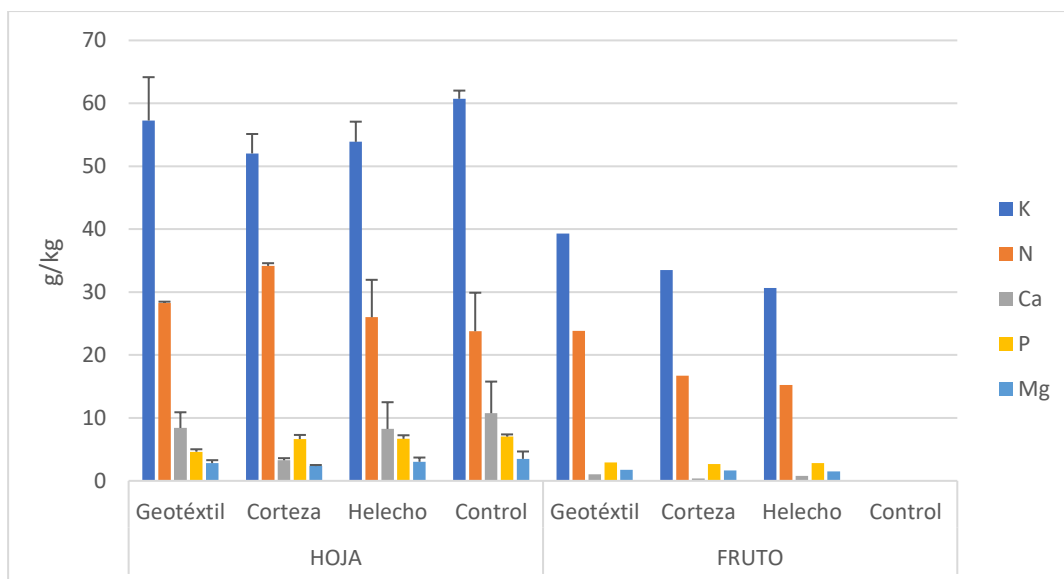


Figura 17. Macronutrientes en hoja y fruto en cultivo de pimiento bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar en hoja (n=9).

La Figura 18 muestra los resultados obtenidos para los micronutrientes analizados. En los resultados obtenidos en hoja, se observó un efecto negativo de los acolchados en la absorción de los micronutrientes en comparación con el control. El Fe (97,9-133,2 mg/kg), el Zn (28,5-63,5 mg/kg) y el Mn (22,5-35,0 mg/kg) mostraron un considerable descenso en los cultivos tratados con corteza de pino y malla geotextil, mientras que los valores de Cu (16,8-19,7 mg/kg) no mostraron variaciones entre los tratamientos.

En los resultados obtenidos en fruto destaca el elevado contenido de Fe, con valores medios entre 56,6-103,0 mg/kg. El Zn (9,7-17,7 mg/kg) y el Cu (6,9-12,5 mg/kg) incrementaron prácticamente el doble de su contenido en los cultivos tratados con malla geotextil. Por último, el Mn (9,8-13,3 g/kg) no mostró variaciones entre los diferentes tratamientos. Para todos los macronutrientes, los valores más elevados se obtuvieron de nuevo en los cultivos tratados con malla geotextil.

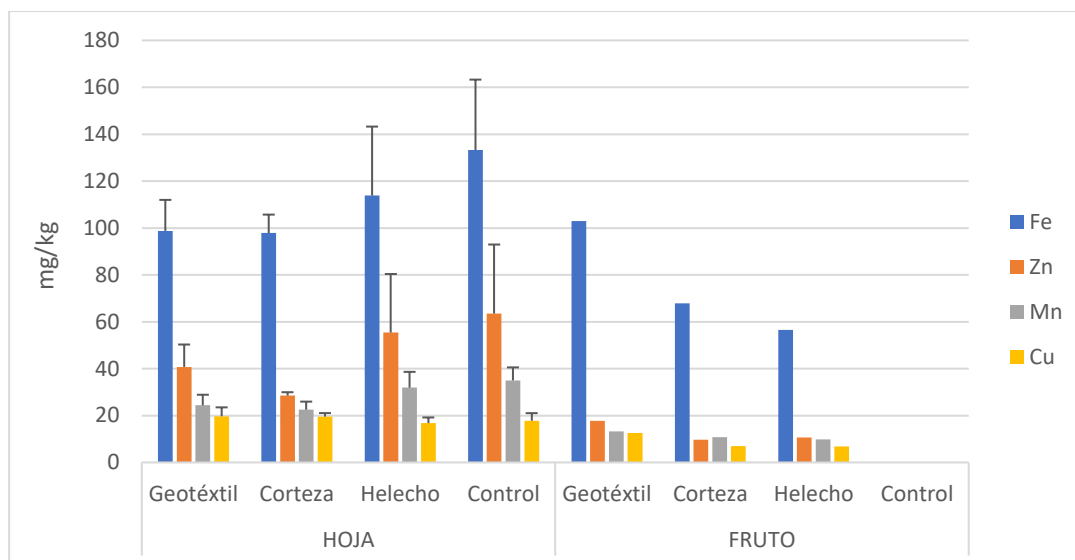


Figura 18. Micronutrientes en hoja y fruto en cultivo de pimiento bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar en hoja (n=9).

4.3.4. *Tomate cherry*

En las Figuras 19-21 se presentan los resultados obtenidos en los análisis del contenido en C, así como de los macro y micronutrientes de los cultivos de tomate cherry bajo los diferentes acolchados.

El contenido de C en planta mostró valores medios comprendidos entre 41,2-44,7 % (Figura 19). Se observa un incremento del contenido en C en los cultivos tratados con el acolchado de helecho, en comparación con el resto de los tratamientos y el control.

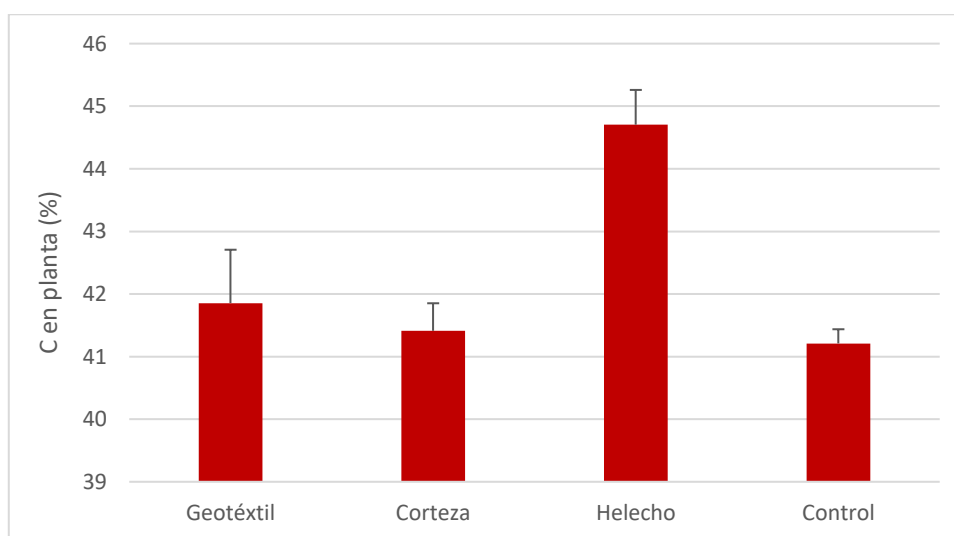


Figura 19. Porcentaje de C en fruto en cultivo de tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

La Figura 20 muestra los resultados obtenidos para los macronutrientes analizados. Se observa un efecto positivo de los acolchados en la absorción de los macronutrientes en comparación con el control. Destaca el elevado contenido en K obtenido en los diferentes tratamientos. El K (42,7-64,8 g/kg) junto con el N (14,7-20,1 g/kg) el P (3,8-5,1 g/kg) y el Mg (2,1-3,1 g/kg) mostraron una tendencia similar, obteniendo su valor máximo en las muestras tratadas con el acolchado de helecho y el mínimo en las muestras tratadas con corteza de pino. Por otra parte, el Ca (0,9-1,2 g/kg) obtuvo los valores más altos en las muestras tratadas con malla geotéxtil.

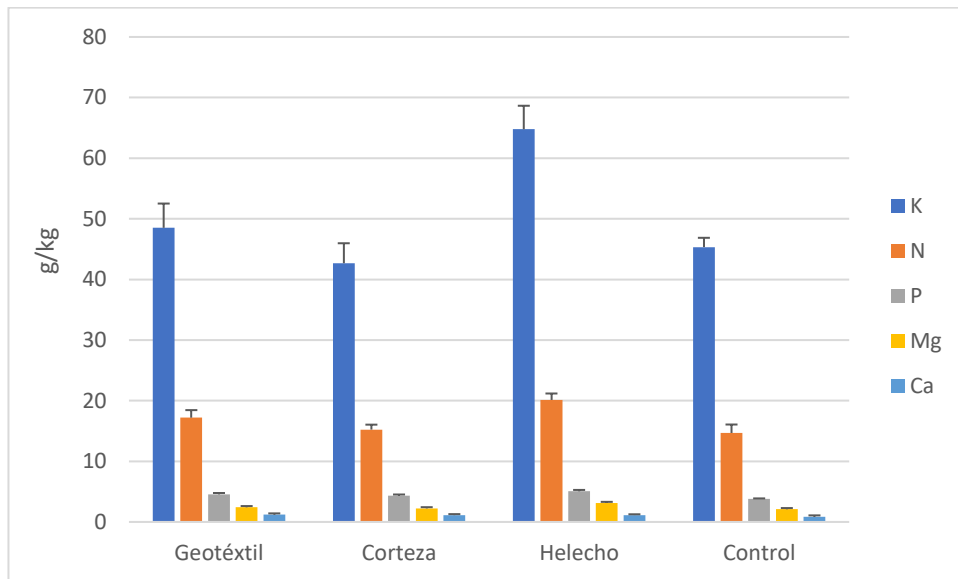


Figura 20. Macronutrientes en fruto en cultivo de tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

La Figura 21 muestra los resultados obtenidos para los micronutrientes analizados. Se observa de nuevo un efecto positivo de los acolchados utilizados, en comparación con los resultados obtenidos en las muestras control. Destaca el elevado contenido de Fe que presentan las muestras, con valores medios comprendidos entre 42,0-63,3 mg/kg. El Fe junto con el Zn (13,1-18,7 mg/kg) y el Cu (4,9-7,1 mg/kg) muestran una tendencia similar a lo visto en el análisis de los macronutrientes, obteniendo los valores máximos en las muestras tratadas con el acolchado de helecho y los mínimos en las muestras tratadas con corteza de pino. En el caso del Mn (11,6-17,9 mg/kg) los valores más altos se obtuvieron en los cultivos tratados con helecho, mientras que los más bajos se corresponden con el tratamiento con malla geotéxtil.

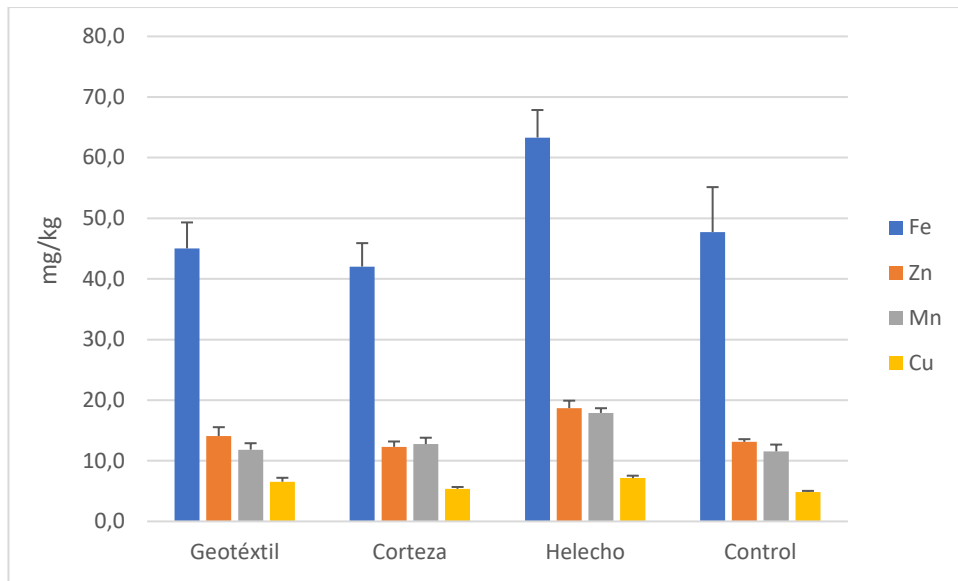


Figura 21. Micronutrientes en fruto en cultivo de tomate cherry bajo los diferentes acolchados. Valores medios y error estándar (n=9).

5. DISCUSIÓN

En trabajos anteriores (Montalvo *et al.*, 2024) se evaluó el efecto de los acolchados sobre el control de las malas hierbas y la producción de los cultivos. Los acolchados de geotextil y corteza de pino resultaron ser muy efectivos a la hora de impedir la proliferación de las malas hierbas en comparación con en los suelos sin acolchado (control), generando barreras físicas que limitan su crecimiento. Sin embargo, el acolchado de helecho produjo el efecto contrario, y no fue capaz de impedir el crecimiento de las malas hierbas. Esto puede deberse a que el helecho no es capaz de generar una barrera física que evite su desarrollo. Adicionalmente, ciertos acolchados orgánicos producen sustancias alelopáticas que pueden estimular el crecimiento de las malas hierbas (Chalker-Scott, 2007; Duryea *et al.*, 1999).

Por otra parte, la malla geotextil y la corteza de pino aumentaron considerablemente el rendimiento de los cultivos (exceptuando el cultivo de pimiento en el caso de la corteza de pino). Para el cultivo de pimiento se observa que la utilización de acolchados de origen orgánico, como la corteza de pino, no produce efectos positivos sobre su producción, como demuestran ensayos similares realizados (Buczowska, 1995; Goyal *et al.*, 1984). Sin embargo, el acolchado de helecho no parece incrementar el rendimiento de los cultivos, llegando a resultar incluso perjudicial para el desarrollo de los frutos en el cultivo de pimiento. Esto puede deberse a un efecto alelopático de las frondes del helecho sobre los cultivos estudiados. La descomposición de ciertos tejidos vegetales puede liberar al medio ciertas sustancias químicas, como los compuestos aromáticos hidroxilados, que pueden afectar negativamente a la actividad de los organismos descomponedores, inhibir la germinación y dificultar el desarrollo de otras especies vegetales (Duryea *et al.*, 1999; Taylor & Thomson, 1998; Wästerlund & Ingelög, 1980).

Para evaluar e interpretar estos resultados, en el presente trabajo se estudió el efecto de la aplicación de los diferentes tipos de acolchados sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo y el contenido de nutrientes de las especies y variedades cultivadas en invernadero.

5.1. Efecto del acolchado sobre las propiedades del suelo

El uso de acolchados favorece la conservación de la humedad del suelo, en comparación con el suelo sin tratamiento (control). Los acolchados actúan como una barrera física protegiendo al suelo frente a la acción de factores ambientales como el viento o la temperatura, que aumentan la evaporación del agua (Chalker-Scott, 2007; Safari & Kazemi, 2016). Esta función resulta especialmente relevante en regiones con ambientes áridos o semi-áridos donde el uso de los acolchados permite una mejora en la retención y el uso del agua, reduciendo su evaporación (Farzi et al., 2017). Además, cabe destacar una mayor eficacia en la conservación de la humedad del suelo de los acolchados orgánicos (corteza de pino y helecho) frente a la malla geotextil. Ciertos acolchados plásticos como la malla geotextil pueden compactar el suelo y limitar el movimiento y la infiltración del agua, favoreciendo procesos de escorrentía y reduciendo el contenido de humedad de los suelos (Chalker-Scott, 2007; Safari & Kazemi, 2016). Así mismo, aunque no hubo registro de la temperatura, también cabría esperar una mayor temperatura bajo la malla geotextil que bajo los acolchados orgánicos, lo que podría contribuir a un incremento de la evaporación. Además, la elevada producción de biomasa que presenta la malla geotextil y la consecuente absorción de agua por las raíces es un factor que también contribuye a la reducción de la humedad del suelo. No obstante, la producción de biomasa fue similar en el acolchado de corteza de pino, lo que sugiere una mayor eficiencia en la conservación de la humedad del suelo.

El uso de los acolchados no modificó los valores de pH del suelo. Tampoco se observaron variaciones entre los diferentes acolchados utilizados. Esto coincide con los resultados obtenidos en ensayos similares realizados (Broschat, 2007; Tukey *et al.*, 1963), donde los acolchados utilizados tampoco tuvieron efectos significativos sobre el pH del suelo. Sin embargo, otros estudios consultados señalan que determinados acolchados orgánicos como el helecho pueden reducir el pH del suelo (Owen & Marrs, 2001), y que esta reducción se relaciona directamente con el espesor de los acolchados utilizados (Billeaud & Zajicek, 1989).

La capacidad de intercambio catiónica efectiva del suelo (CICE) se vio incrementada en los suelos tratados con los diferentes acolchados, en comparación con el suelo sin tratamiento (control). Por otra parte, los acolchados de malla geotextil y corteza de pino obtuvieron mejores resultados en comparación con el helecho.

La capacidad de intercambio catiónico permite conocer la retención y el suministro de cationes que tiene un suelo, lo cual es un indicativo de su fertilidad. El catión predominante en todos los tratamientos en los suelos de ambos cultivos fue el Ca^{2+} . El calcio es un nutriente esencial para las plantas que contribuye a numerosos procesos que afectan a su desarrollo y mantenimiento estructural (White & Broadley, 2003), por lo que una baja disponibilidad puede resultar perjudicial para los cultivos. No obstante, un exceso de este catión también puede ser negativo si bloquea la absorción de magnesio por la planta. Destacan también los elevados valores de potasio presentes en el complejo de cambio del suelo. El potasio es un nutriente que contribuye al correcto funcionamiento de la maquinaria metabólica de las plantas, interviniendo en procesos relacionados con la fotosíntesis y el transporte de nutrientes (Pandey & Mahiwal, 2020). El exceso de potasio en estos suelos responde a una aplicación repetida de fertilizantes, una práctica bastante común en la agricultura intensiva. Cuando se superan las necesidades de los cultivos, el potasio no absorbido por la planta se acumula en el complejo de cambio.

Por otra parte, conviene tener en consideración algunos factores que pueden repercutir en la CICE de los suelos. Un menor tamaño de partículas de los acolchados orgánicos, como la corteza de pino, puede incrementar la CICE de los suelos, como indican los ensayos realizados por Altland *et al.* (2014). Por otra parte, la materia orgánica y el contenido de arcillas del suelo son factores que contribuyen a incrementar la CICE, por lo que es posible que la incorporación al suelo de los acolchados orgánicos (corteza de pino y helecho) pueda contribuir a largo plazo a un incremento de la CICE.

Los iones en la disolución del suelo tampoco mostraron variación bajo el efecto de los acolchados en comparación con el suelo sin tratamiento (control). Destacan los elevados valores de PO_4^{3-} presentes en la disolución del suelo, fruto del uso excesivo de fertilizantes a lo largo de los años. De acuerdo con los resultados del complejo de cambio, esta práctica también ha contribuido a los elevados niveles de potasio soluble obtenidos. El carbono en disolución no mostró variaciones entre los diferentes acolchados.

El carbono extraído en agua caliente se incrementó en los suelos tratados con los acolchados orgánicos (corteza de pino y helecho) en comparación con los suelos sin tratamiento (control). El carbono lábil constituye una potencial fuente de energía para los microorganismos presentes

en el suelo. En este aspecto, se aprecian ligeras diferencias de los efectos de los acolchados sobre los cultivos, siendo el *mulch* de helecho el que obtuvo los valores más elevados de carbono lábil para el cultivo de pimiento y el *mulch* de corteza de pino para el cultivo de tomate cherry. El carbono se incorpora al suelo mediante la descomposición de la materia orgánica. Diferentes factores, como el clima, la temperatura, el tipo y uso del suelo, o las características del acolchado pueden influir en el contenido de carbono orgánico del suelo (Chalker-Scott, 2007; Ginebra Aguilar *et al.*, 2015; Safari & Kazemi, 2016).

El nitrógeno biodisponible (NH_4^+ y NO_3^- extraídos en KCl) en el suelo mostró una elevada variabilidad tanto entre los diferentes acolchados como entre los cultivos. Contrario a lo que cabría esperar, los valores más elevados de nitrógeno biodisponible en ambos cultivos se obtuvieron en los suelos tratados con malla geotextil. Los acolchados inorgánicos como el geotextil no aportan materia orgánica al suelo. Sin embargo, pueden aumentar la humedad y la temperatura del suelo, lo que favorece la actividad de los microorganismos presentes en el suelo, acelerando los procesos de mineralización y nitrificación (Barajas-Guzmán *et al.*, 2006; Hosseini Bai *et al.*, 2014). En nuestro caso, no se constató un incremento de la humedad, por lo que la temperatura podría ser el factor determinante. Por otra parte, la variabilidad obtenida entre los diferentes acolchados puede verse afectada por el contenido inicial de nutrientes de los *mulch* orgánicos y su grado de descomposición, como muestran los ensayos realizados por Fang *et al.* (2011) y Hosseini Bai *et al.* (2014).

5.2. Efecto del acolchado sobre el contenido de nutrientes de los cultivos

Los valores de concentración de C en los cultivos de lechuga verde y roja fueron ligeramente inferiores a los habituales en tejidos similares de plantas cultivadas. Esto puede deberse a un crecimiento rápido y vigoroso con un efecto de dilución de este elemento, debido a la alta disponibilidad de nutrientes en el suelo y a condiciones favorable de cultivo en el invernadero. Sin embargo, se observaron diferencias entre las variedades de lechuga. Mientras que en ambas variedades los efectos del acolchado con geotextil y corteza de pino se tradujeron en un mayor rendimiento (Montalvo *et al.*, 2024), sólo se aprecia una menor proporción de C en el cultivo de lechuga verde (especialmente en los tratamientos con malla geotextil y corteza de pino). El ciclo de crecimiento más corto del cultivo de lechuga roja y el inicio de la senescencia foliar pudieron atenuar las diferencias entre tratamientos. Por otra parte, el acolchado de helecho no

tiene efectos negativos sobre el C o es característico de cada cultivo, sin relación con el rendimiento. En frutos de tomate el elevado porcentaje de C obtenido con el tratamiento de helecho es independiente de su rendimiento (mayor también en geotextil y corteza de pino). Los valores obtenidos en hojas de pimiento son compatibles con un crecimiento moderado de la variedad cultivada. En este caso no existen diferencias asociadas al tratamiento con mejor rendimiento (geotextil).

En lechuga verde, dos macronutrientes (K y Ca) presentaron una mayor concentración en los acolchados que aportan mejor rendimiento (geotextil y corteza de pino). Sin embargo, para otros macronutrientes en lechuga verde y para el conjunto de macronutrientes en lechuga roja no se observaron efectos relevantes según el tipo de acolchado. La elevada fertilidad de los suelos, junto con el ciclo de crecimiento más corto del cultivo de lechuga roja mencionado anteriormente, podrían contribuir a las diferencias observadas. Los macronutrientes en hoja de pimiento y en frutos de tomate cherry (excepto en helecho que es mayor la concentración) no muestran efectos de los tratamientos, siendo su concentración independiente del rendimiento.

En lechuga verde, dos micronutrientes presentaron mayor concentración en acolchado de geotextil y corteza de pino (Fe), o geotextil y helecho (Zn), por lo que no existe relación con su rendimiento. En lechuga roja el Fe disminuye en los tratamientos de corteza de pino y helecho, mientras que el Zn es mayor en geotextil y helecho. Sin embargo, no se observaron efectos relevantes del tipo de acolchado para otros micronutrientes en ambas variedades. Los micronutrientes en hoja de pimiento y en frutos de tomate cherry (excepto en helecho que es mayor la concentración) no manifiestan efectos de los tratamientos, siendo su concentración independiente del rendimiento.

En resumen, de forma general no existen efectos de los acolchados sobre el contenido de C, macro y micronutrientes de los cultivos, o son muy pequeños, y no muestran una relación muy intensa con su rendimiento. Las variaciones observadas responden a diversos factores como la elevada fertilidad de los suelos, la disponibilidad de agua o las características de las especies vegetales estudiadas. Los requisitos nutricionales de cada cultivo, las estrategias para la captación de nutrientes o la forma y extensión de las raíces pueden explicar estas variaciones observadas (Barley, 1970; Kirschbaum & Mueller, 2001).

Sin embargo, la elevada concentración de C, macro y micronutrientes obtenida en frutos de tomate cherry bajo el tratamiento con helecho sugiere que en ciertas especies o variedades hortícolas algunos acolchados pueden promover una mayor disponibilidad y captación de nutrientes por las plantas, reflejándose en una mayor cantidad total de nutrientes en la biomasa foliar o de frutos (Fang *et al.*, 2011; Hosseini Bai *et al.*, 2014).

En **síntesis**, los acolchados estudiados presentan las siguientes características:

La **mallá geotextil** impide el crecimiento de malas hierbas y mejora considerablemente la producción de los cultivos, tal y como se muestra en el ensayo realizado por Montalvo *et al.* (2024). En cuanto a las características del suelo, el geotextil mejora la capacidad de cambio y la biodisponibilidad de nitrógeno. Esto podría deberse a un incremento de la temperatura producido por el acolchado, estimulando los procesos descomponedores de los diferentes microorganismos presentes en el suelo y la incorporación de nutrientes. Por otro lado, contribuye de forma general a la absorción de los diferentes macro y micronutrientes.

La **corteza de pino** ofrece resultados similares a la mallá geotextil en el control de las malas hierbas y la producción de los cultivos (excepto pimiento). En cuanto a las características del suelo mejora la conservación de la humedad, así como la capacidad de cambio y el contenido en carbono lábil. Sin embargo, estos efectos no se traducen en cambios en la concentración en plantas, como se ha mencionado. Además, mejora de forma general la absorción de nutrientes, con resultados similares a la mallá geotextil. Este acolchado resulta especialmente útil para el cultivo de lechuga verde, mejorando la captación de K, Ca y Fe.

El **helecho** no impide el crecimiento de las malas hierbas ni incrementa la producción de los cultivos. En cuanto a las características del suelo, se comporta de forma similar a la corteza de pino, mejorando la conservación de humedad y el contenido en carbono lábil. El helecho mejora de forma general la absorción de nutrientes de la planta, especialmente en el cultivo de tomate cherry, igualando e incluso superando a la mallá geotextil. Sin embargo, deben considerarse otras interacciones ecológicas como efectos alelopáticos negativos asociados al helecho, que puedan limitar el desarrollo de los cultivos de invernadero.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación llevado a cabo en colaboración con la Fundación Matrix, Investigación y Desarrollo Sostenible, que busca optimizar la horticultura orgánica de invernadero (cada vez más extendida en España), aplicando prácticas sostenibles para reducir el uso de fertilizantes y mejorar la eficiencia del uso del agua. El *mulching* con malla geotextil es una técnica muy utilizada para el control de las malas hierbas y la conservación de la humedad del suelo. Sin embargo, constituye una importante fuente de contaminación por microplásticos.

Este trabajo planteó evaluar la viabilidad de acolchados de carácter orgánico (corteza de pino y helecho) como alternativas sostenibles a la malla geotextil. En base a los resultados obtenidos, se puede concluir:

1. Los acolchados orgánicos de corteza de pino y helecho mostraron de forma general resultados similares a la malla geotextil sobre las propiedades del suelo, con ligeras mejoras la conservación de humedad y el contenido en carbono lábil del suelo.
2. Los acolchados orgánicos de corteza de pino y helecho mostraron resultados similares e incluso mejores a la malla geotextil en la concentración de macro y micronutrientes de los cultivos estudiados (lechuga verde, lechuga roja, pimiento y tomate cherry)
3. El efecto de los acolchados sobre la mejora de las condiciones del suelo y los niveles nutritivos de las plantas se reflejó en un aumento de la producción en los suelos tratados con corteza de pino y malla geotextil, pero no en los tratados con helecho.

Por tanto, la corteza de pino puede ser una alternativa viable a la malla geotextil para los cultivos estudiados en la horticultura de invernadero. A pesar de que el helecho puede mejorar el contenido de nutrientes de ciertos cultivos como el tomate cherry, se deben considerar posibles efectos alelopáticos negativos que puedan afectar a la producción de estos cultivos. Sería interesante ensayar con nuevos acolchados que combinen las características de la corteza de pino y el helecho, pudiendo observarse efectos sinérgicos entre ambos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Altland, J. E., Locke, J. C., & Krause, C. R. (2014). Influence of Pine Bark Particle Size and pH on Cation Exchange Capacity. *HortTechnology*, 24(5), 554-559.
2. Barajas-Guzmán, M. G., Campo, J., & Barradas, V. L. (2006). Soil water, nutrient availability and sapling survival under organic and polyethylene mulch in a seasonally dry tropical forest. *Plant and Soil*, 287(1), 347-357.
3. Barley, K. P. (1970). The Configuration of the Root System in Relation to Nutrient Uptake. En N. C. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 22, pp. 159-201). Academic Press.
4. Billeaud, L. A., & Zajicek, J. M. (1989). Influence of Mulches on Weed Control, Soil pH, Soil Nitrogen Content, and Growth of *Ligustrum japonicum*. *Journal of Environmental Horticulture*, 7(4), 155-157.
5. Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, 51(3), 518-530.
6. Broschat, T. K. (2007). Effects of Mulch Type and Fertilizer Placement on Weed Growth and Soil pH and Nutrient Content. *HortTechnology*, 17(2), 174-177.
7. Buczkowska, H. (1995). Effect of different mulches on the thermal soil conditions and on the yield of sweet pepper in the open field. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 419, 1-8.
8. Chalker-Scott, L. (2007). Impact of Mulches on Landscape Plants and the Environment—A Review. *Journal of Environmental Horticulture*, 25(4), 239-249.
9. Duryea, M. L., English, R. J., & Hermansen, L. A. (1999). A Comparison of Landscape Mulches: Chemical, Allelopathic, and Decomposition Properties. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 25(2), 88-97.
10. El-Beltagi, H. S., Basit, A., Mohamed, H. I., Ali, I., Ullah, S., Kamel, E. A. R., Shalaby, T. A., Ramadan, K. M. A., Alkhateeb, A. A., & Ghazzawy, H. S. (2022). Mulching as a Sustainable Water and Soil Saving Practice in Agriculture: A Review. *Agronomy*, 12(8), Article 8.

11. Fang, S., Xie, B., Liu, D., & Liu, J. (2011). Effects of mulching materials on nitrogen mineralization, nitrogen availability and poplar growth on degraded agricultural soil. *New Forests*, 41(2), 147-162.
12. Farzi, R., Gholami, M., Baninasab, B., & Gheysari, M. (2017). Evaluation of different mulch materials for reducing soil surface evaporation in semi-arid region. *Soil Use and Management*, 33(1), 120-128.
13. Giménez Morera, A. (2010). *Utilización de Agrotexiles. Análisis de viabilidad y modelización de la eficacia*. (Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València).
14. Ginebra Aguilar, M., Rodríguez Alfaro, M., Calero Martin, B., Ponce de León, D., & Font Vila, L. (2015). Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. *Cultivos Tropicales*, 36(3), 64-70.
15. Goyal, M.R., Guadalupe L.R., Rivera L.R. & Hernandez E.R. (1984). Effects of Plastic Mulch Types on Crop Performance of Drip Irrigated Winter and Summer Peppers. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 68(3), 297-305.
16. Griffin, J. J., Reid, W. R., & Bremer, D. J. (2007). Turf Species Affects Establishment and Growth of Redbud and Pecan. *Hortscience*, 42(2), 267-271.
17. Hooker, K. V., Coxon, C. E., Hackett, R., Kirwan, L. E., O’Keeffe, E., & Richards, K. G. (2008). Evaluation of cover crop and reduced cultivation for reducing nitrate leaching in Ireland. *Journal of Environmental Quality*, 37(1), 138-145.
18. Hosseini Bai, S., Blumfield, T. J., & Reverchon, F. (2014). The impact of mulch type on soil organic carbon and nitrogen pools in a sloping site. *Biology and Fertility of Soils*, 50(1), 37-44.
19. INE. Instituto Nacional de Estadística. (s. f.). INE. Disponible en Internet en: <https://ine.es/>
20. Issac, M. N., & Kandasubramanian, B. (2021). Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(16), 19544-19562.
21. Kirschbaum, M. U. F., & Mueller, R. (Eds.). (2001). Nutrient Uptake and Use in Plant Growth. En *Net ecosystem exchange: Workshop proceedings, CRC for Greenhouse Accounting, April 2001* (pp. 75-81). Net Ecosystem Exchange Workshop, Canberra. CRC for Greenhouse Accounting.

22. *MeteoGalicia*. (s. f.). *Predicción do tempo de Galicia*. *MeteoGalicia*. Disponible en Internet en: <https://www.meteogalicia.gal/web/home>
23. Montalvo, J., Monterroso, C., & García-Villanueva, O. (2024). *Effects of Geotextile and Pine Bark on soil, yield and weed control in organic greenhouse horticulture in raised-beds*. XV International Agriculture Symposium «AGROSYM 2024», Bosnia y Herzegovina.
24. Mulumba, L. N., & Lal, R. (2008). Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 98(1), 106-111.
25. Owen, K. M., & Marrs, R. H. (2001). *The Use of Mixtures of Sulfur and Bracken Litter to Reduce pH of Former Arable Soils and Control Ruderal Species*. *Restoration Ecology*, 9(4), 397-409.
26. Pandey, G. K., & Mahiwal, S. (2020). Role of Potassium: An Overview. En G. K. Pandey & S. Mahiwal (Eds.), *Role of Potassium in Plants* (pp. 1-9). Springer International Publishing.
27. *Propiedades dos Solos de Galicia*. (s. f.). Disponible en Internet en: <http://rgis.cesga.es/index.html>
28. Ramanayaka, S., Zhang, H., & Semple, K. T. (2023). Plastic Mulch-Derived Microplastics in Agricultural Soil Systems. En *Microplastics in the Ecosphere* (pp. 233-247). John Wiley & Sons, Ltd.
29. Rossi, G., Beni, C., & Neri, U. (2024). Organic Mulching: A Sustainable Technique to Improve Soil Quality. *Sustainability*, 16(23), Article 23.
30. Safari, N., & Kazemi, F. (2016). (PDF) Examining performances of organic and inorganic mulches and cover plants for sustainable green space development in arid cities. *Desert*, 21(1), 65-75.
31. Shen, H., Sun, Y., Duan, H., Ye, J., Zhou, A., Meng, H., Zhu, F., He, H., & Gu, C. (2023). Effect of PVC microplastics on soil microbial community and nitrogen availability under laboratory-controlled and field-relevant temperatures. *Applied Soil Ecology*, 184, 104794.
32. Sonu, K., Samdarshi, S., Gadekar, K. E., & Kumawat, K. K. (2023). Role of Organic and Inorganic Mulch in Crop Production. *AkiNik Publications® New Delhi*, 183.

33. Taylor, J. E., & Thomson, J. A. (1998). Bracken litter as mulch: Glasshouse evaluation of phytotoxicity. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38(2), 161-169.
34. Thakur, M., & Kumar, R. (2021). Mulching: Boosting crop productivity and improving soil environment in herbal plants. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 20, 100287.
35. Touchaleaume, F., Martin-Closas, L., Angellier-Coussy, H., Chevillard, A., Cesar, G., Gontard, N., & Gastaldi, E. (2016). Performance and environmental impact of biodegradable polymers as agricultural mulching films. *Chemosphere*, 144, 433-439.
36. Tukey, R. B., Schoff, E. L., Tukey, R. B., & Schoff, E. L. (1963). Influence of different mulching materials upon the soil environment. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 82, 68-76.
37. Wang, Z., Li, W., Li, W., Yang, W., & Jing, S. (2023). Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures. *Chemosphere*, 317, 137762.
38. Wästerlund, I., & Ingelög, T. (1980). Fruit body production of larger fungi in some young Swedish forests with special reference to logging waste. *Forest Ecology and Management*, 3, 269-294.
39. White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511.
40. Yang, Y., Li, Z., Yan, C., Chadwick, D., Jones, D. L., Liu, E., Liu, Q., Bai, R., & He, W. (2022). Kinetics of microplastic generation from different types of mulch films in agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 814, 152572.