



UNIVERSIDAD
ALMERÍA

DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN AGRICULTURA PROTEGIDA

TESIS DOCTORAL

**EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF ORGANIC MATTER ON THE NUTRITIONAL
STATUS OF THE SOIL AND THE CROP**

**EFFECTO DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIA ORGÁNICA SOBRE EL ESTADO
NUTRICIONAL DEL SUELO Y EL CULTIVO**

ISIDORO CARRICONDO MARTÍNEZ

Almería, julio de 2023

Directora: María del Carmen Salas Sanjuán. Departamento de Agronomía,
Universidad de Almería, España.

Efecto de diferentes tipos de materia orgánica sobre el estado nutricional del suelo y el cultivo

Effect of different types of organic matter on the nutritional status of the soil and the crop

ISIDORO CARRICONDO MARTÍNEZ

Programa de Doctorado en Agricultura Protegida Universidad de Almería

Directora: María del Carmen Salas Sanjuán

Dra. MARIA DEL CARMEN SALAS SANJUAN, Profesora Titular de Universidad del Departamento de Agronomía de la Universidad de Almería, como directora de la Tesis Doctoral titulada “Efecto de diferentes tipos de materia orgánica sobre el estado nutricional del suelo y el cultivo”, realizada por D. ISIDORO CARRICONDO MARTÍNEZ, alumno del Programa de Doctorado en Agricultura Protegida, para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Almería.

AUTORIZA:

La presentación de dicha Tesis para que se proceda al trámite de su lectura y defensa ante el tribunal correspondiente. Y para que así conste, expido la presente autorización en Almería, a 7 de junio de 2023.

Fdo.: Dra. María del Carmen Salas Sanjuán

Agradecimientos

Especial agradecimiento a mi mujer Catina, por su paciencia y apoyo recibido todos estos años.

A mis compañeros/amigos de NATURSUR S.C.A. y TECOMSA S.L. os quiero dar las gracias de manera encarecida porque este camino ha sido muy largo y difícil, pero como siempre os digo, al final lo conseguimos si nos lo proponemos.

Gracias a mi directora de Tesis Dra. María del Carmen Salas Sanjuán por confiar todos estos años en mí y ser paciente en mis idas y venidas, siendo vital su apoyo y conocimiento.

Resultados de la Tesis publicados como artículos y comunicaciones y ponencias a Congresos:

Artículos en revistas indexadas

Carricondo-Martínez, I., Falcone, D., Berti, F., Orsini, F., & Salas-Sanjuan, M. D. C. Use of Agro-Waste as a Source of Crop Nutrients in Intensive Horticulture System. *Agronomy* **2022**, 12(2), 447.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12020447> (Q1 Índice de impacto: 3,949)

Carricondo-Martínez I., Berti, F., Salas-Sanjuán, M.C. Different Organic Fertilisation Systems Modify Tomato Quality: An Opportunity for Circular Fertilisation in Intensive Horticulture. *Agronomy* **2022**, 12, 174.

<https://doi.org/10.3390/agronomía12010174> (Q1 Índice de impacto: 3,949)

Participación en congresos y jornadas

Carricondo-Martínez, I.; Ruiz, J.L.; Salas-Sanjuan, M. D. C. 2018. EFECTO, A CORTO PLAZO, DEL TIPO DE MATERIA ORGÁNICA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN UN ENARENADO Y PRODUCCIÓN DE UN CULTIVO EN INVERNADERO. REC 2018 VALENCIA. INSTITUTO VALENCIANO DE INVESTIGACIONES AGRARIAS (IVIA)

Carricondo-Martínez, I.; Ruiz, J.L.; Salas-Sanjuán, M. D. C. 2018. RESTOS VEGETALES UTILIZADOS COMO ENMIENDA: EFECTO SOBRE PRODUCCIÓN Y FERTILIZACIÓN EN CULTIVO TOMATE EN INVERNADERO. UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Carricondo-Martínez, I.; Ruiz, J.L.; Salas-Sanjuan, M. D. C. 2019. RESTOS VEGETALES UTILIZADOS COMO ENMIENDA: SU EFECTO SOBRE PRODUCCIÓN Y FERTILIZACIÓN EN CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO. Universidad de Almería.

Carricondo-Martínez, I.; Falcone, D.; Ruiz, J.L.; Salas-Sanjuan, M. D. C. 2020. COMPOSTAJE-VERMICOMPOSTAJE APROVECHAMIENTO DE RESTOS VEGETALES COMO ENMIENDA EN CULTIVOS HORTICOLAS. Universidad de Almería.

Carricondo-Martínez, I. 2020. GESTION DE SUBPRODUCTOS Y RESTOS HORTÍCOLAS: UNA CIRCULARIDAD POSIBLE. UNIVERSIDAD DE ALMERÍA.

Carricondo-Martínez, I. 2022. GESTION DE RESIDUOS VEGETALES. PROCESO DE VERMICOMPOSTAJE. IFAPA. La Mojonera.

Carricondo-Martínez, I. 2022. JORNADA BUENAS PRÁCTICAS SOBRE GESTION RESIDUOS AGRARIOS. IFAPA. La Mojonera.

Índice

Contenido

Efecto de diferentes tipos de materia orgánica sobre el estado nutricional del suelo y el cultivo

Resumen

Effect of different types of organic matter on the nutritional status of the soil and the crop.

Abstract

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. Sistema de producción hortícola intensivo de Almería. Problemática	20
1.2. Transición hacia una horticultura intensiva circular	25
1.3. Formas de gestión de los residuos orgánicos para su reutilización	26
1.4. Reutilización de los restos vegetales: Fertilización orgánica en horticultura intensiva:	30
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	38
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	40
CAPÍTULO 4. USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO FUENTE DE NUTRIENTES PARA CULTIVOS EN HORTICULTURA INTENSIVA.	48
4.1. Introducción	51
4.2. 52	
4.2.1. Diseño del experimento	52
4.2.2.	53
4.2.3.	54
4.3.	54
4.3.1.	54
4.3.2.	56
4.3.3. Microorganismos	58
4.3.4. Actividad enzimática	59
4.3.5. Correlaciones de Pearson de las propiedades biológicas del suelo	61
4.4. Conclusiones	63
Bibliografía	64
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DEL EXTRACTO CELULAR DE PECIOLO EN EL DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL EN CULTIVO DE TOMATE CON FERTILIZACIÓN ORGÁNICA.	68
Resumen	69
5.1. Introducción	70
5.2. Materiales y Métodos.	74
5.2.1. Diseño experimental.	74
	10

5.2.2. Análisis.	76
5.2.3. Análisis estadístico	76
5.3. Resultados y discusión.	77
5.3.1 En función del tipo de fertilización: Fertirriego mineral vs enmienda orgánica.	77
5.3.2. En función de la fuente de materia orgánica empleada como nutriente.	79
5.3.3. En función del estado fenológico del cultivo en el momento de la toma de muestra de savia.	83
5.3.4. Análisis de componentes.	85
5.4. Conclusiones	87
Bibliografía	88
CAPÍTULO 6. DIFERENTES SISTEMAS DE FERTILIZACIÓN ORGÁNICA MODIFICAN LA CALIDAD DEL TOMATE: UNA OPORTUNIDAD PARA LA FERTILIZACIÓN CIRCULAR EN HORTICULTURA INTENSIVA.	90
6.1. Introducción.	91
6.2. Materiales y métodos.	92
6.2.1. Diseño del experimento.	92
6.2.2. Muestreo y análisis.	94
a. Rendimiento.	94
b. Análisis físico de frutas.	94
c. Evaluación del color de las frutas.	95
d. Parámetros químicos de las frutas.	95
e. Características químicas del suelo.	95
f. Análisis estadístico.	96
6.3. Resultados y discusión.	96
6.3.1. Rendimiento de tomate.	96
6.3.2. Calidad del tomate.	97
a. Propiedades físicas del tomate.	97
b. Propiedades químicas del tomate.	99
6.3.3. Propiedades químicas del suelo.	100
6.3.4. Influencia de las propiedades del suelo en el rendimiento y la calidad del tomate.	102
6.4. Conclusiones.	104
Bibliografía	105
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES.	111

Índice de tablas y figuras

Tabla 1.1. Estimación de los residuos vegetales en fresco (hojas, tallos y frutos no comerciales) para los principales cultivos hortícolas de la provincia de Almería.

Tabla 1.2. Plantas de compostaje de la provincia de Almería (Adaptado de revisión de la Junta de Andalucía, 2016).

Tabla 1.3. Gestión de residuos agrícolas en Almería.

Tabla 1.4. Principales características del material vegetal empleado como abonado en verde, del compost y vermicompost según diferentes estudios.

Tabla 3.1. Propiedades físico-químicas del suelo antes de empezar el ensayo.

Tabla 3.2. Cronología de los 6 ciclos de cultivo de tomate realizados en el experimento.

Tabla 3.3. Propiedades físico-químicas de los materiales orgánicos usado como enmienda/fertilizante: GM (estiércol); CR (residuos verdes); CO (compost); V (vermicompost).

Tabla 4.1. Descripción de los ciclos de producción

Tabla 4.2. Rendimiento total de tomate (kg m^{-2}) en tres ciclos (TC1; TC2; TC3), en función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a razón de 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a razón de 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost aplicado a 3 kg m^{-1} (VermiComp).

Tabla 4.3. Contenido de N-NO₃- y K en savia fresca de peciolo de tomate para dos ciclos (TC2; TC3) como función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost aplicado a 3 kg m^{-1} (VermiComp).

Tabla 4.4 Concentración de bacterias totales (BT), hongos totales (FT) y bacterias amonificantes (AB) expresado en unidades formadoras de colonias (UFC) $\text{g}^{-1} \log_{10}$, en la rizósfera en tercer ciclo (TC3) como función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost aplicado a razón de 3 kg m^{-1} (VermiComp).

Tabla 5.1. Estimación de los residuos vegetales en peso fresco (hojas, tallos y frutos no comerciales) según los principales cultivos hortícolas de la provincia de Almería

Tabla 5.2. Análisis de savia publicados en diferentes estudios

Table 5.3. Análisis de los materiales orgánicos empleados como enmienda en cada uno de los tratamientos: Est (Estiércol); Veg (residuos vegetales); Com (compost); Vco (vermicompost).

Tabla 5.4. Concentración de elementos minerales (mmol L^{-1}) del agua empleada para riego de los cultivos y la solución nutritiva empleada para fertirrigación del tratamiento FerMin

Tabla 5.5. Descripción de los ciclos de producción.

Tabla 5.6. Concentración de iones en savia y consumo hídrico de un cultivo de tomate en invernadero en función del ciclo de cultivo y el tipo de fuente y forma de aplicación de nutrientes. FerMin (fertirrigación solución mineral); Com (compost); Vco (vermicompost); Est (Estiércol); Veg (residuos vegetales).

Figuras:

Figura 1.1 Modelo de horticultura lineal (arriba) y modelo de horticultura circular (abajo)

Figura 1.2. Proceso de compostaje (Fuente: Ferrer-Zamora, 2021)

Figura 1.3. Evolución de la materia orgánica aportada al suelo. Fuente: Román et al. (2013)

Figura 3.1. Cronología de los 6 ciclos consecutivos de cultivo de tomate e indicando el momento en el que se aplicaron las enmiendas orgánicas.

Figura 3.2. Resumen gráfico de la investigación.

Figura 4.1. Evolución de (A) la actividad deshidrogenasa (DHA), (B) la actividad de fosfatasa ácida (ACP), (C) la actividad β -glucosidasa (-GLU) en el suelo durante tres ciclos de cultivo (TC1, TC2, TC3) en función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a razón de 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost aplicada a razón de 3 kg m^{-1} (VermiComp). DDT, Día Después del Trasplante. Diferencias en las letras indican diferencias significativas entre tratamientos al 95% de nivel de confianza ($p \leq 0.05$; LSD de Fisher).

Figura 4.2. Correlación producto-momento de Pearson en relación a las propiedades biológicas del suelo en los tres ciclos (TC3).

Figura 5.1. Niveles de H_2PO_4^- , Ca y Na en savia según día de muestreo. DDE: días después de la enmienda y DDT: días después del trasplante. FerMin (fertirrigación solución mineral); Com (compost); Vco (vermicompost); Est (Estiércol); Veg (residuos vegetales). Cultivo de tomate en el ciclo de primavera (3 TC2) y otoño (4 TC3).

Figura 5.2. Análisis de Componentes Principales. Arriba: Ciclo primavera (3 TC2) y Abajo: Ciclo otoño (4 TC3).

Figura 6.1. Fertilización convencional y gestión de residuos (arriba) y fertilización circular y gestión de residuos (abajo).

Figura 6.2. Historia de la parcela orgánica desde el ciclo 1 hasta el ciclo 6.

Figura 6.3. Relaciones PCA entre el rendimiento del tomate, la calidad del tomate y las propiedades químicas del suelo.

Fotografías:

Fotografía 1.1. Visión de los invernaderos de Almería, cultivo de tomate del ensayo incluido en la tesis, residuos vegetales hortícolas, frutos de tomate del experimento.

Fotografía 3.1. Restos vegetales cultivo de tomate, compost y vermicompost de restos de cultivo de tomate. Detalle de ensayo de cultivo de tomate

Fotografía 4.1. Detalle del cultivo de tomate, operación para la incorporación de los materiales orgánicos entre cultivos, siembra en laboratorio para conteo microbiano. peciolos para la extracción de savia y muestras de savia previo al análisis de iones.

Fotografía 5.1. Detalle del cultivo de tomate, hoja para el análisis de savia, eliminación de foliolo de la hoja previo a la extracción de savia, pecíolos para la extracción de savia y muestras de savia previo al análisis de iones.

Fotografía 6.1. Detalle del proceso de incorporación de los materiales orgánicos empleados como enmienda, cultivo de tomate, lixímetros y goteros de control empleados para el muestreo de lixiviados y riego durante el cultivo, producción de tomate y medidas de calidad.

Efecto de diferentes tipos de materia orgánica sobre el estado nutricional del suelo y el cultivo.

Resumen.

En el sistema de producción hortícola intensivo de Almería se generan cada año alrededor de 2 millones de toneladas de residuos vegetales. Para el aprovechamiento de los restos orgánicos y la implementación de un modelo circular, una de las soluciones más viable es la auto gestión por parte de los agricultores, mediante el uso de los residuos como fuentes de nutrientes y/o enmienda. Para promover esta práctica de gestión es necesario estudiar los efectos de una fertilización orgánica a largo plazo sobre la calidad y cantidad de las producciones.

El objetivo general de este trabajo fue implementar una gestión circular de los residuos en un invernadero durante 6 ciclos consecutivos de tomate (3 años), en contraposición a la fertilización mineral por fertirriego, evaluando principalmente los efectos sobre los rendimientos, la calidad de la producción y las características del suelo. El objetivo general de la tesis es determinar el efecto de la aplicación de enmiendas/fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales generados en la finca sobre la producción y calidad de los frutos de cultivos de tomate, sobre el estado nutricional del cultivo de tomate (extracto de peciolo), como consecuencia de los cambios generados en las propiedades químicas y biológicas del suelo.

Se establecieron los tratamientos del experimento incorporando al suelo material vegetal procedente de residuo de cultivo fresco, después de procesos de compostaje y vermicompostaje. También se incluyó un tratamiento de control con fertirrigación mineral y un tratamiento de control orgánico con estiércol de cabra compostado.

Los resultados de los experimentos durante los 6 ciclos de cultivo, no dieron diferencias estadísticas en los rendimientos entre tratamientos en el primer ciclo. Sin embargo, en el segundo y tercer ciclo, el rendimiento obtenido con la aplicación de enmiendas orgánicas derivadas de agrorresiduos fue comparable al rendimiento obtenido con fertilizantes. Con respecto al efecto sobre la microbiota del suelo, el tratamiento con compost resultó en una mayor presencia de microorganismos en el suelo. Fueron cuantificadas 3 tipos de actividad enzimática en el suelo en función de la materia orgánica aplicada. La actividad deshidrogenasa del suelo (DHA), la actividad de la fosfatasa ácida (ACP) y la actividad de la β -glucosidasa (β -GLU) generalmente se estimularon más cuando se usaron enmiendas orgánicas. Los resultados mostraron que la abundancia total de bacterias, principalmente la abundancia de bacterias amonificantes, y la actividad enzimática del suelo aumentaron con la aplicación de fertilizantes orgánicos. Los cambios en la abundancia microbiana del suelo se observan a corto plazo y se correlacionan positivamente con la actividad enzimática.

La aplicación de fertilizantes orgánicos permite restaurar la microbiota del suelo, que mineraliza y solubiliza los nutrientes, evitando las deficiencias nutricionales de las plantas (la concentración de N-NO_3^- y K^+ en savia fue estadísticamente comparable a la fertilización mineral) y pérdidas de producción. Sin embargo, los resultados que relacionan la producción con el estado nutricional, según los análisis en savia, el H_2PO_4^- se convierte en un elemento limitante para los cultivos cuando fertilizamos con enmiendas orgánicas como el compost, restos vegetales de cultivo enterrados y estiércol. Lo que obliga a tener que seleccionar las fuentes de nutrientes orgánicas por sus características físico, químicas y biológicas que nos permitan eliminar la fertirrigación mineral de los cultivos, con un control sobre la capacidad de mejorar los niveles en suelo y consecuentemente en savia.

Entre las diferentes alternativas para valorizar los residuos agrícolas en un sitio de horticultura intensiva, los resultados sugieren que el uso de los residuos vegetales como fuente de nutrientes es una estrategia válida para limitar el uso de fertilizantes químicos, ya que ayuda a mejorar la salud biológica del suelo sin comprometer el rendimiento. El compost o vermicompost de residuos vegetales puede incorporarse satisfactoriamente al suelo. Además, se ha estudiado que la fertilización con materiales derivados de residuos agrícolas mejora la calidad del tomate, lo que resulta en un alto contenido de licopeno, ácido ascórbico y fenoles.

Los resultados indican que el manejo de la nutrición vegetal con vermicompost elaborado a partir de residuos vegetales de ciclos anteriores de tomate, con una dosis estándar de 3 kg m^{-1} (V3) y una dosis superior de 9 kg m^{-1} (V9), como única fuente de nutrientes, permite igualar los rendimientos obtenidos con el tratamiento químico de fertirrigación (FI). Además, los tratamientos con enmiendas de vermicompost dieron como resultado tomates de alta calidad nutricional, ya que la dosis de vermicompost a 3 kg m^{-1} (V3) permite obtener un mayor contenido de licopeno, igual al tratamiento con fertilizantes minerales. Además, los tomates tratados con la dosis más elevada de vermicompost a 9 kg m^{-1} (V9) mostraron una mejora en la síntesis de metabolitos secundarios.

En vista de la valorización de residuos vegetales agrícolas, futuras investigaciones deberían centrarse en estrategias para enriquecer el compost o vermicompost, derivado de residuos vegetales, con microorganismos para mejorar la eficiencia de los fertilizantes. Además, considerando que la fertirrigación es una práctica común en los sistemas hortícolas, se requiere un mejor conocimiento sobre la potencialidad de los extractos acuosos de compost/vermicompost utilizados como alternativas a las soluciones minerales convencionales. Los resultados de este estudio deberían animar al sector de la horticultura a implementar una estrategia circular en el manejo nutricional de cultivos, reduciendo la necesidad de insumos externos.

Effect of different types of organic matter on the nutritional status of the soil and the crop.

Abstract.

In the intensive horticultural production system of Almería, around 2 million tons of vegetable waste are generated each year. For the use of organic remains and the implementation of a circular model, one of the most viable solutions is self-management by farmers, through the use of residues as sources of nutrients and/or amendment. To promote this management practice, it is necessary to study the effects of long-term organic fertilization on the quality and quantity of productions.

The general objective of this work was to implement a circular management of residues in a greenhouse for 6 consecutive tomato cycles (3 years), as opposed to mineral fertilization by fertigation, mainly evaluating the effects on yields, production quality and the characteristics of the soil. The general objective of the thesis is to determine the effect of the application of organic amendments/fertilizers derived from vegetable residues generated on the farm on the production and quality of the fruits of tomato crops, on the nutritional status of the tomato crop (extract of petiole), as a consequence of the changes generated in the chemical and biological properties of the soil.

The treatments of the experiment arose incorporating plant material from fresh crop residue into the soil, after composting and vermicomposting processes. A control treatment with mineral fertigation and an organic control treatment with composted goat manure were also added.

The results of the experiments during the 6 crop cycles did not obtain statistical differences in the yields between treatments in the first cycle. However, in the second and third cycle, the yield obtained with the application of organic amendments derived from agro-waste was comparable to the yield obtained with fertilizers. Regarding the effect on the soil microbiota, the compost treatment resulted in a greater presence of microorganisms in the soil. Three types of enzymatic activity in the soil were quantified depending on the organic matter applied. Soil dehydrogenase (DHA) activity, acid phosphatase (ACP) activity, and β -glucosidase (β -GLU) activity were generally more stimulated when organic amendments were used. The results showed that the total abundance of bacteria, mainly the abundance of ammonifying bacteria, and the enzymatic activity of the soil increased with the application of organic fertilizers. Changes in soil microbial abundance are observed in the short term and are positively correlated with enzyme activity.

The application of organic fertilizers makes it possible to restore the soil microbiota, which mineralizes and solubilizes nutrients, avoiding nutritional deficiencies in plants (the concentration of N-NO_3^- and K^+ in sap was statistically comparable to mineral fertilization) and production losses. However, the results that relate production to nutritional status, according to sap analyses, H_2PO_4^- becomes a limiting element for crops when we fertilize with organic amendments such as compost, buried plant remains and manure. This forces us to have to select organic nutrient sources based on their physical, chemical and biological characteristics that allow us to eliminate mineral fertigation from crops, with control over the ability to improve levels in the soil and consequently in sap.

Among the different alternatives to valorize agricultural residues in an intensive horticulture site, the results suggest that the use of vegetable residues as a source of nutrients is a valid strategy to limit the use of chemical fertilizers, since it helps to improve biological health. soil without compromising performance. Compost or vermicompost from plant residues can be satisfactorily incorporated into the soil. In addition, fertilization with materials derived from

agricultural residues has been studied to improve tomato quality, resulting in a high content of lycopene, ascorbic acid, and phenols.

The results indicate that the management of plant nutrition with vermicompost made from plant residues from previous tomato cycles, with a standard dose of 3 kg m⁻¹ (V3) and a higher dose of 9 kg m⁻¹ (V9) , as the only source of nutrients, allows to equalize the yields obtained with the chemical treatment of fertigation (FI). In addition, the treatments with vermicompost amendments resulted in tomatoes of high nutritional quality, since the dose of vermicompost at 3 kg m⁻¹ (V3) allows obtaining a higher lycopene content, equal to the treatment with mineral fertilizers. In addition, tomatoes treated with the highest dose of vermicompost at 9 kg m⁻¹ (V9) showed an improvement in the synthesis of secondary metabolites.

In view of the valorization of agricultural plant residues, future research should focus on strategies to enrich compost or vermicompost, derived from plant residues, with microorganisms to improve the efficiency of fertilizers. Furthermore, considering that fertigation is a common practice in horticultural systems, a better understanding of the potential of compost/vermicompost aqueous extracts used as alternatives to conventional mineral solutions is required. The results of this study should encourage the horticulture sector to implement a circular strategy in crop nutritional management, reducing the need for external inputs.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.



Fotografía 1.1. Visión de los invernaderos de Almería, cultivo de tomate del ensayo incluido en la tesis, residuos vegetales hortícolas, frutos de tomate del experimento.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Sistema de producción hortícola intensivo de Almería. Problemática.

El modelo agrícola de Almería representa el paradigma de la horticultura intensiva, presentando la mayor concentración de invernaderos del mundo (Aznar-Sánchez et al., 2020). Con una superficie de 31.614 ha (Duque-Acevedo et al., 2020), con una producción anual de más de 3 millones de toneladas de fruta y verdura, y una productividad 30 veces superior a la media europea (Aznar-Sánchez et al., 2020; Gallego Fernández et al., 2022). Por ello, España se posiciona como la tercera exportadora de vegetales en el mundo, después de China y EEUU (Duque-Acevedo et al., 2020).

El éxito del sistema de producción de Almería se debe a la adopción de tecnologías innovadoras que han permitido la producción hortícola a gran escala en la zona más árida de Europa. La instalación de invernaderos ha sido el primer paso para poder aprovechar la luz solar y producir durante el invierno. El modelo de invernadero más común en Almería es el tipo “raspa y amagado” (Aznar-Sánchez et al., 2020), que gracias a su estructura permite la evacuación del agua de lluvia que se acumularía en la cubierta de plástico. Gracias a la aplicación de la técnica del “enarenado”, que consiste en la colocación por encima del suelo, de tierra de cañada, estiércol y por último una capa de arena, se ha conseguido un mayor aprovechamiento del agua de riego y una mejora de las condiciones térmicas en la zona radical. Además, el empleo del riego por goteo ha aumentado aún más la eficiencia hídrica. La producción hortícola en la provincia de Almería ha sido apoyada desde su principio por una red comercial y tecnológica que ha permitido su expansión (Tolón Becerra & Lastra Bravo, 2010). La producción almeriense se concentra en ocho especies vegetales: tomate, pimiento, pepino, calabacín, berenjena, judías, melón y sandía (Aznar-Sánchez et al., 2020).

Para garantizar el suministro de alimentos sanos a una población mundial en aumento, los sistemas agrícolas intensivos, como el de Almería, son considerados fundamentales al permitir una mayor eficiencia en el uso de los recursos. La FAO ha promovido estos sistemas como una buena alternativa para la adaptación al cambio climático (Duque-Acevedo et al., 2020). No obstante, a nivel local la producción intensiva causa evidentes y serios problemas de carácter medio-ambiental, y es esencial el estudio de prácticas y tecnologías menos impactantes.

La fertilización de los sistemas hortícolas convencionales se basa en el uso de materiales de síntesis que se aplican vía riego, fertirrigación. Esta metodología ha permitido, por un lado, el aumento de la productividad de los cultivos, y por el otro, su uso indiscriminado provoca la pérdida de fertilidad de los suelos, el deterioro de la población microbiana (Shen et al., 2021), y la contaminación de las aguas subterráneas (Aznar-Sánchez et al., 2020). Además, la producción de fertilizantes minerales genera emisiones de CO₂, contribuyendo al aumento global de las temperaturas (Mona et al., 2021).

La contaminación medioambiental debido a la gestión inapropiada del plástico de uso agrícola es otro problema evidente en zonas de producción agrícola protegida intensiva (Sayadi-Gmada et al., 2019). Por último, cabe destacar la generación de una elevada cantidad de residuos vegetales derivados de la poda, las plantas arrancadas al final del ciclo, las malas hierbas, la fruta no comercial, etc. (Tolón Becerra & Lastra Bravo, 2010). La generación de estos residuos se caracteriza por su estacionalidad, concentrándose principalmente en mayo-junio al terminar los ciclos de primavera-verano, y en febrero al terminar de los ciclos de otoño-invierno, cuando se generan más

de un 70% de los restos (Rural 16, 2016). En Almería más del 90 % del peso de los residuos agrarios generados es de origen vegetal, con 2 millones de toneladas al año (Cajamar, 2016). El cultivo que genera mayor cantidad de residuos vegetales por unidad de superficie es el tomate, seguido por el pimiento y la berenjena (Tolón Becerra & Lastra Bravo, 2010).

Tabla 1.1. Estimación de los residuos vegetales en fresco (hojas, tallos y frutos no comerciales) generados por los principales cultivos hortícolas de la provincia de Almería.

CULTIVOS	Residuos frescos medios (t ha ⁻¹)	Superficie (ha)	Residuos frescos totales (t)
Tomate	73,30	10.380	760.854
Berenjena	44,60	2.150	95.890
Calabacín	44,50	7.755	345.098
Pepino	38,80	5.099	197.841
Pimiento	37,00	10.181	376.697
Melon	33,20	1.808	60.026
Judías verdes	27,40	510	13.974
Sandía	17,00	7.797	132.549
		Total	1.982.928,30

Fuente: Elaborada con datos de Cajamar (2016) y Duque-Acevedo et al., (2020).

Como explican Aznar-Sánchez et al. (2020), el sistema agrícola intensivo actual se basa en un modelo lineal de “extraer-usar-consumir-desechar” que requiere una elevada cantidad de insumos externos y genera elevadas cantidades de material de desecho. La generación de los restos vegetales concentrados en pocos meses durante el año, hace todavía más difícil su gestión por los centros autorizados (Duque-Acevedo et al., 2020).

Existen distintas formas de gestión de estos restos vegetales, entre las que destacan (JJAA, 2016):

1. Entrega a un gestor autorizado para su transformación en compost o vermicompost (Tolón Becerra & Lastra Bravo, 2010).
2. Aprovechamiento o reutilización de los restos vegetales en la propia explotación para hacer abonado en verde o autocompostaje.
3. Entrega a terceros para alimentación de ganado (Márquez et al., 2011).
4. Tratamiento para la obtención de energía eléctrica (Calbo-Antolino, 2018; Callejón-Ferre et al., 2011; Garzón et al., 2018; Morales et al., 2017).

Entre las distintas formas de gestión de los restos vegetales, la entrega a un gestor autorizado para su transformación en compost o vermicompost es con diferencia la más empleada. No obstante, el volumen de los restos vegetales sobrepasa la capacidad de las plantas de compostaje, por lo tanto, es necesario la búsqueda de soluciones alternativas (Gallego-Fernández et al., 2022).

Tabla 1.2. Plantas de compostaje de la provincia de Almería (Adaptación Junta de Andalucía, 2016)

Nombre de la instalación	Municipio	Tratamiento	Capacidad (t año⁻¹)
Ejido Medioambiente S.A.	El Ejido	Compostaje	150.000
Albaida Residuos S.L.	La Mojonera	Compostaje	135.000
Servicios Ambientales las Chozas	El Ejido	Compostaje	47.600
Reciclados Almerienses 2005, S.L.	Almería	Vermicompostaje	7.920
Ecotech Valoriza S.L.	Rioja	Vermicompostaje	1.800
Transportes y Contenedores Antonio Morales, S.A- El Jabonero	Níjar	Compostaje	Sin datos

Tabla 1.3. Gestión de residuos agrícolas en la provincia de Almería.

RAZÓN SOCIAL	NOMBRE DEL CENTRO	MUNICIPIO	TIPO
RAFAEL ALONSO AGUILERA, S.L.	PLANTA DE VALORIZACIÓN DE RNP	TABERNAS	PLANTA DE SECADO Y COMPOSTAJE. PLANTA DE COMPOSTAJE DE ALPEORUJO
SERVICIOS AMBIENTALES LAS CHOZAS, S.L.	CENTRO DE TTO. DE EL EJIDO	EJIDO, EL	PLANTA DE COMPOSTAJE
TRANSPORTES Y CONTENEDORES ANTONIO MORALES, S.A.	CENTRO DE TTO. DE NÍJAR	NÍJAR	TRANSPORTISTA Y PLANTA DE COMPOSTAJE GRU0655
TECOMSA - TÉCNICAS DE COMPOSTAJE, S.L.	CENTRO DE TTO. DE TABERNAS	TABERNAS	PLANTA DE VERMICOMPOSTAJE
ANDALUZA DE RECUPERACIÓN Y COMPOSTAJE S.L. (ARCO)	COMPOSTAJE LODOS (ARCO)	TABERNAS	
ECOTECH VALORIZA, S.L.	ECOTECH VALORIZA, S.L.	RIOJA	PLANTA DE COMPOSTAJE
ALBAIDA RESIDUOS S.L.	PLANTA CLASIFICACION Y COMPOSTAJE RESTOS VEGETALES	MOJONERA, LA	PLANTA DE COMPOSTAJE
AGRICOLA GARCIA. S.L.	PLANTA DE COMPOSTAJE	TAHAL	PLANTA DE COMPOSTAJE
RECICLADOS ALMERIENSES 2005,S.L.	PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS VEGETALES	ALMERÍA	PLANTA DE COMPOSTAJE
EJIDO MEDIO AMBIENTE, S.A.	PLANTA DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS	EJIDO, EL	PLANTA DE COMPOSTAJE
GEOCYCLE	GEOCYCLE (ESPAÑA)_ALBOX	ALBOX	
TECNICAS MEDIOAMBIENTALES AVANZADAS	PLANTA TRATAMIENTO RCD Y DEPÓSITO CONTROLADO DE RNP	MOJONERA, LA	
INES MARIA E HIJOS, S.L.	INES MARÍA E HIJOS, S.L.	HUÉRCAL OVERA	
GRUPO BIAQUI. S.L.	PLANTA DE TRATAMIENTO DE NUTRIENTES ORGANICOS.	EJIDO, EL	PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS CON ALTA CARGA ORGÁNICA

1.2. Transición hacia una horticultura intensiva circular.

La economía circular es “un sistema económico que reemplaza el concepto de *fin de la vida útil* con la reducción, la reutilización alternativa, el reciclaje y la recuperación de materiales en los procesos de producción/distribución y consumo”, de acuerdo con la definición de Kirchherr et al. (2017). Según Sauvé et al. (2016), la economía circular “propone un sistema donde la reutilización y el reciclaje sustituyan el uso de materias primas vírgenes. Disminuyendo nuestra dependencia de dichos recursos, mejorando nuestra capacidad y la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades”.

La legislación europea promueve la transformación de los residuos agrícolas en subproductos (Castillo-Díaz et al., 2021). Dentro del marco del pacto verde europeo, en 2015 la Comisión publicó un Plan de Acción para una economía circular en Europa, renovado en 2020 (CEE, 2020). Según el documento, con respecto al sector agrícola, la Comisión “desarrollará un plan integrado de gestión de nutrientes con el fin de asegurar una aplicación más sostenible de los nutrientes y de estimular los mercados de los nutrientes recuperados”.

A nivel nacional, se ha elaborado una Estrategia Española de Economía Circular (EECC, 2022) que se alinea con los objetivos de los planes de acción europeos de 2015 y 2020. Asimismo, el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente juntos con otros, ha impulsado el Pacto por la Economía Circular con el objeto de implicar a los principales agentes económicos y sociales de España en la transición hacia un nuevo modelo económico (PEECC, 2017). Con el pacto se comprometen, entre otras acciones, en “avanzar en la reducción del uso de recursos naturales no renovables, reutilizando en el ciclo de producción los materiales contenidos en los residuos como materias primas secundarias siempre y cuando quede garantizada la salud de las personas y la protección del medio ambiente”.

En el modelo de economía lineal, los residuos vegetales agrícolas son considerados un problema debido a su inadecuada gestión que causa elevados problemas medioambientales (Aznar-Sánchez et al., 2020; Sayadi-Gmada et al., 2019). Sin embargo, en una horticultura circular estos residuos son considerados una gran oportunidad. Los residuos vegetales, gracias a sus características, constituyen un valioso y preciado material, permitiendo su reutilización dentro del ciclo productivo (Mejía-Guerra, 2022) como fuente de nutrientes para el cultivo, enmienda del suelo, sustrato etc., lo que lleva también a una reducción de la dependencia de insumos externos. Con respecto a la fertilización orgánica basada en el uso de residuos agrícolas, el Plan de economía circular de la comisión europea de 2015 afirma: “los nutrientes reciclados son una categoría distinta e importante de materias primas secundarias, respecto de las cuales es necesario elaborar normas de calidad. Están presentes en los residuos orgánicos, por ejemplo, y se pueden devolver al suelo como fertilizantes. Su uso sostenible en la agricultura reduce la necesidad de fertilizantes minerales, cuya producción tiene efectos negativos para el medio ambiente y depende de la importación de roca fosfatada, un recurso limitado.” El modelo circular aplicado a la agricultura intensiva requiere la adopción de un ciclo cerrado (Toop et al., 2017).

Para ir hacia una horticultura circular, es fundamental guiar a los agricultores hacia prácticas sostenibles y circulares (Duque-Acevedo et al., 2020). Una de las prácticas reconocidas como más viable por diferentes autores es el reciclaje y el uso in situ de la biomasa vegetal generada (Aznar-Sánchez et al., 2020; Castillo-Díaz et al., 2021; Duque-Acevedo et al., 2020). Según las indicaciones de Andalucía publicadas en Rural 16 (2016), la auto gestión de los residuos vegetales es la estrategia objetivo para reducir la presión sobre las plantas de tratamiento (Gallego Fernández et al., 2022). En el mismo documento se afirma que la auto gestión y re-utilización de residuos toma

todavía más significado en los sistemas de producción ecológica, donde el auto compostaje y el abonado en verde con los propios residuos orgánicos provenientes de ciclos anteriores, es una buena alternativa para asegurar el uso de materiales libres de sustancia no autorizadas en el régimen ecológico (Rural 16, 2016). Actualmente, en la provincia de Almería no existe un sistema de gestión integrado de los residuos vegetales que promueva su reutilización dentro de los invernaderos (Duque-Acevedo et al., 2020).

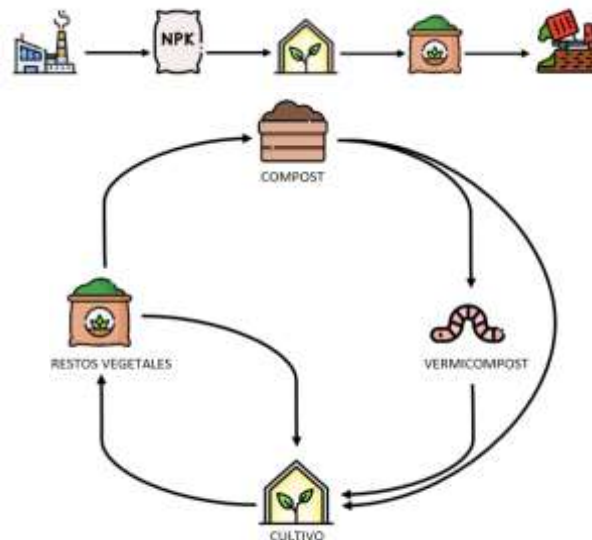


Figura 1.1 Modelo de horticultura lineal (arriba) y modelo de horticultura circular (abajo)

1.3. Formas de gestión de los residuos orgánicos para su reutilización.

Para el aprovechamiento de los restos vegetales por los cultivos en la propia finca existen tres alternativas posibles que contribuyen a cerrar el círculo: el abonado en verde, el compostaje y el vermicompostaje.

Abonado en verde:

El abonado en verde es una práctica ampliamente utilizada en la agricultura extensiva que consiste en la reincorporación al suelo de los restos vegetales frescos. La incorporación de los restos al suelo es una técnica sostenible cada vez más utilizada también en el sistema hortícola intensivo de Almería. Sin embargo, en los suelos enarenados, presentes en el 83% de los invernaderos del poniente almeriense (Rural 16, 2016), es necesario retirar previamente la capa de arena para integrar los restos orgánicos, lo cual puede resultar un limitante para la implementación de esta técnica (Rural 16, 2016).

Los beneficios del abonado en verde son numerosos, entre ellos destacan la mejora de las propiedades del suelo con el aumento del contenido de materia orgánica, la reducción de los costes que derivan de la gestión de residuos y la menor dependencia de los fertilizantes externos. Como limitación, indicar que los materiales orgánicos recién incorporados en el suelo necesitan el tiempo necesario, que depende de varios factores, para su mineralización, por lo tanto, los elementos no se encuentran de inmediato en forma disponibles para contribuir a la nutrición de las plantas (Rural 16, 2016).

Compostaje:

El compostaje es un proceso aeróbico de degradación y transformación de la materia orgánica operado por microorganismos (Mejía-Guerra, 2022). El proceso de compostaje permite la transformación de material orgánico degradable en un producto estable humificado que puede ser utilizado como biofertilizante y enmienda para el suelo (Ruiz y Salas, 2022; Ho et al., 2022)

Antes de empezar el proceso de compostaje es necesaria una fase previa que consiste en la preparación del material separando la mata de las rafias de plásticos y su picado o triturado (Mejía-Guerra, 2022). El proceso de compostaje se compone de cuatro fases térmicas, caracterizadas por actividad microbiana y enzimáticas (Ferrer-Zamora, 2021). Una primera fase mesófila en la cual los microorganismos mesófilos degradan la materia y la temperatura empieza a subir. Una fase termófila donde el metabolismo de los microorganismos termófilos provoca aumento de temperatura hasta los 65-70°C. Esta fase permite la eliminación de patógenos y la degradación de hemicelulosa, celulosa y proteínas (Ferrer-Zamora, 2021). Una vez que los elementos fácilmente disponibles escasean, se produce una reducción de las temperaturas, empezando así la fase de enfriamiento durante la cual se degradan los compuestos más complejos como la lignina. Una última fase de maduración en la que la actividad microbiana se reduce y ocurre la formación de sustancias húmicas (Mejía-Guerra, 2022), obteniéndose un producto estabilizado y humificado.

La duración del proceso de compostaje varía entre 3 y 6 meses, según las condiciones ambientales y el material de partida compostado.

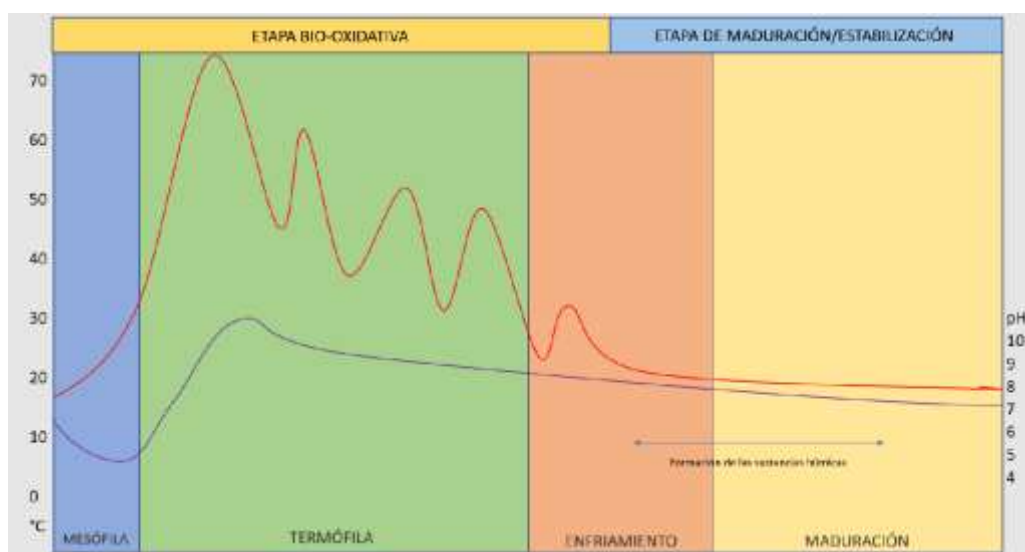


Figura 1.2. Proceso de compostaje (Fuente: Ferrer-Zamora, 2021)

Vermicompostaje:

El vermicompostaje es el proceso de degradación de la materia orgánica basado en la adición de lombrices de la especie *Eisenia andrei* y *Eisenia foetida* (Ducasse et al., 2022; Mejía-Guerra, 2022). La interacción de las lombrices junto a los microorganismos naturalmente presentes en el material, permite la degradación mesofílica (a temperatura ambiente) y la estabilización de material orgánico permitiendo la obtención de un material rico en sustancias húmicas llamado vermicompost (Ducasse et al., 2022; Phooi et al., 2022). Las lombrices facilitan la asimilación de la materia orgánica y el movimiento de comunidades de microorganismos poco móviles (Ducasse et al., 2022).

Al material previamente sometido a un breve proceso de compostaje, por lo menos hasta la fase bio-oxidativa, se le añaden las lombrices. El proceso ocurre en pilas que no superen una altura de 30-40 cm y con una anchura de 1,2 m (Mejía-Guerra, 2022). El vermicompostaje se produce en dos fases: una fase activa de descomposición y una fase de maduración. En la fase activa, se colocan las lombrices en la pila, depositando encima una capa de vermicompost maduro para facilitar la migración de las lombrices a la parte inferior donde está presente material todavía no procesado (Mejía-Guerra, 2022). En esta fase las lombrices ingieren, digieren y expulsan la materia orgánica, y el fraccionamiento de la materia permite una mayor superficie de contacto con los microorganismos (Ducasse et al., 2022).

Entre las ventajas que presenta el vermicompost respecto al compost destacan su mayor contenido de nutrientes disponibles y de microorganismos beneficiosos, una menor conductividad eléctrica (menor contenido en sales) debido principalmente a la humectación durante todo el proceso para mantener una humedad cercana al 80% (Domínguez y Edwards, 2011), los menores tiempo necesario para obtener el producto final debido a que las lombrices descomponen más rápidamente la sustancia orgánica (Mejía-Guerra, 2022).

Tabla 1.4. Principales características del material vegetal empleado como abonado en verde, del compost y vermicompost según diferentes estudios.

Material orgánico	pH	C.E. (dS m ⁻¹)	N (%)	N (mg L ⁻¹)	P (%)	K (%)	M.O. (%)	C/N	Fuente
Residuos vegetales frescos			1,86		2,69	8,94	51,8		(Castillo-Díaz et al., 2021)
Compost restos jardinería y frutos	8,4	2,240		150	3,01	0,7	43,04	9	(Vandecasteele et al., 2022)
Compost de residuos verdes	8,4	1,185		128				12	(Vandecasteele et al., 2022)
Vermicompost	6,52	2,190	0,77		1,90	0,4	10,24		(Wang et al., 2017)
Compost residuos verdes y municipales	7,9		1,70			2,34			(Tondello et al., 2021)
Vermicompost residuos alimentarios			1,30		2,70	9,2			(Arancon et al., 2004)
Vermicompost	6,9		1,50		0,98	1,1			(Murmu et al., 2013)
Compost resíduos vegetales			1,96		0,56	1,34			(De Falco et al., 2021)

1.4. Reutilización de los restos vegetales. Fertilización orgánica en horticultura intensiva.

Los restos vegetales, sobre todo después de un proceso de compostaje o vermicompostaje, pueden ser utilizados con diferentes objetivos en el sector agrícola. Entre sus principales empleos destaca el uso como componente de sustrato sustituyendo a la turba tanto en producciones ornamentales (Hernández-Apaolaza et al., 2005) como en hortícolas en contenedor en cultivo sin suelo (Barrett et al., 2016; de Sousa Antunes et al., 2022; Mejía Guerra et al., 2018; Meng et al., 2018; Vandecasteele et al., 2021) o en viveros forestales (Fuertes-Mendizábal et al., 2021).

Compost y vermicompost también pueden ser empleados como bioestimulante debido a su alto contenido de ácidos húmicos y PGPM (Phooi et al., 2022), los microorganismos presentes en el vermicompost presentan funcionalidades nutricionales y fitosanitarias (Mejía-Guerra, 2022).

El uso de los residuos orgánicos como fertilizantes y/o enmienda representa una alternativa muy empleada en el campo almeriense. Diferentes estudios han resaltado la importancia de la autogestión de los residuos (Aznar-Sánchez et al., 2020; Castillo-Díaz et al., 2021; Duque-Acevedo et al., 2020), y su uso como fertilizante resulta ser el empleo más viable, considerando que el agricultor puede autogestionarlos en la propia finca y reincorporarlos al suelo en forma de abonado verde (Castillo-Díaz et al., 2021) o después de un proceso de compostaje.

Dentro del empleo de los residuos vegetales como nutrientes para las plantas, resulta también interesante la formulación de extractos acuosos de compost o vermicompost, los llamados tes, para suministrar los nutrientes en forma líquida a modo de solución nutritiva (Ruiz y Salas Sanjuan, 2022).

Este modelo circular puede generar beneficios económicos y productivos para el agricultor, ya que reduce o incluso elimina los fertilizantes minerales externos (Castillo-Díaz et al., 2021), y también permite alcanzar efectos ambientales positivos, pues disminuye la carga sobre las plantas de gestión de residuos.

La aplicación de la fertilización orgánica como sustituto a los insumos minerales, requiere un estudio meticuloso para analizar las respuestas de los cultivos en diferentes condiciones pedoclimáticas (Navarro et al., 2020). En la literatura que recoge los resultados al respecto son muy controvertidos.

Diferentes autores han reseñado que la fertilización orgánica permite la obtención de niveles de producción comparables a los que se obtendrían con un manejo mineral de la nutrición (Ruiz y Salas, 2019). Hernández et al. (2016) obtuvieron producciones de lechuga similares usando compost como única fuente de nutrientes, comparado con la aplicación de fertilizantes minerales, además la calidad de las hojas resultó mayor en los tratamientos orgánicos y mejoraron las características físicas, químicas y biológicas del suelo. Los mismos resultados en suelo fueron observados en cultivos de tomate por Wang et al. (2017) y Murmu et al. (2013), donde se obtuvieron mejoras en producción y en la calidad de los frutos con la aplicación de vermicompost.

Por lo contrario, otros autores observan una reducción de producción con un manejo orgánico de la fertilización. Bilalis et al. (2018) obtuvieron producciones de tomates menores con la aplicación de compost como fuente de nutrientes en comparación con el manejo mineral. En líneas similares, los resultados de Navarro et al. (2020) en un cultivo de apio demostraron que la fertilización orgánica no es suficiente para la obtención de niveles productivos comparables con la fertilización mineral. No obstante, apreciaron una mejora en las características nutricionales.

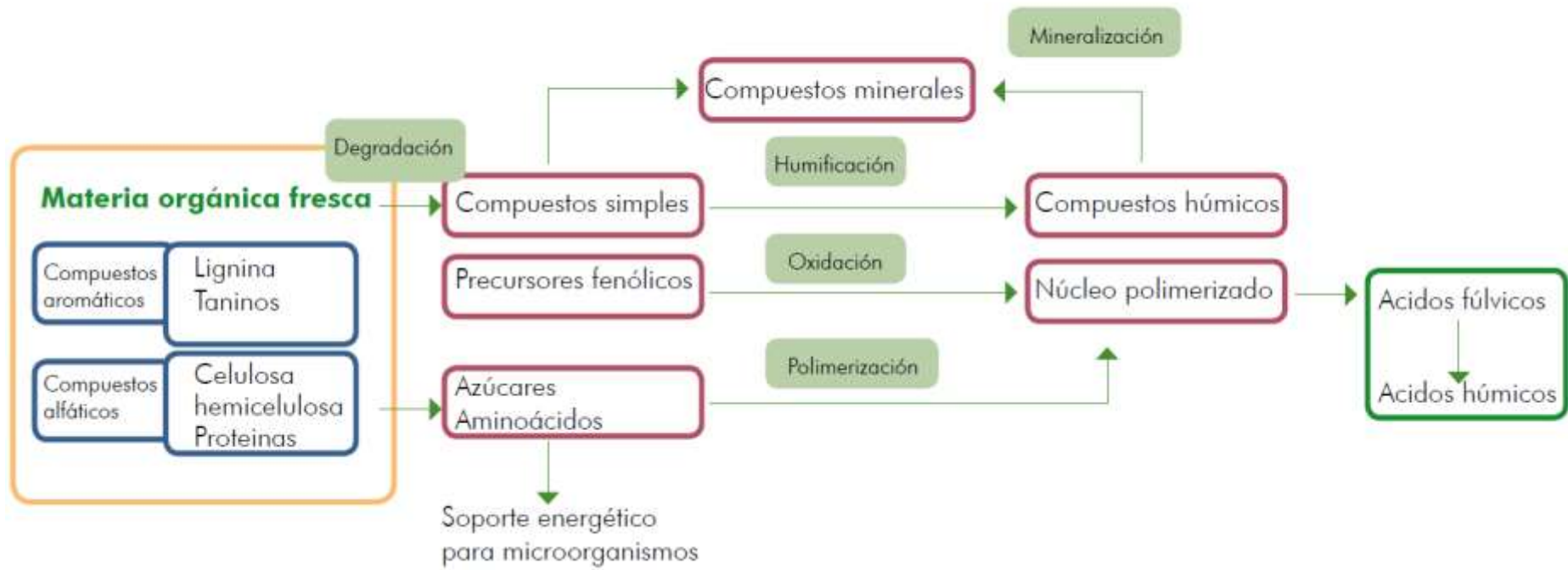


Figura 1.3. Evolución de la materia orgánica aportada al suelo. Fuente: Román et al. (2013)

Bibliografía.

- Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Welch, C., & Metzger, J. D. (2004). Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresource Technology*, 93(2), 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.014>
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., García-Arca, D., & López-Felices, B. (2020). Identification of opportunities for applying the circular economy to intensive agriculture in Almería (South-East Spain). *Agronomy*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy10101499>
- Barrett, G. E., Alexander, P. D., Robinson, J. S., & Bragg, N. C. (2016). Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review. *Scientia Horticulturae*, 212, 220–234. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2016.09.030>
- Bilalis, Di., Krokida, M., Roussis, I., Papastylianiou, P., Travlos, I., Cheimona, N., & Dede, A. (2018). Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Horticulturae*, 30(2), 321–332. <https://doi.org/10.2478/fhort-2018-0027>
- Cadahía, C.. (2008). *Fertirrigación. La savia como índice de fertirrigación en cultivos agroenergéticos, hortícolas, frutales y ornamentales.*
- Cajamar. (2016). *Plant waste from greenhouses in Almeria.*
- Calbo-Antolino, P. (2018). *Technical-economic study on implementing a biogas plant operating with greenhouse vegetable waste generated in the region of Almeria.*
- Callejón-Ferre, A. J., Velázquez-Martí, B., López-Martínez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2011). Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 948–955. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.012>
- Carricondo-Martínez, I., Falcone, D., Berti, F., Orsini, F., Del, M., & Salas-Sanjuan, C. (2022). *Use of Agro-Waste as a Source of Crop Nutrients in Intensive Horticulture System.* <https://doi.org/10.3390/agronomy12020447>
- Castillo-Díaz, F. J., Marín-Guirao, J. I., Belmonte-Ureña, L. J., & Tello-Marquina, J. C. (2021). Effect of repeated plant debris reutilization as organic amendment on greenhouse soil fertility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111544>
- Comisión Europea. (2020). A new circular economy action plan. For a cleaner and more competitive Europe. In *Bruselas, Belgica* . <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

- Consejería de Agricultura, P. y D. R. C. de M. y ordenación del territorio. J. de A. (2016). *Estrategia de gestión de restos vegetales en la horticultura de Andalucía. Hacia una economía circular.*
- de Falco, E., Vitti, A., Celano, G., & Ronga, D. (2021). Suitability of on-farm green compost for the production of baby leaf species. *Horticulturae*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110512>
- de Sousa Antunes, L. F., Spolador Fernandes, L., de Sousa Vaz, A. F., Santos Reis de Andrade da Silva, M., dos Santos Ferreira, T., Teles dos Santos, D. M., & Fernandes Correia, M. E. (2022). Millicomposting: Sustainable technique for obtaining organic compost for the cultivation of broccoli seedlings. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100442. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2022.100442>
- Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). *Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting* (Clive A., Edwards Norman Q., & Arancon Rhonda Sherman, Eds.).
- Ducasse, V., Capowiez, Y., & Peigné, J. (2022). Vermicomposting of municipal solid waste as a possible lever for the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00819-y>
- Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., & Camacho-Ferre, F. (2020). The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*, 10(489). <https://doi.org/10.3390/agronomy10040489>
- Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Toresano-Sánchez, F., & Camacho-Ferre, F. (2020). Biodegradable Raffia as a Sustainable and Cost-Effective Alternative to Improve the Management of Agricultural Waste Biomass. *Agronomy*, 10(1261). <https://doi.org/10.3390/agronomy10091261>
- Ferrer Zamora, D. (2021). *Evolución de Grupos microbianos funcionales en el compostaje del alga invasora *Rugulopteryx okamurae* y residuos vegetales.*
- Fuertes-Mendizábal, T., Huérfano, X., Ortega, U., González-Murua, C., Estavillo, J. M., Salcedo, I., & Duñabeitia, M. K. (2021). Compost and PGP-Based Biostimulant as Alternative to Peat and NPK Fertilization in Chestnut (*Castanea Sativa* Mill.) Nursery Production. *Forests*, 12(850). <https://doi.org/10.3390/f12070850>
- Gallego Fernández, L. M., Portillo Estévez, E., Navarrete, B., & González Falcón, R. (2022). Estimation of methane production through the anaerobic digestion of greenhouse horticultural waste: A real case study for the Almeria region. *Science of the Total Environment*, 807. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151012>

- Garzón, E., Morales, L., Ortiz-Rodríguez, I. M., & Sánchez-Soto, P. J. (2018). An approach to the heating dynamics of residues from greenhouse-crop plant biomass originated by tomatoes (*Solanum lycopersicum*, L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(26), 25880–25887. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-2577-Y>
- Hernández, T., Chocano, C., Moreno, J. L., & García, C. (2016). Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (*Lactuca sativa* L.) crops-Effects on soil and plant. *Soil and Tillage Research*, 160, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.005>
- Hernández-Apaolaza, L., Gascó, A. M., Gascó, J. M., & Guerrero, F. (2005). Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. *Bioresource Technology*, 96(1), 125–131. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2004.02.028>
- Ho, T. T. K., Tra, V. T., Le, T. H., Nguyen, N. K. Q., Tran, C. S., Nguyen, P. T., Vo, T. D. H., Thai, V. N., & Bui, X. T. (2022). Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2022.100211>
- Hochmuth, G. J. (1994). *Efficiency Ranges for Nitrate-Nitrogen and Potassium for Vegetable Petiole Sap Quick Tests* (Vol. 4, Issue 3).
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.09.005>
- Leyva Ruelas, G., Sánchez García, P., Alcántar González, G., Valenzuela Ureta, J. G., Francisco, G. R., & Angel, M. G. (2005). Contenido de nitratos en extractos celulares de pecíolos y frutos de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2), 145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028208> <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028208> <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028208>
- Llanderal, A., García-Caparrós, P., Pérez-Alonso, J., Contreras, J. I., Segura, M. L., Reza, J., & Lao, M. T. (2020). Approach to Petiole Sap Nutritional Diagnosis Method by Empirical Model Based on Climatic and Growth Parameters. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 188, 10(2), 188. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10020188>
- Márquez, M. A., Diánez, F., & Camacho, F. (2011). The use of vegetable subproducts from greenhouses (VSG) for animal feed in the Poniente region of Almería. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 26(1), 4–12. <https://doi.org/10.1017/S1742170510000013>
- Mejía Guerra, P., Salas Sanjuan, M. del C., & López, M. J. (2018). Evaluation of physicochemical properties and enzymatic activity of organic substrates

- during four crop cycles in soilless containers. *Food Science and Nutrition*, 6, 2066–2078.
- Mejía-Guerra, P. A. (2022). *Valoración del uso combinado de mezclas de materiales orgánicos y biofertilización con microorganismos en cultivo sin suelo*.
- Meng, X., Dai, J., Zhang, Y., Wang, X., Zhu, W., Yuan, X., Yuan, H., & Cui, Z. (2018). Composted biogas residue and spent mushroom substrate as a growth medium for tomato and pepper seedlings. *Journal of Environmental Management*, 216, 62–69. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.09.056>
- Ministerios de Agricultura y Pesca, A. y M. A. y de E. I. y C. (2017). *Pacto por una Economía Circular*.
- Ministero para la Transición Ecológica y el reto demográfico. (2022). Estrategia Española de Economía Circular. *Ministero Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico*. www.miteco.es
- Mona, S., Malyan, S. K., Saini, N., Deepak, B., Pugazhendhi, A., & Kumar, S. S. (2021). Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar. *Chemosphere*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>
- Morales, L., Garzón, E., Martínez-Blanes, J. M., & Sánchez-Soto, P. J. (2017). Thermal study of residues from greenhouse crops plant biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(2), 1111–1120. <https://doi.org/10.1007/S10973-017-6243-2>
- Murmu, K., Ghosh, B. C., & Swain, D. K. (2013). Yield and quality of tomato grown under organic and conventional nutrient management. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(10), 1311–1321. <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.711472>
- Navarro, A. S., Romero, J. A. S., del Carmen Salas Sanjuan, M., Bernardeau, M. A. B., & Iniesta, M. J. D. (2020a). Medium-term influence of organic fertilization on the quality and yield of a celery crop. *Agronomy*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy10091418>
- Navarro, A. S., Romero, J. A. S., del Carmen Salas Sanjuan, M., Bernardeau, M. A. B., & Iniesta, M. J. D. (2020b). Medium-term influence of organic fertilization on the quality and yield of a celery crop. *Agronomy*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy10091418>
- Phooi, C. L., Azman, E. A., & Ismail, R. (2022). Do it Yourself: Humic Acid. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 45(3), 547–564. <https://doi.org/10.47836/pjtas.45.3.01>
- Roman, Pilar., Martínez, M. M., & Pantoja, Alberto. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: experiencias en América Latina*. FAO.

- Ruiz, J. L., & Salas, M. D. C. (2022). The use of plant growth promoting bacteria for biofertilization; effects on concentrations of nutrients in inoculated aqueous vermicompost extract and on the yield and quality of tomatoes. *Biological Agriculture and Horticulture*. <https://doi.org/10.1080/01448765.2021.2010596>
- Ruiz, J. L., & Salas, M.D.C. (2019). Evaluation of organic substrates and microorganisms as bio-fertilisation tool in container crop production. *Agronomy*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy9110705>
- Rural 16. (2016). *Junta de Andalucía. Líneas de actuación en materia de gestión de restos vegetales en la horticultura de Andalucía.*
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- Sayadi-Gmada, S., Rodríguez-Pleguezuelo, C. R., Rojas-Serrano, F., Parra-López, C., Parra-Gómez, S., García-García, M. del C., García-Collado, R., Lorbach-Kelle, M. B., & Manrique-Gordillo, T. (2019). Inorganic Waste Management in Greenhouse Agriculture in Almeria (SE Spain): Towards a Circular System in Intensive Horticultural Production. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 3782, 11(14), 3782. <https://doi.org/10.3390/SU11143782>
- Shen, W., Hu, M., Qian, D., Xue, H., Gao, N., & Lin, X. (2021). Microbial deterioration and restoration in greenhouse-based intensive vegetable production systems. *Plant Soil*, 463, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04933-w>
- Tolón Becerra, A., & Lastra Bravo, X. (2010). *LA AGRICULTURA INTENSIVA DEL PONIENTE ALMERIENSE Diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental.*
- Tondello, A., Fasolo, A., Marcato, S., Treu, L., Bonato, T., Zanardi, W., Concheri, G., Squartini, A., & Baldan, B. (2021). *Characterization of bacterial communities isolated from municipal waste compost and screening of their plant-interactive phenotypes.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150592>
- Toop, T. A., Ward, S., Oldfield, T., Hull, M., Kirby, M. E., & Theodorou, M. K. (2017). AgroCycle - Developing a circular economy in agriculture. *Energy Procedia*, 123, 76–80. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.269>
- Vandecasteele, B., Loo, K. van, Ommeslag, S., Vierendeels, S., Rooseleer, M., & Vandaele, E. (2022). Sustainable Growing Media Blends with Woody Green Composts: Optimizing the N Release with Organic Fertilizers and Interaction with Microbial Biomass. *Agronomy*, 12(422). <https://doi.org/10.3390/agronomy12020422>
- Vandecasteele, B., Pot, S., Maenhout, K., Delcour, I., Vancampenhout, K., & Debode, J. (2021). Acidification of composts versus woody management residues: Optimizing biological and chemical characteristics for a better fit in growing media. *Journal of Environmental Management*, 277, 111444. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111444>
- Wang, X. X., Zhao, F., Zhang, G., Zhang, Y., & Yang, L. (2017). Vermicompost improves tomato yield and quality and the biochemical properties of soils with different tomato

planting history in a greenhouse study. *Frontiers in Plant Science*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01978>

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.

En el sistema de producción hortícola intensivo de Almería se generan cada año alrededor de 2 millones de toneladas de residuos vegetales (Cajamar, 2016). Para el aprovechamiento de los restos orgánicos y la implementación de un modelo circular, una de las soluciones más viable es la auto gestión por parte de los agricultores, mediante el uso de los residuos como fuentes de nutrientes y/o enmienda. Para promover esta práctica de gestión es necesario estudiar los efectos de una fertilización orgánica a largo plazo sobre la calidad y cantidad de las producciones.

El objetivo general de este trabajo fue implementar una gestión circular de los residuos en un invernadero durante 6 ciclos consecutivos de tomate (3 años), en contraposición a la fertilización mineral por fertirriego, evaluando principalmente los efectos sobre los rendimientos, la calidad de la producción y las características del suelo.

Para abordar este objetivo se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis 1: Los restos vegetales frescos, compostados o vermicompostados usados como fuentes de nutrientes permiten conseguir niveles productivos comparables con el manejo mineral.

Hipótesis 2: La materia orgánica incorporada en el suelo promueve la activación de la comunidad microbiana que permite una mayor disponibilidad de los nutrientes para el cultivo.

Hipótesis 3: La aplicación del abonado en verde, del compost o del vermicompost posibilitan aumentar la calidad de la producción.

Para validar las hipótesis se establecieron los siguientes objetivos específicos:

Objetivo 1: Determinar el efecto de la aplicación de enmiendas/fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales generados en la finca sobre la producción de los cultivos de tomate.

Objetivo 2: Evaluar los efectos de la aplicación de enmiendas/fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales generados en la finca sobre el estado nutricional del cultivo de tomate (extracto de peciolo).

Objetivo 3: Evaluar los efectos de la aplicación de enmiendas/fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales generados en la finca sobre las propiedades químicas y biológicas del suelo.

Objetivo 4: Evaluar los efectos de la aplicación de enmiendas/fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales generados en la finca sobre la calidad del tomate.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.



Fotografía 3.1. Restos vegetales cultivo de tomate, compost y vermicompost de restos de cultivo de tomate. Detalle de ensayo de cultivo de tomate.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

La fase experimental de esta tesis doctoral se desarrolló durante 3 años, durante los cuales se analizaron seis ciclos cortos de tomate (*Solanum lycopersium* L.) consecutivos. Los experimentos se llevaron a cabo en un invernadero “raspa y amagado” con control climático pasivo y ventanas cenitales, con una superficie de 1300 m², localizado en Níjar (Almería). Los cultivos se realizaron en un suelo enarenado en el cual, sobre el suelo autóctono, se colocan 20-30 cm de suelo franco importado y 8-12 cm de capa de arena en la parte superior. Los resultados del análisis de suelo antes de empezar el experimento están indicados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades físico-químicas del suelo antes de empezar el ensayo.

pH	C.E.	M.O.	N Kjeldah l	C/N	NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Aren a
8.3	2360	0,93	0,07	7,7	47	120	1000	5160	973	566	53,5

pH (volumen suelo:agua 1:2,25); C.E. conductividad eléctrica (μS cm⁻¹); M.O. materia orgánica (% materia seca (ms)); N Kjeldahl (nitrógeno Kjeldahl % ms); NO₃⁻ (mg L⁻¹); PO₄²⁻ (mg L⁻¹); K⁺ (mg L⁻¹); Ca²⁺ (mg L⁻¹); Mg²⁺ (mg L⁻¹); Na⁺ (mg L⁻¹); arena (%); limo (%); arcilla (%).

El tomate cv. ‘Surcal’ (Naturesur S.C.A.), injertado en Beaufort (Monsanto), fue cultivado durante los 6 ciclos consecutivos (3 ciclos de primavera-verano, 3 ciclos de otoño-invierno), a 0,66 plantas m⁻², y con las plantas entutoradas a dos tallos (1,32 tallos m⁻²). La polinización fue realizada por abejorros y el control de plagas según las prácticas de producción integrada (Real Decreto 1201/2002, de 20 de noviembre). El primer trasplante se realizó el día 02/02/2017. En la tabla 3.2 se indica la fecha de trasplante y de final de cada uno de los ciclos de cultivo realizados durante el ensayo.

Tabla 3.2. Cronología de los 6 ciclos de cultivo de tomate realizados en el experimento.

Ciclo de cultivo	Fecha de trasplante	Última cosecha
Ciclo 1	02/02/2017	06/07/2017
Ciclo 2	22/08/2017	30/01/2018

Ciclo 3	06/02/2018	10/07/2018
Ciclo 4	22/08/2018	25/02/2019
Ciclo 5	29/03/2019	18/07/2019
Ciclo 6	22/08/2019	30/01/2020

La aplicación de enmienda, en los sectores orgánicos, se efectuó tres veces durante todo el periodo que duró el ensayo, 6 cultivos. En concreto, se aplicó la enmienda orgánica según cada tratamiento (figura 3.1.), antes de trasplante del ciclo 1, del ciclo 3 y del ciclo 6.

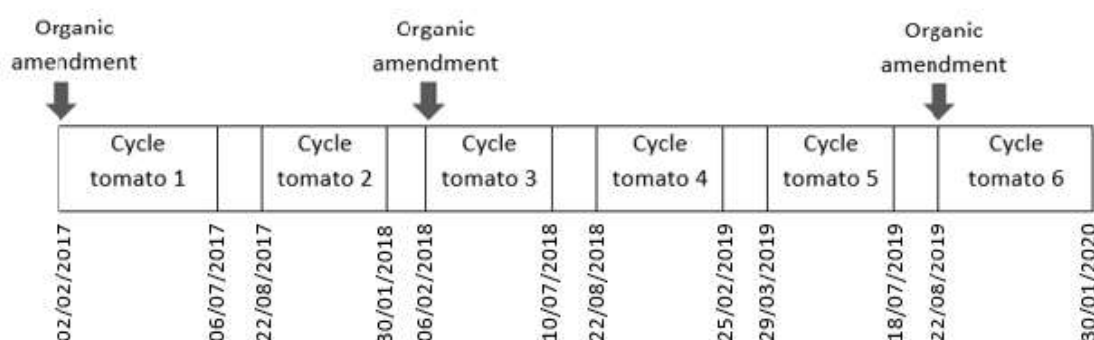


Figura 3.1. Cronología de los 6 ciclos consecutivos de cultivo de tomate e indicando el momento en el que se aplicaron las enmiendas orgánicas.

Dentro del invernadero, se seleccionaron de forma aleatoria bloques a los que se asignaron los tratamientos (7) durante todo el periodo de ensayo (seis ciclos). Según el material y/o cantidad usado como enmienda/fertilizante del cultivo, se establecieron 7 tratamientos:

Tratamiento 1: Fertilización mineral aplicada por fertirriego sin aplicación de materia orgánica (control).

Tratamiento 2: Enmienda con estiércol caprino (GM) aplicado a 3 kg m⁻¹ lineal.

Tratamiento 3: Abonado en verde aplicado a 4 kg m⁻¹ lineal, efectuado picando las plantas (CR) del ciclo precedente y aplicadas en el suelo al final del cultivo.

Tratamiento 4: Compost (CO) formulado con restos vegetales hortícolas de ciclos precedentes aplicado a una dosis de 3 kg m⁻¹ lineal.

Tratamiento 5: Vermicompost (V) formulado con restos vegetales hortícolas de ciclos precedentes aplicado a una dosis de 3 kg m⁻¹ lineal.

Tratamiento 6: Vermicompost (V6) formulado con restos vegetales hortícolas de ciclos precedentes aplicado a una dosis de 6 kg m⁻¹ lineal.

Tratamiento 7: Vermicompost (V9) formulado con restos vegetales de ciclos precedentes aplicado a una dosis de 9 kg m⁻¹ lineal.

Las dosis aplicadas de la enmienda se calcularon tomando como referencia los hábitos de fertilización orgánica de la provincia de Almería para los tratamientos de compost y estiércol. Para el tratamiento 3 se incorporó en el suelo toda la mata vegetal generada en el ciclo precedente. Para los tratamientos con vermicompost se utilizó la dosis de referencia (3 kg m⁻¹) y dos dosis mayores para evaluar posibles efectos positivos.

El estiércol empleado es un material orgánico proveniente de excrementos y camas de ganado caprino (GM) obtenido por fermentación aeróbica. Para el abono en verde se utilizaron las matas de ciclos precedentes, cortadas en de 2 cm (CR). El compost utilizado derivaba de la degradación aeróbica de los restos vegetales de los ciclos precedente generados en la misma finca (CO). El vermicompost (V) derivado de la oxidación y transformación de los restos vegetales de los ciclos precedentes fue producido por TECOMSA S.L. Las características de los materiales orgánicos incorporados al suelo como enmienda se recogen en la tabla 3.3.

Los tratamientos orgánicos fueron regados solo con agua, a excepción del primer ciclo (ciclo 1) en el que todos los tratamientos fueron regados con solución nutritiva. El tratamiento mineral no recibió enmienda orgánica y fue regado con disolución nutritiva (Solución nutritiva aplicada (mmol L⁻¹): 12.93 NO₃⁻, 1.54 NH₄⁺, 0.89 PO₄⁻, 3.60 K, 1.80 Ca²⁺, 1.60 Mg²⁺, 13.21 Na⁺, and 11.55 Cl⁻), donde solo N, P, K, Mg fueron aplicados como fertilizantes, mientras los demás elementos estaban presentes en el agua.

Tabla 3.3. Propiedades físico químicas de los materiales orgánicos usado como enmienda/fertilizante: GM (estiércol); CR (residuos verdes); CO (compost); V (vermicompost).

	pH	C.E.	M.O.	N Kjeldahl	C/N	P	K	Ca	Mg
GM	9,6	7,73	30,2	1,35	11	0,53	2,18	3,28	0,91
CR	6,9	10,79	75,5	2,50	15	0,89	3,39	4,34	0,72
CO	8,3	12,30	21,4	1,20	8,9	0,67	2,84	8,00	1,51
V	8,3	3,39	17,2	1,11	7,7	0,64	0,77	7,80	1,31

pH (vulmen material/agua 1:5); C.E. (dS m⁻¹); M.O. (materia organica, % peso seco); N Kjeldahl (Nitrogeno Kjeldahl, % peso seco); P (% peso seco), K (% peso seco); Ca (% peso seco); Mg (% peso seco).

Para el control del riego se colocaron lixímetros, dos por tratamiento, con las siguientes dimensiones: 3 m de largo y 0,50 m de ancho, y profundidad de 0,7 y 0,9 m en la parte menos y más profundas, respectivamente, para facilitar la recogida del lixiviado. Cada lixímetro recoge el riego 6 goteros con un caudal por gotero de 3 L h^{-1} que se aplica a 3 plantas. Con el fin principal de reducir el lixiviado o pérdidas de nutrientes para el desarrollo del cultivo y reducir la contaminación del suelo, el parámetro de decisión empleado para determinar la frecuencia de riego se estableció según la C.E. y porcentaje diario de los drenajes recogidos en los lixímetros, en relación a un gotero de control. Se establecieron como objetivos para el manejo del riego mantener un drenaje diario de 10-15% y una C.E. menor a $6,0 \text{ dS m}^{-1}$.

El primer estudio (capítulo IV) se centró en los ciclos de cultivo 2, 3 y 4, y se estudió como los diferentes planes de fertilización afectan a la producción, el estado nutricional de las plantas (análisis extracto de peciolo-savia) y las condiciones microbiológicas del suelo. Se evaluaron: producción (kg m^{-2}), contenido de nutrientes en savia, propiedades biológicas del suelo midiendo microorganismos formadores de colonias y actividad enzimáticas.

En el segundo estudio (capítulo V), se incluyen los resultados de los ciclos de cultivo 3 y 4. Dentro de estos capítulos, se recoge el estudio de la concentración en el extracto saturado de peciolo (savia) de los principales iones para establecer las posibles diferencias de concentraciones entre elementos nutritivos dependiendo de la fuente de nutriente empleada, con el objetivo de poder utilizar el análisis de savia como método de diagnóstico nutricional en cultivo con manejo orgánico de la fertilización.

En siguiente estudio (capítulo VI) se evaluó como el manejo orgánico de la fertilización de larga duración, sin la aplicación de fertilizantes minerales, afecta a la producción y a la calidad del tomate. Por ello, se evaluó: producción (kg m^{-2}), calidad de los frutos de tomate mediante la evaluación de los °Brix, color y contenido de compuestos deseables, y las propiedades químicas del suelo.

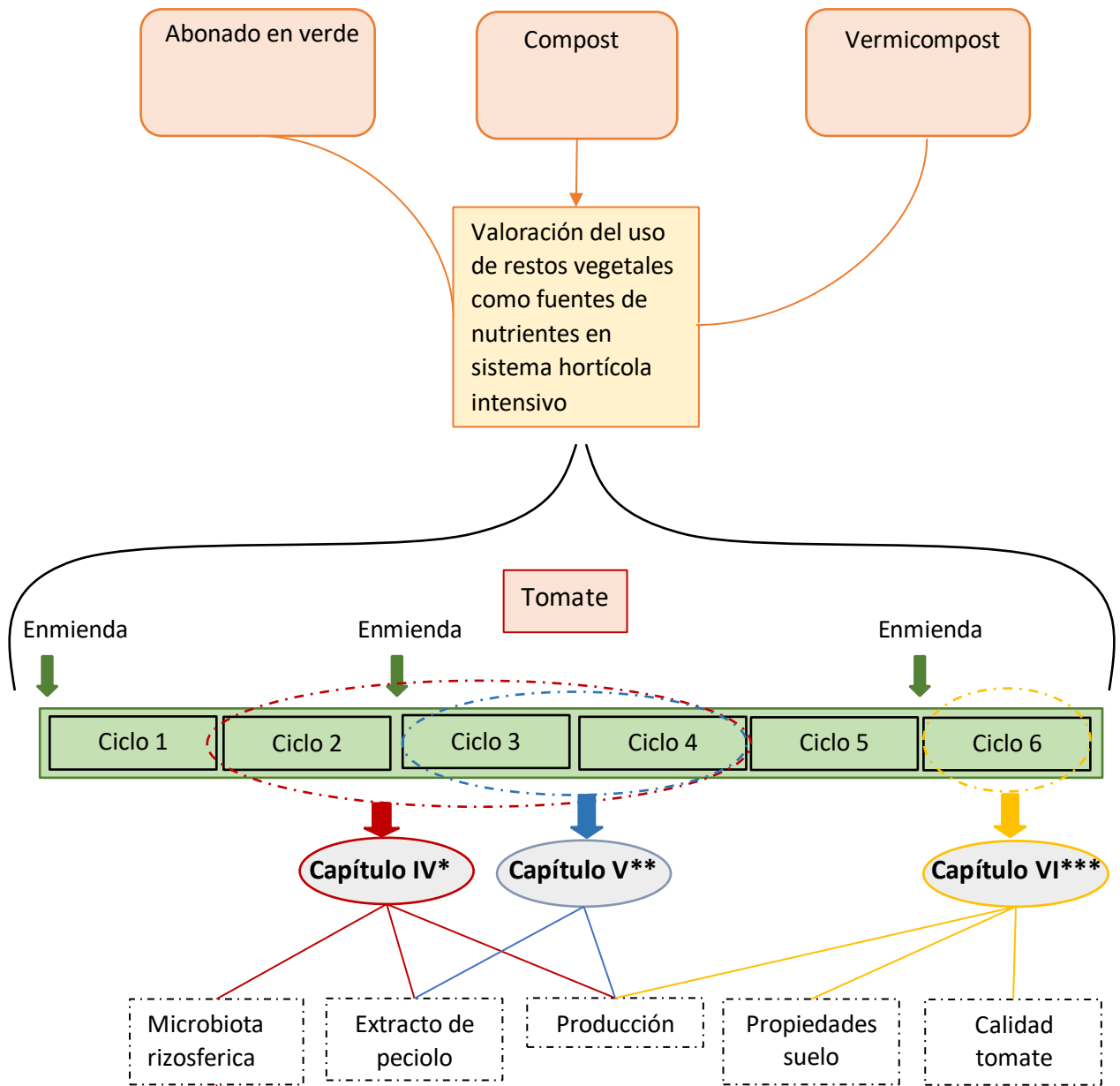


Figura 3.2. Resumen grafico de la investigación.

CAPÍTULO 4: USO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO FUENTE DE NUTRIENTES PARA CULTIVOS EN HORTICULTURA INTENSIVA.



Fotografía 4.1. Detalle del cultivo de tomate, operación para la incorporación de los materiales orgánicos entre cultivos, siembra en laboratorio para conteo microbiano. peciolas para la extracción de savia y muestras de savia previo al análisis de iones.

Capítulo 4: Uso de residuos agrícolas como fuente de nutrientes para cultivos en horticultura intensiva.

Resumen.

La gestión inadecuada de los residuos agrícolas en la agricultura intensiva tiene un impacto negativo severo en el medio ambiente. La valorización de los residuos vegetales de los cultivos como fuente de nutrientes para los cultivos es una alternativa válida para cerrar el ciclo de los nutrientes y reducir el uso de insumos externos. En este estudio, se incorporó al suelo material vegetal en tres estados, procedente de residuo de cultivo fresco, después de procesos de compostaje y vermicompostaje, para evaluar sus efectos sobre el rendimiento y el estado nutricional del tomate (análisis de la savia del pecíolo: concentración de NO_3^- y K^+) durante tres ciclos de cultivo. También se incluyó un tratamiento de control con fertirrigación mineral y un tratamiento de control orgánico con estiércol de cabra. Se evaluó la actividad enzimática y la población microbiana en el suelo. Aunque no se observaron diferencias entre tratamientos en el primer ciclo, en el segundo y tercer ciclo, el rendimiento obtenido con la aplicación de enmiendas orgánicas derivadas de agrorresiduos fue comparable al rendimiento obtenido con fertilizantes. En general, el análisis de savia no reveló una relación clara con el rendimiento. El tratamiento con compost resultó en una mayor presencia de microorganismos en el suelo. La actividad deshidrogenasa del suelo (DHA), la actividad de la fosfatasa ácida (ACP) y la actividad de la β -glucosidasa (β -GLU) generalmente se estimularon cuando se usaron enmiendas orgánicas. El estudio confirma la aplicabilidad de los restos vegetales como una buena alternativa nutricional a los fertilizantes minerales.

Artículo publicado: Carricondo-Martínez, I., Falcone, D., Berti, F., Orsini, F., & Salas-Sanjuan, M. D. C. (2022). Use of Agro-Waste as a Source of Crop Nutrients in Intensive Horticulture System. *Agronomy*, 12(2), 447.

4.1. Introducción.

Hoy en día, la elevada cantidad de desechos generados por las actividades humanas es de gran preocupación [1], y su manejo adecuado es crucial para preservar la salud humana y ambiental.

El modelo hortícola intensivo de Almería (SE de España) genera, cada año, alrededor de 2 millones de toneladas de residuos orgánicos. Estos residuos orgánicos son fácilmente biodegradables, pero el principal problema es su elevado volumen, sobre todo al final de los ciclos de cultivo, cuando hay que eliminar la biomasa vegetal no comercial [2].

Se han evaluado muchas alternativas para la eliminación de residuos agrícolas, siendo el uso de materia orgánica como fuente de nutrientes para los cultivos, la solución más competitiva en un área en la que prevalece la actividad agrícola intensiva [3,4].

La reintegración de restos agrícolas en el suelo de la misma finca agrícola en la que se haya generado, cumple el objetivo de la Estrategia Europea de Bioeconomía 2018-2030 y reduce los costos de transporte y la necesidad de fertilizantes minerales [5,6].

La adición de enmiendas orgánicas mejora la estructura y la fertilidad del suelo [7], mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas [7–10]. Los microorganismos del suelo juegan un papel fundamental en los sistemas de producción agrícola, especialmente en la producción ecológica, ya que el microbiota interviene en los ciclos de los nutrientes, permitiendo la mineralización y solubilización de la materia orgánica suministrada mediante fertilizantes orgánicos. La comunidad microbiana también tiene una función importante en el control de plagas y patógenos y en la promoción de la salud general de las plantas [11–13]. En los últimos años se ha estudiado el papel de las prácticas agronómicas en los cambios de la comunidad microbiana del suelo [14–17]. Sin embargo, es difícil comprender los efectos de los fertilizantes orgánicos sobre los microorganismos del suelo [14,17] y se necesita un mayor conocimiento para mejorar el manejo de la fertilización orgánica.

El análisis de la actividad enzimática del suelo se considera una herramienta útil para evaluar la salud del suelo al comparar diferentes regímenes de fertilización, ya que las enzimas son muy sensibles a cualquier cambio en las condiciones externas [18,19].

Las enzimas del suelo son sintetizadas principalmente por microorganismos que degradan la materia orgánica. Por lo tanto, la dinámica de las enzimas depende de la abundancia de la comunidad microbiana [18]. Cada enzima cataliza una reacción bioquímica particular [19], y una sola enzima no puede indicar la calidad biológica general del suelo. La deshidrogenasa (DHA), la fosfatasa ácida (ACP) y la β -glucosidasa (β -GLU) se encuentran entre las enzimas ampliamente utilizadas para caracterizar la actividad microbiana del suelo, ya que catalizan reacciones bioquímicas fundamentales que ocurren durante la degradación de la materia orgánica [20,21].

La actividad de la DHA es un indicador de la tasa de oxidación de la materia orgánica y se considera un índice general de la actividad biológica [21]. Por el contrario, ACP y β -GLU están relacionadas con ciclos específicos. ACP es un grupo de enzimas, sintetizadas por las raíces de plantas y microorganismos, que liberan grupos fosfato de los compuestos orgánicos [21,22]. β -GLU es responsable de la hidrólisis de la celulosa, y es sintetizada por microorganismos en presencia de los sustratos adecuados [22].

El tomate es una de las hortalizas más consumidas en el mundo [23], siendo Italia y España los mayores productores europeos [24]. Se estima que cada año, en los cultivos intensivos de tomate en el SE español, se generan una media de 73 t ha⁻¹ de residuos vegetales [3].

Teniendo en cuenta la falta de estrategias en cuanto a la gestión de residuos agrícolas, este estudio pretende dar una solución práctica y local para reintroducir en el mismo sistema de producción los residuos generados en la horticultura intensiva.

El análisis de viabilidad del uso de fertilizantes derivados de residuos agrícolas es un paso importante para reducir la dependencia de insumos externos como los fertilizantes químicos. Debido a la importancia económica del tomate, este estudio analizó los efectos de diferentes manejos de fertilización en un cultivo de tomate. Se planteó la hipótesis de que: (1) los fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales pueden reemplazar las prácticas de fertilización mineral en términos de producción de rendimiento, asegurado por (2) la influencia positiva de las enmiendas orgánicas derivadas de residuos agrícolas sobre la abundancia de microorganismos y la actividad enzimática en el suelo [15], que aumentan la solubilidad y mineralización de los nutrientes. En este contexto, se realizaron tres ciclos consecutivos de cultivo de tomate para evaluar el valor fertilizante de los residuos vegetales, reincorporados al suelo como materia fresca o tras procesos de compostaje y vermicompostaje. Los tratamientos de fertilización orgánica con fertilizantes derivados de desechos vegetales se compararon con la fertilización mineral suministrada por fertirrigación y con la fertilización orgánica con estiércol de cabra, una enmienda común en la región. Los tratamientos orgánicos se realizaron sin aplicación de fertilizantes minerales.

4.2. Materiales y métodos.

4.2.1. Diseño del experimento.

El experimento se llevó a cabo en un invernadero con control climático pasivo de 1300 m² situado en Níjar (Almería, España), durante tres ciclos consecutivos de cultivo de tomate (TC1, TC2, TC3).

Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. 'Surcal' (Naturesur SCA) injertado sobre portainjerto 'Beaufort' (Monsanto) se cultivó en un sistema de suelo artificial ("enarenado"), en el que se colocaron 20–30 cm de suelo franco importado, sobre el suelo de grava autóctono, luego se colocaron 8-12cm de mantillo arenoso en la parte superior. El marco de plantación fue de 0,66 plantas por m⁻² y con crecimiento a dos tallos. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento con cuatro plantas cada uno. Los cinco tratamientos fueron los siguientes:

(1) Tratamiento control en el que se aplicó un programa de fertirrigación mineral (FertControl);

(2) tratamiento de control orgánico en el que se aplicó estiércol de cabra (% de materia orgánica (MO): 30,2, % Kjeldahl de nitrógeno (N Kjeldahl): 1,35; conductividad eléctrica dS m⁻¹ (EC): 7,73; pH: 9,6) a 3 kg m⁻¹ (OrgControl);

(3) residuo vegetal de una cosecha anterior de tomate (OM: 75,5; N Kjeldahl: 2,50; EC: 10,79; pH: 6,9) aplicado a 4 kg m⁻¹ (CropRes);

(4) compost derivado de un residuo vegetal de cultivo de tomate anterior (OM: 21,4; N Kjeldahl: 1,20; EC: 12,30; pH: 8,3) a 3 kg m⁻¹ (Comp);

(5) vermicompost derivado de un residuo vegetal de cultivo de tomate anterior (OM: 17,2; N Kjeldahl: 1,11; EC: 3,39; pH: 8,3) a 3 kg m⁻¹ (VermiComp).

Las dosis se calcularon tomando como referencia la práctica común en el área de producción.

Las enmiendas orgánicas se aplicaron y homogeneizaron en el suelo de la parcela orgánica el 15 de enero de 2017, antes del trasplante del primer ciclo de cultivo de tomate (TC0), cuyos resultados no se incluyen en este estudio, y el 15 de enero de 2018 antes del trasplante de TC2 (tabla 4.1.).

Tabla 4.1. Descripción de los ciclos de producción de tomate inicio y fin de cultivo.

Ciclo de producción	Trasplante	Última cosecha
TC0*	2 febrero 2017	6 julio 2017
TC1	2 agosto 2017	30 enero 2018
TC2	6 febrero 2018	10 julio 2018
TC3	22 agosto 2018	25 febrero 2019

* Datos no incluidos en este estudio

El tratamiento testigo no recibió enmienda orgánica y fue fertirrigado con solución mineral nutritiva (mmol L⁻¹): 12,93 NO₃⁻, 1,54 NH₄⁺, 0,89 H₂PO₄⁻, 3,60 K⁺, 1,80 Ca²⁺, 1,60 Mg²⁺, 13,21 Na⁺ y 11,55 Cl⁻. El pH se ajustó a 6 con ácido nítrico. El control del riego se realizó mediante medidas de drenaje diarias con lisímetros asegurando que la C.E. del drenaje no fuera superior a 6,0 dS m⁻¹ y un volumen de drenaje recogido del 10-15% en relación al volumen diario de riego por goteo.

4.2.2. Muestreo.

Se midió el rendimiento y el estado nutricional de las plantas a través del análisis de la savia del peciolo (N-NO₃⁻ y K⁺) para evaluar los efectos de las diferentes estrategias de manejo de la fertilización en el cultivo. Además, para analizar el efecto de los fertilizantes orgánicos derivados de residuos vegetales, se cuantificó la riqueza biótica y la actividad enzimática del suelo.

El rendimiento total de frutos se cuantificó para cada ciclo de cultivo (TC1, TC2, TC3), cuantificado mediante una balanza eléctrica con autocalibración y la producción de expresada en kg m⁻². Los elementos disueltos en el extracto de peciolo [NO₃⁻ y K⁺] se determinaron tres veces durante el segundo ciclo (TC2), a los 111, 126 y 141 días después del trasplante (DDT) y durante el tercer ciclo (TC3), a los 101, 118 y 151 DDT. No se realizó análisis de extracto de peciolo en TC1. Los

análisis de savia se realizaron siguiendo los métodos propuestos por Cadahía [25]. Veinte hojas de diferentes plantas por cada repetición fueron colectadas al azar entre las 9 y las 11 de la mañana. Los pecíolos se separaron de la hoja, se colocaron en bolsas de plástico y dentro de una nevera fueron transportados al laboratorio de la Universidad de Almería. En el laboratorio, los pecíolos se cortaron en secciones de 1 cm y luego se exprimieron con una prensa de ajo doméstica para la extracción de savia. Las concentraciones de NO_3^- y K^+ se analizaron con un sensor multi-ión con potenciometría y un electrodo de iones selectivos con sonda modular (NT Sensor SL, Tarragona, España).

El seguimiento de los microorganismos de la rizósfera se cuantificó en TC3 a los 160 DDT, se determinaron las bacterias totales (BT), los hongos totales (FT) y las bacterias amonificantes (AB). En los ciclos anteriores no se realizó análisis microbiano del suelo. Para cuantificar la población de microorganismos, se obtuvieron diluciones seriales decimales de muestras de suelo en solución salina estéril (NaCl, 0,9 %, p/v), que se sembraron (0,1 mL) en medio de cultivo para cada grupo microbiano. Para cuantificar bacterias totales (BT) y hongos totales (FT), placas APHA y placas de rosa de bengala (Panreac Química SLU, Castellar del Vallès, Barcelona, España), respectivamente.

Después de la incubación a 30°C (48 h BT y 72-120 h HT), se contaron las colonias y los resultados se expresaron en UFC (unidades formadoras de colonias) $\text{g}^{-1} \log_{10}$ [26]. Para cuantificar AB, se utilizó la técnica del número más probable [27].

Para cuantificar la actividad enzimática del suelo se midieron: actividad deshidrogenasa (DHA), fosfatasa ácida (ACP) y β -glucosidasa (β -GLU). Se recolectaron tres muestras de suelo de la rizósfera para cada tratamiento a 10 cm de profundidad. Los muestreos se realizaron durante TC1 a los 98 DDT, durante TC2 a los 9 DDT y 49 DDT DAT, entre TC2 y TC3 a los 161 DDT de TC2, durante TC3 a los 160 DDT y una vez terminado el TC3 en 194 DDT. El DHA se determinó calculando la cantidad de triphenyl formazan producido por microorganismos después de la reducción de cloruro de trifenil tetrazol [21]. ACP y β -GLU cuantificando la concentración de P-nitrofenol G-1 suelo⁻¹ H-1 según el protocolo establecido por Tabatabai y Bremner [28].

4.2.3. Análisis estadístico.

Para el análisis estadístico se utilizó el software Statgraphics 18. Un análisis multifactorial de varianza (ANOVA), utilizando la prueba de comparación de medias de Fisher, con la mínima diferencia estadísticamente significativa expresada como $p < 0,05$ (LSD).

4.3. Resultados y discusión.

4.3.1. Rendimiento.

En la tabla 4.2. se muestran los resultados de rendimiento en función de la estrategia de manejo de la fertilización durante tres ciclos de tomate. Comparando los ciclos de cultivo se obtuvo el mayor rendimiento total en TC2 en todos los tratamientos, debido a las condiciones climáticas favorables en la temporada primavera-verano.

Tabla 4.2. Rendimiento total de tomate (kg m^{-2}) en tres ciclos (TC1; TC2; TC3), en función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a razón de 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a razón de 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost aplicado a 3 kg m^{-1} (VermiComp).

Tratamientos	TC1	TC2	TC3
FertControl	4.86	7.51 a	5.44 a
OrgControl	5.38	6.35 b	4.53 c
CropRes	5.32	7.23 a	4.74 bc
Comp	5.21	7.46 a	5.24 ab
VermiComp	5.31	6.88 ab	5.28 ab
	ns	*	*

* Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos, según la prueba LSD ($p \leq 0,05$); ns: no significativo.

Durante TC1, el tratamiento de fertilización no tuvo efectos estadísticamente significativos en el rendimiento de tomate.

En el segundo y tercer ciclo de producción de tomate (TC2, TC3), se encontraron diferencias entre las estrategias de manejo de fertilización, observándose el mayor rendimiento en el tratamiento FertControl, logrando $7,51 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en TC2 y $5,44 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en TC3, mientras que el tratamiento OrgControl tuvo el nivel de producción más bajo con $6,35$ y $4,53 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en TC2 y TC3, respectivamente. En TC2, los rendimientos alcanzados en Comp ($7,46 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), CropRes ($7,23 \text{ kg m}^{-2}$) y VermiComp ($6,88 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) fueron iguales al rendimiento obtenido en parcelas donde se aplicó el programa de fertigación mineral. Del mismo modo, en TC3 no se observaron diferencias significativas entre FertControl, VermiComp con $5,28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ y Comp con $5,24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Mientras que CropRes reportó un rendimiento más bajo que FertControl.

La influencia del manejo de la fertilización orgánica en la producción de cultivos es un tema controvertido ya que la fertilización mineral proporciona nutrientes fácilmente disponibles para las plantas, lo que resulta en altas tasas de crecimiento y rendimiento [29]. En cambio, con la aplicación de fertilizantes orgánicos, la disponibilidad de nutrientes depende de la tasa de mineralización de la materia orgánica, que puede no satisfacer las demandas de nutrientes de la planta [29–31]. En este estudio, la aplicación de fertilizantes derivados de residuos agrícolas no afectó negativamente el rendimiento del tomate durante tres cultivos consecutivos, excepto en TC3 donde las parcelas de CropRes registraron rendimientos más bajos. Anteriormente, varios estudios no mostraron diferencias significativas entre la producción comercial obtenida con manejo de fertilización mineral u orgánica; algunos autores reportaron mayor rendimiento con la aplicación de fertilizantes orgánicos [32–34].

4.3.2. Análisis de extracto de peciolo.

El análisis del extracto de peciolo muestra el estado nutricional del cultivo durante dos ciclos (TC2, TC3) (tabla 4.3.).

En TC2, se observó una disminución general en la concentración de N-NO_3^- y K^+ en el extracto de peciolo en el segundo análisis (126 DDT), lo que puede deberse a la mayor demanda de nutrientes de los órganos sumideros. En TC3, la concentración de K^+ y N-NO_3^- siguió la tendencia opuesta, con un pico general alcanzado en el análisis de 118 DDT.

Los tomates fertilizados con VermiComp tuvieron la concentración más alta de N-NO_3^- en savia a los 111 DDT en TC2, mientras que, en el análisis a los 126 DDT, la concentración más alta fue observada en FertControl. No se observaron diferencias significativas entre tratamientos en la concentración de N-NO_3^- en el último muestreo (141 DDT). Durante TC3, a los 101 DDT, los tratamientos FertControl y Comp tuvieron la mayor concentración de N-NO_3^- y a los 118 DDT, el valor más alto se observó en el tratamiento Comp, seguido de OrgControl. A 151 DDT, CropRes tuvo el valor de concentración de N-NO_3^- más bajo. En cuanto a los valores promedios, en ambos ciclos, diferentes tratamientos de fertilización no resultaron en diferentes concentraciones de N-NO_3^- en el extracto de peciolo.

El contenido de K^+ en el extracto de peciolo en TC2 siguió la tendencia de NO_3^- , con el nivel de concentración más bajo alcanzado en el segundo análisis (126 DDT), excepto en el caso del tratamiento OrgControl, que registró una disminución del contenido de K^+ a lo largo de TC2.

En TC2, la mayor concentración de K^+ se obtuvo con el tratamiento VermiComp a los 111 DDT, y con VermiComp y FertControl a los 141 DDT. No se observaron diferencias significativas en la concentración de K^+ se observó a los 126 DDT.

Durante TC3, la mayor concentración de K^+ se obtuvo con el tratamiento OrgControl a los 101 DDT, con el tratamiento Comp a los 118 DDT, y con el tratamiento CropRes a los 151 DDT.

Se observó una respuesta similar de la concentración de K^+ en extracto de peciolo en diferentes tratamientos de fertilización, con el valor medio más alto obtenido en el tratamiento VermiComp durante TC2, solo significativamente diferente de OrgControl. En TC3, los valores más altos de K^+ fueron obtenidos en los tratamientos OrgControl, CropRes y Comp, que solo fueron significativamente diferente de FertControl.

Según los análisis nutricionales realizados durante los dos ciclos de producción, la concentración de N-NO_3^- en savia fue estadísticamente comparable entre el manejo de fertilización mineral y orgánica, excepto a los 126 DDT del TC2. Para el K^+ en savia, las diferencias estadísticamente significativas mostraron mayores concentraciones en los tratamientos con fertilizantes orgánicos para la mayoría de los muestreos. Estos resultados justifican que la producción alcanzada en los tratamientos orgánicos no fue afectada de forma significativa.

En términos generales, no se observaron diferencias consistentes en el estado nutricional de las plantas entre tratamientos. En el manejo de la fertilización orgánica, el factor más limitante es la disponibilidad de N [29], ya que el N orgánico debe mineralizarse para estar disponible para las plantas. En este estudio, no se observaron diferencias significativas en la concentración de N-NO_3^- en extracto de peciolo entre el tratamiento FertControl y los tratamientos de fertilizantes orgánicos

derivados de residuos agrícolas, lo que indica que la liberación de nutrientes de la materia orgánica fue suficiente para cubrir la demanda nutricional de las plantas.

Tabla 4.3. Contenido de $N-NO_3^-$ y K^+ en savia fresca de peciolo de tomate para dos ciclos (TC2; TC3) como función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost) aplicado a 3 kg m^{-1} (VermiComp).

Ciclo	DDT	Fert	Org	Crop	Comp	Vermi
		Control	Control	Res	Comp	Comp
$N-NO_3^-$						
TC2	111	1729 b	1327 c	1189 c	1288 c	1994 a
	126	1428 a	1374 b	874 c	1205 bc	1016 bc
	141	1705 a	1352 a	1808 a	1831 a	1339 a
	Prom	1621 a	1351 a	1290 a	1441 a	1450 a
TC3	101	1696 a	1033 b	1321 ab	1721 a	1362 ab
	118	1918 b	2286 ab	2359 b	2858 a	1965 b
	151	2093 a	1938 a	1438 b	2053 a	2057 a
	Prom	1902 a	1752 a	1706 a	2211 a	1795 a
K^+						
TC2	111	3925 b	3732 b	3926 b	3918 b	4959 a
	126	3147 a	2935 a	3188 a	3031 a	3031 a
	141	4117 a	2586 c	3663 b	3395 b	4066 a
	Prom	3730 ab	3048 b	3592 ab	3448 ab	4019 a
TC3	101	3843 c	5185 a	4439 bc	5160 a	4555 b
	118	4279 c	4814 b	4999 b	5426 a	4438 c
	151	3425 c	3592 ab	3951 a	3626 ab	3504 b
	Prom	3849 b	4530 a	4451 a	4737 a	4166 ab

DDT (días después del trasplante). Letras diferentes en un mismo crudo indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) ($p \leq 0,05$).

4.3.3. Microorganismos.

Con respecto a los hongos totales (FT), FertControl tuvo la mayor concentración significativamente diferente de los otros tratamientos.

En general, el tratamiento Comp mejoró la biomasa bacteriana en la rizosfera, incluida una alta presencia de bacterias amonificantes, en consonancia con resultados anteriores que reportaron una mejora en la biomasa microbiana después de la aplicación de enmiendas orgánicas [35,36]. El aumento de la biomasa microbiana en Hale et al. [35], que probó compost y biochar en parcelas de césped, se atribuyó al aumento de la población bacteriana, pero no hongos, lo cual está en línea con los resultados del presente estudio. El aumento de los hongos (FT) en suelos tratados con fertilizantes químicos (FertControl) coincide con los resultados de Fu et al. [36], que encontró un aumento de la población de hongos en respuesta a monocultivos convencionales, y a los resultados de De Zhou y Wu [37], que tras estudiar ciclos continuos de pepino, después de 7 años reportaron un aumento de *Fusarium* combinado con una disminución del rendimiento del cultivo.

La tabla 4.4. muestra las concentraciones de microorganismos en la rizósfera durante TC3. La mayor concentración de bacterias totales (BT) se observó en el tratamiento Comp, mientras que FertControl y OrgControl mostraron las concentraciones más bajas. Comparado con los tratamientos orgánicos, FertControl registró la menor presencia de bacterias amonificantes (AB).

Tabla 4.4 Concentración de bacterias totales (BT), hongos totales (FT) y bacterias amonificantes (AB) expresado en unidades formadoras de colonias (UFC) $g^{-1} \log_{10}$, en la rizósfera en tercer ciclo (TC3) como función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m^{-1} (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a 4 kg m^{-1} (CropRes), compost aplicado a 3 kg m^{-1} (Comp), y vermicompost aplicado a razón de 3 kg m^{-1} (VermiComp).

	BT	FT	AB
FertControl	5.68 b	3.90 a	3.00 b
OrgControl	5.66 b	2.45 b	7.31 a
CropRes	7.48 ab	2.82 b	7.37 a
Comp	7.60 a	2.52 b	7.48 a
VermiComp	6.36 ab	2.70 b	7.43 a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos al nivel de confianza del 95% ($p \leq 0.05$; LSD de Fisher).

La misma tendencia en el número de hongos observada tanto con la aplicación de productos químicos como en sistemas de cultivo continuo a largo plazo, puede ser atribuida a la

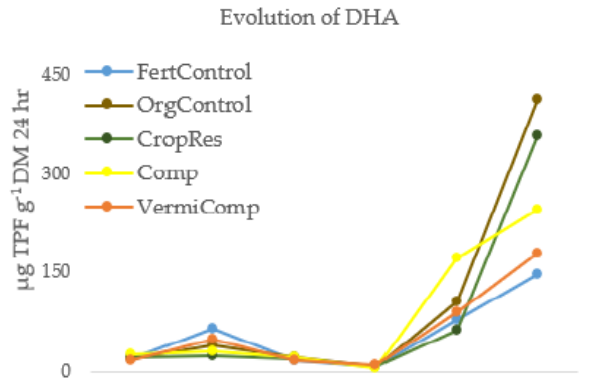
fatiga del suelo que estas prácticas agrícolas causan [37], explicando la necesidad de continuas solarizaciones y desinfección de los suelos.

La incorporación de materias orgánicas al suelo como fertilizantes, mejoró significativamente la concentración de AB (más del doble) en todos los tratamientos orgánicos en comparación al manejo de la fertilización mineral. Esto puede atribuirse a la mayor presencia de sustrato de crecimiento para los microorganismos amonificantes. Sin embargo, Luo et al. [17] informó que la influencia de los fertilizantes orgánicos en la comunidad microbiana, puede atribuirse principalmente a la microbiota asociada a la materia orgánica, que se incorpora al suelo e interactúa con los microorganismos nativos. Estos resultados justifican que los niveles de N en savia durante los cultivos fueron adecuados en todos los tratamientos; el aumento de las poblaciones de microorganismos y AB en el suelo permitió la disponibilidad de N para las plantas.

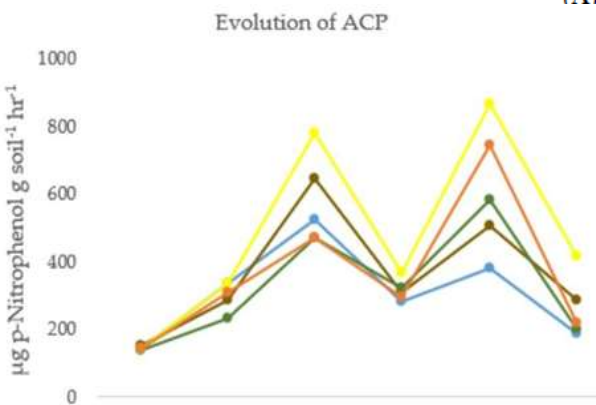
Los resultados de los ensayos son consecuencia de realizar cultivos continuos sin aporte de enmiendas orgánicas lo que produce cambios en la población microbiana del suelo que se manifiesta en un aumento significativo en la abundancia de hongos totales, y esto puede conducir a enfermedades y problemas del suelo para los cultivos posteriores [36,37]. Por el contrario, la aplicación de fertilizantes orgánicos permite restaurar la microbiota del suelo, que mineraliza y solubiliza los nutrientes, evitando las deficiencias nutricionales de las plantas (la concentración de N-NO_3^- y K^+ en savia en las plantas de los tratamientos orgánicos fue estadísticamente comparable a la fertilización mineral) y pérdidas de producción. Entre las diferentes alternativas para valorizar los residuos agrícolas en zonas con producción hortícola intensiva, los resultados sugieren que el uso de los residuos vegetales como fuente de nutrientes es una estrategia válida para limitar el uso de fertilizantes químicos, ya que ayuda a mejorar la salud biológica del suelo sin comprometer el rendimiento. El compost o vermicompost de residuos vegetales puede incorporarse satisfactoriamente al suelo. Además, se ha estudiado que la fertilización con materiales derivados de residuos agrícolas mejora la calidad del tomate, lo que resulta en un alto contenido de licopeno, ácido ascórbico y fenoles [4]. En vista de la valorización de residuos agrícolas, futuras investigaciones podrían centrarse en estrategias para enriquecer el compost o vermicompost, derivado de residuos vegetales, con microorganismos para mejorar la eficiencia de los fertilizantes. Además, considerando que la fertirrigación es una práctica común en los sistemas hortícolas, se requiere un mejor conocimiento sobre la potencialidad de los extractos acuosos de compost/vermicompost utilizados como alternativas a las soluciones minerales convencionales.

4.3.4. Actividad enzimática.

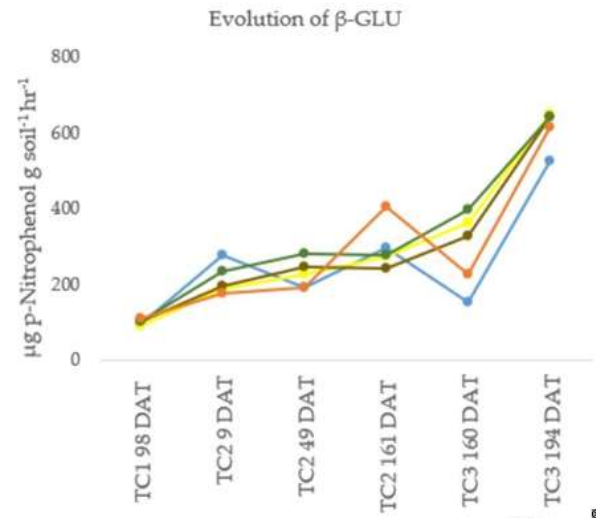
La figura 4.1. muestra la evolución de la actividad de deshidrogenasa (DHA), la fosfatasa ácida (ACP) y la glucosidasa (β -GLU) durante los tres ciclos del tomate. Una alta actividad enzimática está relacionada con la alta presencia de microorganismos activos en el suelo, que es esencial para la disponibilidad de nutrientes para las plantas, especialmente en los suelos donde la fertilización mineral se reemplaza con el suministro de nutrientes orgánicos.



DHA	TC1	TC1	TC2	TC2	TC3	TC3
	92	161	49	161	68	195
	DAT	DAT	DAT	DAT	DAT	DAT
Fert Control	a	a	a	a	b	c
Org Control	a	a	a	a	b	a
Crop Res	a	a	a	a	b	a
Comp	a	a	a	a	a	ab
Vermi Comp	a	a	a	a	b	b



ACP	TC1	TC1	TC2	TC2	TC3	TC3
	92	161	49	161	68	195
	DAT	DAT	DAT	DAT	DAT	DAT
Fert Control	a	a	a	c	b	c
Org Control	a	a	a	bc	b	b
Crop Res	a	a	a	b	b	bc
Comp	a	a	a	a	a	a
Vermi Comp	a	a	a	bc	b	bc



β-GLU	TC1	TC1	TC2	TC2	TC3	TC3
	92	161	49	161	68	195
	DAT	DAT	DAT	DAT	DAT	DAT
Fert Control	bc	a	c	b	c	a
Org Control	ab	bc	b	c	ab	a
Crop Res	bc	b	a	b	a	a
Comp	c	c	b	b	a	a
Vermi Comp	a	c	c	a	bc	a

Figura 4.1. Evolución de (A) la actividad deshidrogenasa (DHA), (B) la actividad de fosfatasa ácida (ACP), (C) la actividad glucosidasa (-GLU) en el suelo durante tres ciclos de cultivo (TC1, TC2, TC3) en función del tratamiento de fertilización: fertirrigación mineral (FertControl), estiércol de cabra aplicado a razón de 3 kg m⁻¹ (OrgControl), residuo vegetal fresco aplicado a 4 kg m⁻¹ (CropRes), compost aplicado a 3 kg m⁻¹ (Comp), y vermicomposta aplicada a razón de 3 kg m⁻¹ (VermiComp). DDT, Día Después del Trasplante. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos al 95% de nivel de confianza (p≤0.05; LSD Fisher).

En general, la actividad enzimática (DHA, ACP, β -GLU) fue menor en el FertControl tratamiento. De lo contrario, durante TC1 y TC2, las diferencias entre tratamientos no fueron uniformes. Durante TC1 y TC2, la actividad de DHA se mantuvo en un nivel bajo, sin diferencias significativas entre tratamientos. DHA se considera un índice general de actividad microbiana [22]. La aplicación de enmiendas orgánicas antes del trasplante de TC2 no afecta la actividad biológica durante el mismo ciclo, que sólo comenzó a aumentar durante TC3. Esto podría deberse a la fase de adaptación inicial de los microorganismos después de la aplicación de enmiendas orgánicas [38]. Después de la fase inicial, el microbiota del suelo alcanzó su óptimo crecimiento, seguido de una mejora de la actividad enzimática.

En cuanto a ACP, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en los primeros tres análisis (TC1 a los 98 DDT; TC2 a los 9 DDT; TC2 a los 49 DDT), mientras que los últimos tres (TC2 a los 161 DDT; TC3 a los 160 DDT; TC3 a los 194 DDT), la actividad ACP fue más alta observado en parcelas tratadas con Comp.

Es importante remarcar que las enzimas ACP son producidos tanto por microorganismos como por raíces de plantas. La rápida disminución general de ACP la actividad observada en TC2 a los 161 DDT y en TC3 a los 195 DDT se debió a la falta de enzimas producido por las raíces de las plantas, ya que el análisis se realizó entre dos ciclos de cultivo. β -GLU es sintetizado por la microbiota del suelo en presencia de un sustrato de celulosa, ya que esta enzima está involucrada en su descomposición [38]. En los tres ciclos de cultivo, se observó un aumento general de actividad de β -GLU después de la aplicación de la enmienda orgánica. Este incremento podría estar relacionado con el aumento de la degradación de la materia orgánica en un ciclo de cultivo continuo [38].

En general, en este estudio la aplicación de enmiendas orgánicas derivadas de residuos agrícolas tuvo un efecto positivo sobre la actividad enzimática del suelo, como se reportó previamente [21]. En línea con nuestros resultados, Hernández et al. [8], evaluando el uso de compost solo o combinado con fertilizantes inorgánicos en dos cultivos consecutivos de lechuga, informó que mientras en el primer ciclo no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en la actividad de DHA, ACP y β -GLU, en el segundo ciclo de lechuga se registró mayor actividad enzimática en las parcelas donde se aplicó compost en comparación con las parcelas manejadas solo con fertilizantes minerales.

La actividad enzimática también es una buena herramienta para estudiar la disponibilidad potencial de nutrientes para plantas ya que las enzimas intervienen en la mineralización de la materia orgánica y potencian la calidad del suelo [21]. Los resultados de este estudio indican que la aplicación continua de enmiendas derivadas de residuos agrícolas tiene un efecto positivo sobre la actividad de la microbiota, que en consecuencia evita la deficiencia de nutrientes y da como resultado alto rendimientos. Además, los microorganismos pueden afectar indirectamente el crecimiento de las plantas mediante la producción de hormonas y reguladores del crecimiento de las plantas [32].

4.3.5. Correlaciones de Pearson de las propiedades biológicas del suelo.

Para estudiar la relación entre la microbiota del suelo y la actividad enzimática se analizó el coeficiente de correlación de Pearson (figura 4.2.).

La actividad enzimática se considera un indicador de la calidad del suelo y se utiliza para monitorear la actividad microbiana [37]. La correlación negativa entre DHA, ACP y β -GLU con FT (-0,4716; -0,6758; -0,7396) puede deberse a los efectos negativos de la comunidad fúngica sobre la actividad microbiana beneficiosa. La mayor población de FT se encontró en parcelas manejadas con un plan de fertirrigación y donde no se agregaron enmiendas orgánicas.

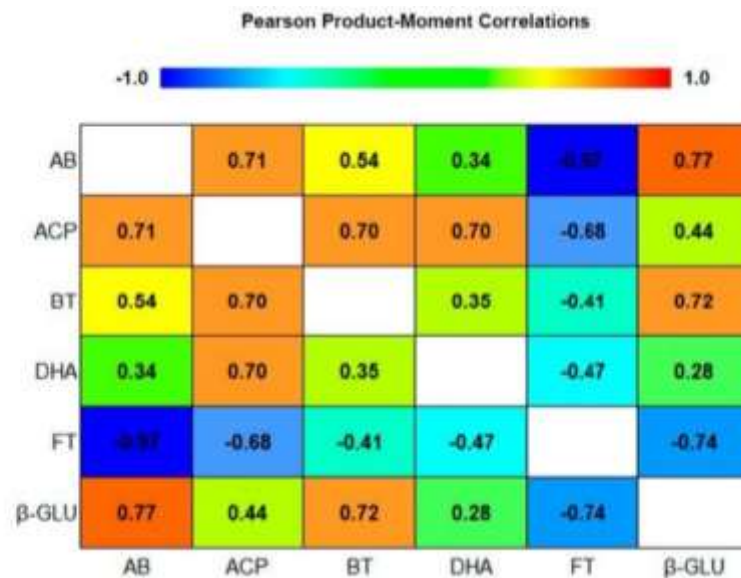


Figura 4.2. Correlación producto-momento de Pearson en relación a las propiedades biológicas del suelo en los tres ciclos (TC3).

La relación negativa entre la actividad enzimática del suelo y FT puede sugerir que la estructura de la comunidad de esta población de hongos juega un papel negativo en la salud del suelo, como lo informaron previamente Fu et al. [36] y Zhou y Wu [37] al evaluar la continuación del monocultivo. Además, los resultados mostraron una correlación negativa entre AB y FT (-0,9675), al mismo tiempo que la actividad enzimática aumenta con la población de bacterias. La actividad DHA, ACP y β -GLU se correlacionan positivamente con los microorganismos que facilitan la disponibilidad de nutrientes: ACP con AB (0,7121) y BT (0,7002), y β -GLU con AB (0,7736) y BT (0,7194). Simultáneamente, los suelos tratados orgánicamente en el experimento mostraron un aumento de la actividad DHA, ACP, β -GLU, lo que indica que las enmiendas orgánicas derivadas de residuos vegetales proporcionan un sustrato específico para las enzimas que juegan un papel clave en la descomposición de la materia orgánica del suelo. materia [8].

4.4. Conclusiones.

Nuestro estudio confirma que el compost y el vermicompost derivados de residuos agrícolas podrían sustituir la fertilización mineral, ya que no se obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento durante los tres ciclos de tomate.

Los resultados mostraron que la abundancia total de bacterias, principalmente la abundancia de bacterias amonificantes, y la actividad enzimática del suelo aumentaron con la aplicación de fertilizantes orgánicos. Los cambios en la abundancia microbiana del suelo se observan a corto plazo y se correlacionan positivamente con la actividad enzimática.

Los fertilizantes químicos disminuyen la abundancia de poblaciones microbianas que promueven el crecimiento, como las bacterias amonificantes, y aumenta la población total de hongos.

Los resultados sugieren que el uso de los residuos vegetales como fuente de nutrientes es una estrategia válida para limitar el uso de fertilizantes químicos, ya que ayuda a mejorar la salud biológica del suelo sin comprometer el rendimiento. El compost o vermicompost de residuos vegetales puede incorporarse satisfactoriamente al suelo. Además, se ha estudiado que la fertilización con materiales derivados de residuos agrícolas mejora la calidad del tomate, lo que resulta en un alto contenido de licopeno, ácido ascórbico y fenoles.

Este estudio debería animar al sector horticultura a implementar una estrategia circular en el manejo nutricional de cultivos, reduciendo la necesidad de insumos externos.

Bibliografía.

1. Demirbas, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Convers. Manag.* 2011, 52, 1280–1287.
2. Aznar-Sánchez, J.A.; Velasco-Muñoz, J.F.; García-Arca, D.; López-Felices, B. Identification of opportunities for applying the circular economy to intensive agriculture in Almería (South-East Spain). *Agronomy* 2020, 10, 1499.
3. Lopez, M.J.; Masaguer, A.; Paredes, C.; Perez, L.; Muñoz, M.; Salas, M.C.; Hernandez, R. De residuos a recursos. El camino hacia la Sostenibilidad. *Red Española Compost.* 2015, 91–121.
4. Carricondo-Martínez, I.; Berti, F.; Salas-Sanjuán, M.C. Different Organic Fertilization Systems Modify Tomato Quality: An Opportunity for Circular Fertilization in Intensive Horticulture. *Agronomy* 2022, 12, 174. [CrossRef]
5. Janssen, B.H.; Oenema, O. Global economics of nutrient cycling. *Turk. J. Agric. For.* 2008, 32, 165–176.
6. Cambier, P.; Pot, V.; Mercier, V.; Michaud, A.; Benoit, P.; Revallier, A.; Houot, S. Impact of long-term organic residue recycling in agriculture on soil solution composition and trace metal leaching in soils. *Sci. Total Environ.* 2014, 499, 560–573.
7. Williams, H.; Colombi, T.; Keller, T. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden. *Geoderma* 2020, 360, 114010.
8. Hernández, T.; Chocano, C.; Moreno, J.L.; García, C. Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (*Lactuca sativa* L.) crops—Effects on soil and plant. *Soil Tillage Res.* 2016, 160, 14–22.
9. Carrera, L.M.; Buyer, J.S.; Vinyard, B.; Abdul-Baki, A.A.; Sikora, L.J.; Teasdale, J.R. Effects of cover crops, compost, and manure amendments on soil microbial community structure in tomato production systems. *Appl. Soil Ecol.* 2007, 37, 247–255.
10. Liang, B.; Zhao, W.; Yang, X.; Zhou, J. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat–maize experiment. *Field Crops Res.* 2013, 144, 126–134.
11. Pant, A.P.; Radovich, T.J.; Hue, N.V.; Talcott, S.T.; Krenek, K.A. Vermicompost extracts influence growth, mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai, *Chinensis* group) grown under vermicompost and chemical fertilizer. *J. Sci. Food Agric.* 2009, 89, 2383–2392.
12. Grobelak, A.; Napora, A.; Kacprzak, M. Using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to improve plant growth. *Ecol. Eng.* 2015, 84, 22–28.
13. Wang, L.; Kaur, M.; Zhang, P.; Li, J.; Xu, M. Effect of Different Agricultural Farming Practices on Microbial Biomass and Enzyme Activities of Celery Growing Field Soil. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 12862.
14. Bhunia, S.; Bhowmik, A.; Mallick, R.; Mukherjee, J. Agronomic Efficiency of Animal-Derived Organic Fertilizers and Their Effects on Biology and Fertility of Soil: A Review. *Agronomy* 2021, 11, 823.

15. Treonis, A.M.; Austin, E.E.; Buyer, J.S.; Maul, J.E.; Spicer, L.; Zasada, I.A. Effects of organic amendment and tillage on soil microorganisms and microfauna. *Appl. Soil Ecol.* 2010, 46, 103–110.
16. Wang, J.; Song, Y.; Ma, T.; Raza, W.; Li, J.; Howland, J.G.; Huang, Q.; Shen, Q. Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil. *Appl. Soil Ecol.* 2017, 112, 42–50.
17. Luo, Y.; van Veelen, H.P.J.; Chen, S.; Sechi, V.; ter Heijne, A.; Veecken, A.; Buisman, C.J.N.; Bezemer, T.M. Effects of sterilization and maturity of compost on soil bacterial and fungal communities and wheat growth. *Geoderma* 2022, 409, 115598.
18. Chen, Y.P.; Tsai, C.F.; Rekha, P.D.; Ghate, S.D.; Huang, H.Y.; Hsu, Y.H.; Liaw, L.L.; Young, C.C. Agricultural management practices influence the soil enzyme activity and bacterial community structure in tea plantations. *Bot. Stud.* 2021, 62, 8.
19. Adetunji, A.T.; Lewu, F.B.; Mulidzi, R.; Ncube, B. The biological activities of 29. Sánchez, N.A.; Sánchez, J.A.; Salas, M.C.; Arantzazu, M.B.; Delgado, M.J. Medium-term influence of organic fertilization on the quality and yield of a celery crop. *Agronomy* 2020, 10, 1418.
20. Cordovil, C.M.D.S.; de Varennes, A.; Pinto, R.M.D.S.; Alves, T.F.; Mendes, P.; Sampaio, S.C. Decomposition rate and enzymatic activity of composted municipal waste and poultry manure in the soil in a biofuel crops field. *J. Sci. Food Agric.* 2017, 97, 2245–2255.
21. Ruiz, J.L.; Salas, M.C. Evaluation of organic substrates and microorganisms as bio-fertilization tool in container crop production. *Agronomy* 2019, 9, 705.
22. Vargas-García, M.C.; Suárez-Estrella, F.; López, M.J.; Moreno, J. Microbial population dynamics and enzyme activities in composting processes with different starting materials. *Waste Manag.* 2010, 30, 771–778.
23. Bergougnoux, V. The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* 2014, 32, 70–189.
24. Faostat. Available online: <http://www.fao.org/faostat/es> (accessed on 13 December 2021).
25. Cadahia, C. La savia como índice de fertilización. *Cultivos agroenergéticos, hortícolas, frutales y ornamentales.* Mundi-PrensaMadr. 2008, 35–68.
26. Wilson, P.W.; Knight, S.C. *Experiments in Bacterial Physiology*; Burgess: Minneapolis, MN, USA, 1952.
27. Herigstad, B.; Hamilton, M.; Heersink, J. How to optimize the drop plate method for enumerating bacteria. *J. Microbiol. Methods* 2001, 44, 121–129.
28. Tabatabai, M.A.; Bremner, J.M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1969, 4, 301–307.
29. Sánchez, N.A.; Sánchez, J.A.; Salas, M.C.; Arantzazu, M.B.; Delgado, M.J. Medium-term influence of organic fertilization on the quality and yield of a celery crop. *Agronomy* 2020, 10, 1418.
30. Bilalis, D.; Krokida, M.; Roussis, I.; Papastylianou, P.; Travlos, I.; Cheimona, N.; Dede, A. Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Hort.* 2018, 30, 321–332.

31. Riahi, A.; Hdidier, C.; Sanaa, M.; Tarchoun, N.; Kheder, M.B.; Guezal, I. Effect of conventional and organic productions systems on the yield and quality of field tomato cultivars grown in Tunisia. *J. Sci. Food Agric.* 2009, 89, 2275–2282.
32. Arancon, N.Q.; Edwards, C.A.; Bierman, P.; Welch, C.; Metzger, J.D. Influences of vermicomposts on field strawberries: Effects on growth and yields. *Bioresour. Technol.* 2004, 93, 145–153.
33. Wang, X.X.; Zhao, F.; Zhang, G.; Zhang, Y.; Yang, L. Vermicompost improves tomato yield and quality and the biochemical properties of soils with different tomato planting history in a greenhouse study. *Front. Plant Sci.* 2017, 8, 1978.
34. Murmu, K.; Ghosh, B.C.; Swain, D.K. Yield and quality of tomato grown under organic and conventional nutrient management. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2013, 59, 1311–1321.
35. Hale, L.; Curtis, D.; Azeem, M.; Montgomery, J.; Crowley, D.E.; McGiffen, M.E., Jr. Influence of compost and biochar on soil biological properties under turfgrass supplied deficit irrigation. *Appl. Soil Ecol.* 2021, 168, 104134.
36. Fu, H.; Zhang, G.; Zhang, F.; Sun, Z.; Geng, G.; Li, T. Effects of continuous tomato monoculture on soil microbial properties and enzyme activities in a solar greenhouse. *Sustainability* 2017, 9, 317.
37. Zhou, X.G.; Wu, F.Z. Changes in soil chemical characters and enzyme activities during continuous monocropping of cucumber (*Cucumis sativus*). *Pak. J. Bot.* 2015, 47, 691–697.
38. Guerra, P.A.M.; Sanjúan, M.C.S.; López, M.J. Evaluation of physicochemical properties and enzymatic activity of organic substrates during four crop cycles in soilless containers. *Food Sci. Nutr.* 2018, 6, 2066–2078.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DEL EXTRACTO CELULAR DE PECIOLO EN EL DIAGNÓSTICO NUTRICIONAL EN CULTIVO DE TOMATE CON FERTILIZACIÓN ORGÁNICA.



Fotografía 5.1. Detalle del cultivo de tomate, hoja para el análisis de savia, eliminación de foliolo de la hoja previo a la extracción de savia, peciolo para la extracción de savia y muestras de savia previo al análisis de iones.

Resumen.

El actual modelo de horticultura intensivo se caracteriza por un elevado empleo de insumos y una grande generación de residuos. Los residuos vegetales, gracias a sus características, constituyen un valioso y preciado material, permitiendo su reutilización dentro del ciclo productivo como fuente de nutrientes para el cultivo, enmienda del suelo, sustrato etc., lo que conlleva a una reducción de la dependencia de insumos externos. El sistema de producción hortícola en invernadero del sudeste español genera más de 2 mill. de t de residuos vegetales por año (Aznar-Sánchez et al., 2020) disponibles para su transformación o uso directo en el cultivo. Aplicar materiales orgánicos como enmienda en el suelo de los cultivos en invernadero nos obliga a cuestionarnos si este tipo de fertilización es capaz de dar respuesta a la demanda nutricional elevada de los cultivos intensivos. En una horticultura circular estos residuos se convierten en una gran oportunidad. Según (Sauvé et al., 2016), la economía circular “propone un sistema donde la reutilización y el reciclaje sustituyan el uso de materias primas vírgenes”. El experimento se llevó a cabo en un invernadero en el SE español en dos cultivos consecutivos. Se realizaron 5 tratamientos según la forma de suministrar los nutrientes. Uno de los tratamientos corresponde al modo habitual de aporte de nutrientes mediante el suministro por fertirrigación de los fertilizantes minerales (FerMin), otro tratamiento con aplicación de estiércol de cabra compostado (Est), y los otros 3 con aporte de materiales provenientes de restos vegetales procesados en 3 formas: restos frescos del cultivo anterior enterrados una vez finalizado (Veg), y compost (Com) y vermicompost (Vco) de los restos vegetales del cultivo anterior. Para valorar si el aporte de nutrientes en forma orgánica y como enmienda está cumpliendo con la demanda nutricional del cultivo disponemos de herramientas de diagnóstico vegetal como los análisis de extracto celular de peciolo (“análisis de savia”) (Cadahía, 2008). Por ello el objetivo de este trabajo es cuantificar las diferencias en los análisis de savia según fuente de nutriente aportada (mineral u orgánica) en un cultivo de tomate en invernadero. Identificar las fuentes de variación en los análisis de savia es parte de los objetivos, ya que permitiría convertir el análisis de savia en una herramienta universal, y entender la dinámica del diagnóstico nutricional al emplear diferentes fuentes de nutrientes. Según los resultados, la concentración de determinados macronutrientes (H_2PO_4^- y Ca^{2+}) y Na^+ en extracto celular de peciolo se diferencia estadísticamente según se fertilice con solución nutritiva mineral o con fuente orgánica. Incluso según la fuente de materia orgánica empleada se aprecian mejores valores (mayor de P y menor de Na) cuando el vermicompost es empleado como fuente de nutrientes. Según los resultados que relacionan la producción con el estado nutricional, según los análisis en savia, el H_2PO_4^- se convierte en un elemento limitante para los cultivos cuando fertilizamos con enmiendas orgánicas como el compost, restos vegetales de cultivo enterrados y estiércol. El análisis de savia manifiesta las deficiencias en determinados nutrientes como el P que son aportados en cantidades insuficientes en algunos materiales orgánicos como el estiércol empleado en el ensayo, así como la capacidad del vermicompost de restos vegetales de cultivos hortícolas de invernadero como enmienda orgánica para conseguir las concentraciones de iones en savia suficientes que le permiten alcanzar producciones similares a las plantas fertirrigadas con fertilizantes minerales. Como conclusión general, el análisis de savia demuestra ser una herramienta que permite apreciar las diferencias en las características de los materiales empleados como fuente de nutriente.

5.1. Introducción.

El actual modelo de horticultura intensivo se caracteriza por un elevado uso de insumos y una grande generación de residuos. La fertilización de los sistemas hortícolas convencionales se basa en el uso de fertilizantes de síntesis que se aplican vía riego, fertirrigación. Esta metodología ha permitido, por un lado, el aumento de la productividad de los cultivos, y por otro lado, su uso indiscriminado ha provocado la pérdida de fertilidad y el deterioro de la población microbiana de los suelos (Shen et al., 2021), y la contaminación de las aguas subterráneas (Aznar-Sánchez et al., 2020). Además, durante el proceso de producción de fertilizantes minerales se generan emisiones de CO₂, contribuyendo al aumento global de las temperaturas (Mona et al., 2021).

Debido a la demanda de los consumidores de alimentos saludables producidos de una forma cada vez más sostenibles, y al encarecimiento de los fertilizantes, los productores deben optimizar el uso de los recursos fertilizantes mediante el control adecuado de la nutrición de los cultivos y el uso de materiales alternativos.

El sistema de producción hortícola intensivo del SE español genera una elevada cantidad de residuos vegetales derivados de la poda, las plantas arrancadas al final del ciclo, las malas hierbas, la fruta no comercial, etc. (Tolón Becerra & Lastra Bravo, 2010). Concretamente, en Almería más del 90% del peso de los residuos agrarios generados es de origen vegetal, con casi 2 millones de toneladas al año (Cajamar, 2016). El cultivo que genera mayor cantidad de residuos vegetales por unidad de superficie es el tomate, seguido por el pimiento y la berenjena (Tolón Becerra & Lastra Bravo, 2010) (tabla 5.1). Estos restos vegetales pueden reutilizarse mediante el compostaje y vermicompostaje, o enterramiento directo del material vegetal una vez finalizado el cultivo. En el modelo de economía lineal, los residuos vegetales agrícolas son considerados un problema debido a su inadecuada gestión que causa un elevado impacto medioambiental (Aznar-Sánchez et al., 2020). Sin embargo, en una horticultura circular estos residuos son considerados una gran oportunidad. Según (Sauvé et al., 2016), la economía circular “propone un sistema donde la reutilización y el reciclaje sustituyan el uso de materias primas vírgenes. Disminuyendo nuestra dependencia de dichos recursos, mejorando nuestra capacidad y la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades”. La legislación europea promueve la transformación de los residuos agrícolas en subproductos (Castillo-Díaz et al., 2021). Dentro del marco del pacto verde europeo, en 2015 la Comisión publicó un Plan de Acción para una economía circular en Europa, renovado en 2020 (CEE, 2020). Según el documento, con respecto al sector agrícola, la Comisión “desarrollará un plan integrado de gestión de nutrientes con el fin de asegurar una aplicación más sostenible de los nutrientes y de estimular los mercados de los nutrientes recuperados”.

Los residuos vegetales, gracias a sus características, constituyen un valioso y preciado material, que permite su reutilización dentro del ciclo productivo (Mejía-Guerra, 2022) como fuente de nutrientes para el cultivo, enmienda del suelo, sustrato, etc., contribuyendo a una reducción de la dependencia de insumos externos. El aporte de materia orgánica al suelo mejora sus características físicas, químicas y biológicas (Carricondo-Martínez et al., 2022). Desde un punto de vista microbiológico, gracias al aporte de ácidos húmicos provenientes de la materia orgánica se favorece el crecimiento de la microbiota del suelo que permite una mayor solubilización de los nutrientes disponibles para las plantas. Además, los ácidos húmicos permiten una mayor quelación de los nutrientes e incrementan la disponibilidad de los mismos para las plantas.

Tabla 5.1. Estimación de los residuos vegetales en peso fresco (hojas, tallos y frutos no comerciales) según los principales cultivos hortícolas de la provincia de Almería

CULTIVOS	Residuos frescos medios (t ha ⁻¹)	Superficie (ha)	Residuos frescos totales (t)
Tomate	73,30	10.380	760.854
Berenjena	44,60	2.150	95.890
Calabacín	44,50	7.755	345.098
Pepino	38,80	5.099	197.841
Pimiento	37,00	10.181	376.697
Melón	33,20	1.808	60.026
Judías verdes	27,40	510	13.974
Sandía	17,00	7.797	132.549
			Total
			1.982.928,30

Fuente: Elaborada con datos de Cajamar, 2016 y Duque-Acevedo et al., 2020.

Responder a la demanda nutricional de los cultivos intensivos mediante el suministro de elementos minerales es una tarea difícil. La relación entre la absorción de nutrientes del cultivo y las proporciones en las que las raíces absorben los elementos nutritivos están influenciadas por las condiciones climáticas, y cambian considerablemente durante el período de crecimiento, especialmente en cultivos de ciclo largo como cucurbitáceas y solanáceas. La nutrición mineral depende del crecimiento de la planta y está fuertemente influenciada por la tasa de fotosíntesis; por lo tanto, la absorción de nutrientes aumenta con el aumento de la irradiación. Otros factores que afectan a la absorción de nutrientes son sus concentraciones y las de otros elementos (debido al efecto sinérgico o antagonista), y el pH, la salinidad y el contenido de humedad del medio radical. También depende de otros factores, como las características del cultivo (p. ej. tolerancia a la salinidad) y la etapa fenológica, el clima y el sistema de cultivo (suelo-sustrato-hidropónico). Para adecuar el suministro de nutrientes a la demanda del cultivo es frecuente recurrir a variaciones en la concentración de la solución aplicada por fertirriego. La concentración molar total en la solución nutritiva varía entre 20 y 40 mM o entre 1 y 2 g L⁻¹ (Pardossi et al, 2017), empleándose mayores concentraciones durante los periodos de menor demanda hídrica coincidiendo con menor demanda climática (Sonneveld y Voogt, 2009).

El uso exclusivo de materiales de origen orgánico como fuente de nutrientes aplicados como enmienda al suelo en invernadero nos obliga a cuestionarnos si este tipo de fertilización es capaz de dar respuesta a la demanda nutricional elevada de los cultivos intensivos. Y a su vez, conseguir que el aporte de nutrientes se adecue a la demanda diferencial entre ciclos de cultivo,

otoño-invierno y primavera-verano, teniendo en cuenta las diferencias significativas en el consumo hídrico y nutricional de los cultivos según la demanda climática.

Para valorar si el aporte de nutrientes en forma orgánica y como enmienda está cumpliendo con la demanda nutricional del cultivo disponemos de herramientas de diagnóstico vegetal, como los análisis foliares y los análisis de extracto celular de peciolo (“análisis de savia”). Este último es una medida rápida que nos permite conocer en tiempo real el estado nutricional del cultivo (Cadahía, 2008).

En este sentido, existen trabajos que evidencian que los análisis de savia sufren variaciones notables según diferentes factores (Hochmuth, 1994; Llanderal et al., 2020; Mejía-Guerra, 2022). El tipo de sistema de producción, aire libre e invernadero, y estado fenológico (vegetativo y reproductivo) son una fuente de variación suficiente como para considerarla en los criterios de diagnóstico en el análisis de savia (Hochmuth, 1994). De igual manera es de esperar que la forma y frecuencia de aplicación de los nutrientes (fertirriego o enmienda) y/o las características físico químicas de la fuente de nutrientes (mineral u orgánica) se refleje en la concentración en savia de los macronutrientes.

La mayor parte de las referencias bibliográficas consultadas sobre los análisis de savia de los cultivos hortícolas no especifican las formas y manera de aplicar los nutrientes, siendo en su mayoría datos de plantas fertirrigadas con fertilizantes de síntesis o minerales disueltos en el agua en cada uno de los riegos durante todo el ciclo de cultivo (tabla 5.2).

En cultivos hortícolas en invernadero, la mayoría de las referencias disponibles de la concentración de elementos en savia de peciolo son de NO_3 y K^+ , con escasa información sobre los demás macronutrientes (Hochmuth, 1994; Llanderal et al., 2020; Mejía-Guerra, 2022; Ruiz & Salas Sanjuan, 2022).

El objetivo de este trabajo es valorar el efecto de la fuente de nutrientes empleado sobre la producción valiéndonos del análisis de extracto celular de peciolo para manifestar las variaciones en la concentración de iones en savia y entender la dinámica del diagnóstico nutricional al emplear diferentes materiales como fuente de nutrientes. Junto a cuantificar las diferencias que puedan observarse en los análisis de savia según la fuente de nutriente aportada (mineral u orgánica) en un cultivo de tomate en invernadero. Poder identificar las fuentes de variación en los análisis de savia permitiría convertir este tipo de análisis en una herramienta universal.

Tabla 5.2. Análisis de extracto celular de peciolo (savia) publicados en diferentes estudios

Fuente	Cadahía, 2008	Hochmuth, 1994	Hochmuth, 1994	Llanderal et al., 2020	Mejía-Guerra et al., 2022	Ruiz & Salas, 2022
Cultivo		tomate	tomate	tomate	tomate	tomate
Invernadero/campo	invernadero	campo	invernadero	invernadero	invernadero	invernadero
Medio radical		suelo	suelo	suelo	sustrato	sustrato
Fertilización	mineral	mineral	mineral	mineral	té de vermicompost	té de vermicompost
Fuente de variación		fase del cultivo	fase del cultivo	fase del cultivo	Uso PGPM	Uso PGPM
Elementos en savia (mg L ⁻¹):						
NO ₃ ⁻	700 – 1210	200-1200	700-1200	1037 – 1408	1070 – 1392	702 - 1200
H ₂ PO ₄ ⁻	35-300			26-185	-	230 - 304
Cl ⁻	750 – 4500			1041 – 1202		
NH ₄ ⁺				-	152 – 177	-
K ⁺	3500 – 5000	2000 - 4000	3500-5000	4000 – 4868	3396 – 3704	2500 - 4600
Ca ²⁺	280 – 1420			486 – 640	608 – 857	288 - 1250
Na ⁺	50 - 400			508 - 608	770 – 1100	

5.2. Materiales y métodos.

5.2.1. Diseño experimental.

El experimento se llevó a cabo en un invernadero con control climático pasivo de 1300 m² situado en Níjar (Almería, España) en dos cultivos consecutivos: ciclo primavera-verano 2018 (3 TC2) y otoño-invierno 2018-2019 (4 TC3). Los dos ciclos de cultivo seleccionados para el análisis se corresponden al tercer y cuarto cultivo consecutivo de tomate realizado en el mismo invernadero siguiendo el mismo manejo. Se realizó con plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. 'Surcal' (Naturesur SCA) injertado sobre portainjerto 'Beaufort' (Monsanto). El marco de plantación fue 0,66 plantas m⁻² con crecimiento tutorado a dos tallos. El sistema de suelo del invernadero es conocido como "enarenado", en el que se colocaron sobre el suelo de grava autóctono, 20–30 cm de suelo franco importado, y 8-12cm de mantillo arenoso en la parte superior.

Se realizaron 5 tratamientos según la forma de suministrar los nutrientes. Uno de los tratamientos corresponde al modo habitual de aporte de nutrientes mediante el suministro por fertirrigación de los fertilizantes minerales (FerMin), otro tratamiento con aplicación de estiércol de cabra compostado (Est), y los otros 3 con aporte de materiales provenientes de restos vegetales procesados en 3 formas: restos frescos del cultivo anterior enterrados una vez finalizado (Veg), y compost (Com) y vermicompost (Vco) de los restos vegetales del cultivo anterior. Las características físico-químicas de los materiales utilizado como enmiendas en los 4 tratamientos orgánicos se incluyen en la tabla 5.3.

Table 5.3. Análisis de los materiales orgánicos empleados como enmienda en cada uno de los tratamientos: Est (Estiércol); Veg (residuos vegetales); Com (compost); Vco (vermicompost).

Parámetro	Est	Veg	Com	Vco	Metodología
pH (1:5 v/v)	9,6	6,9	8,3	8,3	ADAS
C.E. ¹ (1:5 w/v) (dS m ⁻¹)	7,73	10,79	12,30	3,39	ADAS
M.O. ² (% d.m.)	30,2	75,5	21,4	17,2	UNE 77318:2001
C/N	11	15	8,9	7,7	UNE 77318:2001
P (% d.m.)	0,53	0,89	0,67	0,64	ADAS
K (% d.m.)	2,18	3,39	2,84	0,77	ADAS
N Kjeldahl (% d.m.)	1,35	2,50	1,20	1,11	UNE 77318:2001
Ca (% d.m.)	3,28	4,34	8,00	7,80	ADAS
Mg (% d.m.)	0,91	0,72	1,51	1,31	ADAS
Cd (µg L ⁻¹)	<0,7	<0,7	<0,7	<0,7	ADAS
Cr (µg L ⁻¹)	11	<2,5	10,9	12,4	Aqua regia digest + ICP
Cu (µg L ⁻¹)	49,4	94,4	363	352	Aqua regia digest + ICP
Pb (µg L ⁻¹)	5,85	<2,5	41,0	21,1	Aqua regia digest + ICP
Ni (µg L ⁻¹)	19	<2,5	8,7	11,3	Aqua regia digest + ICP
Zn (µg L ⁻¹)	175	54,7	117	127	Aqua regia digest + ICP

v/v (volumen/volumen); w/v (peso/volumen); d.m. (peso seco); ¹C.E: conductividad eléctrica; ²M.O: materia orgánica; ICP (inductively coupled plasma).

Los tratamientos con aporte de materia orgánica animal o vegetal fueron regados solo con agua durante los ciclos de cultivo (análisis incluido en la tabla 5.4), sin recibir aporte extra de nutrientes en forma mineral. Solo el tratamiento FertMin fue fertirrigado con solución nutritiva según análisis incluido en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Concentración de elementos minerales (mmol L⁻¹) del agua empleada para riego de los cultivos y la solución nutritiva empleada para fertirrigación del tratamiento FerMin

	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻
Agua de riego	0,6	0,0	0,00	0,4	1,8	13,0	11,0
Solución nutritiva	13,0	1,54	0,89	3,6	1,8	13,0	11,0

En los 4 tratamientos con enmienda orgánica, los materiales orgánicos se aplicaron y homogeneizaron en el suelo de las parcelas el 15 de enero de 2017, antes del trasplante del primer ciclo de cultivo de tomate (TC0), y el 15 de enero de 2018 antes del tercer trasplante de TC2 (tabla 5.5).

Tabla 5.5. Descripción de la secuencia de ciclos de producción de tomate en los que se incluyen los cultivos analizados en este experimento.

Ciclo de producción	Trasplante	Última cosecha
1 TC0	02/02/2017	06/07/2017
2 TC1	22/08/2017	30/01/2018
3 TC2*	06/02/2018	10/07/2018
4 TC3*	22/08/2018	25/02/2019
5 TC4	29/03/2019	18/07/2019
6 TC5	22/08/2019	30/01/2020

*Cultivos considerados para los análisis de savia en este experimento.

5.2.2. Análisis.

Durante los dos ciclos de cultivo en los 5 tratamientos de cada experimento se procedió a realizar el análisis de extracto celular de peciolo (savia) para el control de la concentración de los principales macronutrientes. Los análisis del extracto de peciolo se realizaron seleccionando al azar veinte hojas de diferentes plantas de cada repetición, entre las 9 y las 11 de la mañana. Los pecíolos se separaron de la hoja, se colocaron en bolsas de plástico y dentro de una nevera fueron transportaron al laboratorio de la Universidad de Almería. En el laboratorio, los pecíolos se cortaron en secciones de 1 cm y luego se exprimieron con una prensa de ajo doméstica para la extracción de savia. Las concentraciones de cationes y aniones (NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) y de C.E. y pH en el extracto celular de peciolo se analizaron con un sensor multi-ión con potenciometría y un electrodo de iones selectivos con sonda modular (NT Sensor SL, Tarragona, España). H_2PO_4^- fue analizado con cromatografía. Los datos presentados de análisis de savia son las medias de tres análisis en cada ciclo. En el TC2 los análisis se llevaron a cabo el 115, 130 y 145 días después del trasplante (DDT), y en el ciclo TC3 se efectuaron a 100, 115, 145 DDT.

También se cuantificó el consumo hídrico del sistema por tratamiento durante cada ciclo de cultivo mediante el uso de los lixímetros colocados en cada tratamiento y los goteros de control, calculado por la diferencia entre el volumen de riego aportado y el volumen recogido en el lixímetro.

Finalmente para determinar el efecto de las fertilizaciones se cuantificó la producción total sumando todas las cosechas efectuadas en cada ciclo de cultivo, y expresada en kg m^{-2} .

5.2.3. Análisis estadístico.

Para el análisis estadístico se utilizó el software Statgraphics 18. Se realizó un análisis multivariante de varianza (ANOVA) utilizando la prueba de comparación de medias de Fisher, expresando la diferencia estadísticamente menos significativa (LSD) a $p < 0,05$. Se realizó un análisis

de componentes principales (ACP) para determinar la variabilidad, las correlaciones y los sinergismos entre diferentes variables.

5.3. Resultados y discusión.

El análisis estadístico de la concentración de iones en la savia según los tratamientos se realizó separadamente entre ciclo de primavera y el ciclo de otoño, puesto que se obtuvieron diferencias significativas en la mayoría de los iones entre los ciclos de cultivo (tabla 5.6).

En ambos ciclos de cultivo, primavera y otoño, los valores medios de la concentración de iones en savia (tabla 5.6) están dentro de los rangos indicados por Cadahía (2008) con respecto a K^+ (3500 – 5000 $mg L^{-1}$), Ca^{2+} (280 – 1420 $mg L^{-1}$), Cl^- (750 – 4500 $mg L^{-1}$), Na^+ (50 – 400 $mg L^{-1}$) y Mg^{2+} (190-2000 $mg L^{-1}$) (tabla 5.2). La concentración de cationes en savia (K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , Na^+) están también en línea con los resultados de otros autores (Llanderal et al., 2020; Mejía-Guerra, 2022; Ruiz & Salas, 2019) (tabla 5.6). Con respecto a la concentración de $H_2PO_4^-$ se superan los rangos publicados por Cadahía (2008) (35–300 $mg L^{-1}$), por Llanderal et al. (2020) (26 – 185 $mg L^{-1}$), y por Ruiz y Salas (2022) (230 – 304 $mg L^{-1}$). Así mismo, las concentraciones de NO_3^- en savia, superan los rangos de 133–1000 $mg L^{-1}$ de Cadahía (2008), mientras que en el ciclo primavera están en línea con los resultados de Llanderal et al. (2020) (1037 – 1408 $mg L^{-1}$). Las altas concentraciones de NO_3^- encontradas en este estudio en el ciclo de otoño en todos los tratamientos se justifica considerando que cuando disminuye la intensidad lumínica hay una disminución de la síntesis de carboxilatos y carbohidratos solubles usados como osmolito en plantas, resultando en una mayor absorción de NO_3^- usado como osmolito (Leyva Ruelas et al., 2005).

5.3.1 En función del tipo de fertilización: Fertirriego mineral vs enmienda orgánica.

En el ciclo de primavera, se observan diferencias estadísticamente significativas entre tipo de fertilización solo en la concentración en savia de 3 elementos Ca^{2+} , Na^+ y $H_2PO_4^-$. El resto de los elementos en savia no presenta diferencias estadísticas entre el tipo de fuente fertilizante empleado, mineral y orgánica.

Rodríguez et al. (2021) encontró una disminución de hasta en un 70% en la concentración de NO_3^- en savia entre plantas con suministro adecuado de NO_3^- vía riego y plantas con dosis deficiente de NO_3^- , poniendo de manifiesto las diferentes concentraciones en savia según la dosis de fertilizante. Según los resultados del presente estudio, la materia orgánica aplicada como enmienda proporciona niveles de N suficientes en savia para la absorción de las plantas. La aplicación de fertilización orgánica como enmienda no manifiesta deficiencia de N en savia, si la comparamos con la fertirrigación mineral en continuo (FerMin).

La concentración de Ca^{2+} en savia de las plantas fertilizadas mediante enmiendas orgánicas es significativamente mayor que las fertirrigadas con solución nutritiva (FerMin). Con respecto al Ca^{2+} , es importante remarcar que todos los tratamientos, mineral y orgánicos, fueron irrigados con la misma concentración de Ca^{2+} , ya que la solución nutritiva empleada para fertirriego solo incorporaba el Ca^{2+} que tiene el agua naturalmente (tabla 5.4). No se aplicó Ca^{2+} en forma de fertilizante en ninguno de los tratamientos. La mayor concentración de Ca^{2+} en savia encontrada en los tratamientos orgánicos se explica porque las enmiendas orgánicas aportan muchos beneficios a

las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, entre los cuales destacan, la mejora de la estructura del suelo, con el aumento de su capacidad de retener agua, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) y el crecimiento de microorganismos (Mejía Guerra et al., 2018; Mejía-Guerra, 2022; Phooi et al., 2022). Estas mejoras derivadas de aplicar materia orgánica al suelo como fuente única de nutrientes permiten un aumento en la C.I.C. del suelo que se traduce en una mejora en la disponibilidad de Ca^{2+} y consecuentemente en una mayor absorción de Ca^{2+} por parte de las plantas, reflejado en mayores concentraciones en savia de Ca^{2+} .

A su vez, las enmiendas orgánicas aplicadas al suelo aumentan la presencia de ácidos húmicos, que según Liu et al. (2019) mejoran los macroagregados del suelo y permiten una reducción de la salinidad. Como consecuencia, las plantas de los tratamientos orgánicos muestran una menor concentración de Na^+ en savia en comparación con las fertirrigadas con fertilizantes minerales (tabla 6).

La concentración de H_2PO_4^- en savia en las plantas con fertirrigación mineral es significativamente mayor que en las plantas con fertilizantes orgánicos. La diferencia se debe a que la solución nutritiva aplicada en el tratamiento mineral en el fertirriego incluía fósforo (tabla 4), elemento que no era aportado a los tratamientos orgánicos. Según los resultados, las enmiendas orgánicas no han sido suficiente para mantener los niveles de H_2PO_4^- en savia a los valores cuantificados en la savia de las plantas fertirrigadas con solución mineral. El análisis de extracto celular de peciolo o savia ha permitido apreciar la deficiencia en fósforo en las plantas con los tratamientos con enmiendas orgánicas.

En el ciclo de primavera, los tratamientos orgánicos presentan un consumo hídrico significativamente menor que las plantas fertirrigadas con solución nutritiva mineral. El uso eficiente del agua es otro de los beneficios de la aplicación de materia orgánica al suelo. Los ácidos húmicos presentes en la materia orgánica permiten reducir la evapotranspiración y mejorar la eficiencia en el uso del agua por las plantas.

En el ciclo de otoño, los tratamientos orgánicos vuelven a mostrar una concentración significativamente mayor de Ca^{2+} en comparación con FerMin, que como se explicó anteriormente se justifica con el aumento de C.I.C. al aplicar materias orgánicas que facilita la disponibilidad de Ca^{2+} en el suelo para las plantas.

Al igual que en el ciclo de primavera, la concentración de H_2PO_4^- es mayor en la savia de las plantas fertirrigadas con solución nutritiva mineral.

La concentración de Na^+ también es mayor en el tratamiento mineral sin diferencias significativas, así como la concentración de K^+ , NH_4^+ , NO_3^- y Mg^{2+} , tampoco presenta diferencias estadísticas entre fuente fertilizante. Los resultados demuestran que, por lo general, excluyendo el P, las fuentes orgánicas de nutrientes han sido suficientes para la correcta nutrición de cultivo. Mediante las enmiendas orgánicas se alcanzan niveles en savia similares a los conseguidos mediante fertirrigación mineral a excepción del P.

En el ciclo de otoño no se aprecian diferencias significativas en el consumo hídrico con valores muy similares entre ambos tratamientos, mineral y orgánico.

En ambos ciclos de cultivo, de los iones analizados en el extracto celular de peciolo - savia, solo el H_2PO_4^- presenta concentraciones significativamente mayores en el tratamiento mineral (FerMin) al compararlas con las concentraciones en savia de las plantas con enmiendas orgánicas. Diferentes estudios han verificado que las modificaciones en las concentraciones de elementos en

savia se pueden deber a varios factores, como la fertilización, la intensidad de luz, el estadio fenológico, etc. (Llanderal et al., 2020) En este estudio, la variabilidad detectada en nutrientes en savia entre tratamientos se debe solo a la fuente y forma de fertilización, ya que todas las plantas consideradas en cada tratamiento se encuentran bajo las mismas condiciones de cultivo. Ikeda et al. (en Llanderal et al., 2020), encontró una reducción en la concentración de NO_3^- , H_2PO_4^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} en cultivo de tomate después de 10 días sin aporte externo de nutrientes. Según los resultados de los análisis de savia de los dos ciclos de cultivo se demuestra que, las enmiendas orgánicas representan una fuente de nutrientes capaz de mantener niveles iónicos en savia semejantes a las plantas con aporte mineral mediante fertirrigación, a excepción del P- H_2PO_4^- con concentraciones significativamente menores. Las fuentes orgánicas de fertilizante mejoran la concentración en Ca^{2+} en comparación a la fertilización mineral sin aporte de fuentes de calcio como fertilizantes.

5.3.2. En función de la fuente de materia orgánica empleada como nutriente.

Una vez realizado el ANOVA entre el tipo de fertilización (orgánica o mineral) se procedió a realizar el análisis entre los diferentes tipos de materias orgánicas empleadas como enmienda orgánica para valorar las posibles diferencias en la concentración iónica en savia.

En los dos ciclos, primavera y otoño, coincide que la concentración de Cl^- y NH_4^+ en savia no presenta diferencias estadísticas entre el tipo de materia orgánica. Además, en el ciclo de otoño no se obtuvieron diferencias en las concentraciones de Na^+ y Mg^{2+} ; y en el ciclo de primavera no se aprecian diferencias en Ca^{2+} y NO_3^- .

En el ciclo de primavera, las concentraciones de K^+ , Na^+ , Mg^{2+} y H_2PO_4^- en savia son significativamente mayores en el tratamiento con vermicompost. Diferentes autores han demostrado la alta disponibilidad de K^+ , Mg^{2+} y H_2PO_4^- en los vermicompost, en comparación con los compost (Hervas et al., 1989; Tognetti et al., 2005). Los tratamientos Est y Veg no presentaron diferencias significativas en las concentraciones de K^+ y Na^+

En general, en el ciclo de primavera, las plantas fertilizadas con vermicompost presentan las mayores concentraciones en savia de los principales macronutrientes, comparadas con las plantas de los tratamientos que emplean otras fuentes orgánicas.

En el ciclo de otoño, las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- y H_2PO_4^- mostraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, con niveles de K^+ mayores significativamente en el tratamiento de Com, seguido del tratamiento Est y Veg. La concentración de NO_3^- y H_2PO_4^- en savia fue mayor significativamente en los tratamientos con vermicompost y compost.

En general, en ambos ciclos de cultivo, se observa una mayor concentración de Mg^{2+} y H_2PO_4^- en las plantas del tratamiento Vco. El vermicompost mejora la disponibilidad de nutrientes gracias a la mejora de la actividad de los microorganismos en el suelo en los que se aplica este material (Mejía-Guerra, 2022; Ruiz & Salas, 2022). Consecuentemente, según Lazcano et al. (2009), el uso de vermicompost y compost aumentan de forma significativa la biomasa radical y área foliar de las plantas de tomate.

En el ciclo de primavera, el consumo hídrico ha sido mayor estadísticamente en las plantas fertilizadas con compost, mientras que no se han registrado diferencias en el ciclo de otoño con los cambios de materiales orgánicos empleados como enmienda.

En el ciclo de primavera, todas las plantas fertilizadas con derivados de restos vegetales (Veg, Com, Vcom) consiguieron producciones comparables a las obtenidas en el tratamiento FerMin. Solo el tratamiento Est obtuvo una producción menor en comparación con la fertilización mineral. En el ciclo de otoño, al igual que en el ciclo de primavera, el tratamiento Est fue el que presentó niveles de producción menores, seguido por Veg que obtuvo rendimientos menores al control FerMin. Los tratamientos Com y Vco registraron producciones estadísticamente significativas comparables con el tratamiento FertMin. Los resultados de producción de los dos ciclos de cultivo analizados fueron publicados en el estudio Carricondo et al. (2022).

Según los resultados, el análisis de savia es una herramienta que permite apreciar las diferencias en las características de los materiales orgánicos empleados como enmienda, manifestando las deficiencias en determinados nutrientes como el P que son aportados en cantidades insuficientes en alguno de los materiales orgánicos empleados en el ensayo.

Tabla 5.6. Concentración de iones en savia de iones y consumo hídrico de un cultivo de tomate en invernadero en función del ciclo de cultivo y el tipo de fuente y forma de aplicación de nutrientes. FerMin (fertirrigación solución mineral); Com (compost); Vco (vermicompost); Est (estiércol); Veg (residuos vegetales).

Factores de variación	Ca (ppm)	Cl (ppm)	K (ppm)	Na (ppm)	NH4 (ppm)	NO3 (ppm)	Mg (ppm)	HPO4 (ppm)	Consumo hídrico (L m ⁻²)
PRIMAVERA	<0,05	ns	ns	<0,05	ns	ns	ns	<0,05	<0,05
MINERAL (FerMin)	488,08 A	4204,97	3712,23	459,15 B	206,80	1518,2	1151,22	605,58 B	5,60 B
ORGANICO	767,32 B	3856,68	3481,52	312,15 A	212,88	1385,26	1153,92	492,54 A	5,02 A
TIPO DE ENMIENDA ORG. PRIMAVERA	ns	ns	<0,05	<0,05	ns	ns	<0,05	<0,05	<0,05
Est	655,44	3829,61	3025,15 a	328,90 b	207,96	1353,09	1154,2 a	447,66 a	4,92 a
Veg	875,97	3602,21	3562,23 bc	317,92 b	215,13	1299,18	1116,93 a	481,93 a	4,82 a
Com	638,34	3852,99	3405,27 ab	258,09 a	219,36	1455,09	907,07 a	481,37 a	5,52 b
Vco	899,51	4141,90	3933,14 c	347,93 b	209,08	1438,50	1463,20 b	559,19 b	4,83 a
FERTILIZACION OTOÑO	<0,05	<0,05	ns	ns	ns	ns	ns	<0,05	ns
MINERAL (FerMin)	518,60 A	3781,22 A	4061,33	332,25	178,37	1806,88	1045,61	680,11 B	2,22
ORGANICO	813,04 B	4558,01 B	4393,49	322,26	175,29	1883,59	1339,83	512,15 A	2,22
TIPO DE ENMIENDA ORG. OTOÑO	<0,05	ns	<0,05	ns	ns	<0,05	ns	<0,05	ns
Est	862,26 ab	4612,60	4530,4 ab	335,46	178,83	1752,17 a	1491,04	507,17 ab	2,23
Veg	816,60 ab	4587,12	4463,1 ab	299,87	171,93	1705,92 a	1260,01	449,58 a	2,68
Com	985,07 b	4599,90	4737,55 c	283,17	173,17	2210,71 b	1272,34	514,58 ab	2,23
Vco	588,22 a	4362,41	4165,7 a	325,27	175,42	1795,67 ab	1491,04	560,53 b	2,29

5.3.3. En función del estado fenológico del cultivo en el momento de la toma de muestra de savia.

Según diferentes estudios, las concentraciones de elementos en savia varían según el momento de la toma de la muestra, el estadio fenológico del cultivo, las condiciones ambientales en el momento del muestreo, al aporte de nutrientes antes del muestreo, etc. (Llanderal et al., 2020, Cadahía, 2008).

En la figura 5.1 se resaltan las concentraciones de los elementos en diferentes muestreos a lo largo del cultivo. Las concentraciones de H_2PO_4^- quedan siempre más altas en el tratamiento mineral independientemente del día desde el trasplante en el que se tome la muestra de peciolo (edad del cultivo) y ciclo de cultivo. En el ciclo de primavera, la concentración en P en las plantas del FerMin es estadísticamente igual a la medida en la savia de las plantas del tratamiento con vermicompost. Sin embargo, en el ciclo de otoño, la concentración en P en el tratamiento FerMin es estadísticamente mayor en todos los muestreos y con respecto a todos los tratamientos. Las plantas del tratamiento con Vermicompost como fuente de nutriente presenta las mayores concentraciones de H_2PO_4^- en savia de todos los tratamientos orgánicos y muy similar a las plantas del tratamiento mineral.

En la concentración de Ca^{2+} en savia, ocurre justo al contrario que en el fósforo, la concentración es siempre menor estadísticamente en el tratamiento FerMin en comparación al resto de los tratamientos con fuentes orgánicas de nutrientes en el ciclo de primavera, y en casi todos los muestreos en el ciclo de otoño.

La concentración de Na^+ en savia presenta un comportamiento otra vez diferenciado entre el tratamiento de fertirrigación con solución nutritiva mineral y los tratamientos que emplean fuentes orgánicas de nutrientes. En primavera en todos los muestreos la concentración de Na^+ en savia en el FerMin es mayor significativamente y en primavera prácticamente en todos los muestreos, al compararlo con los tratamientos orgánicos.

Según los resultados, la concentración de H_2PO_4^- , Ca^{2+} y Na^+ en extracto celular de peciolo se diferencia estadísticamente según se fertirrigue con solución nutritiva mineral o con fuente orgánica, y dentro de esta última se aprecian mejores valores (mayor de H_2PO_4^- , y menor de Na^+) cuando el vermicompost es la fuente de nutrientes.

Según los resultados con respecto de los muestreos en diferentes momentos del cultivo y cambios en la fuente empleada como nutrientes podemos diferenciar el estado nutricional mediante la concentración de H_2PO_4^- , Ca^{2+} y Na^+ en el extracto celular de peciolo (figura 5.1).

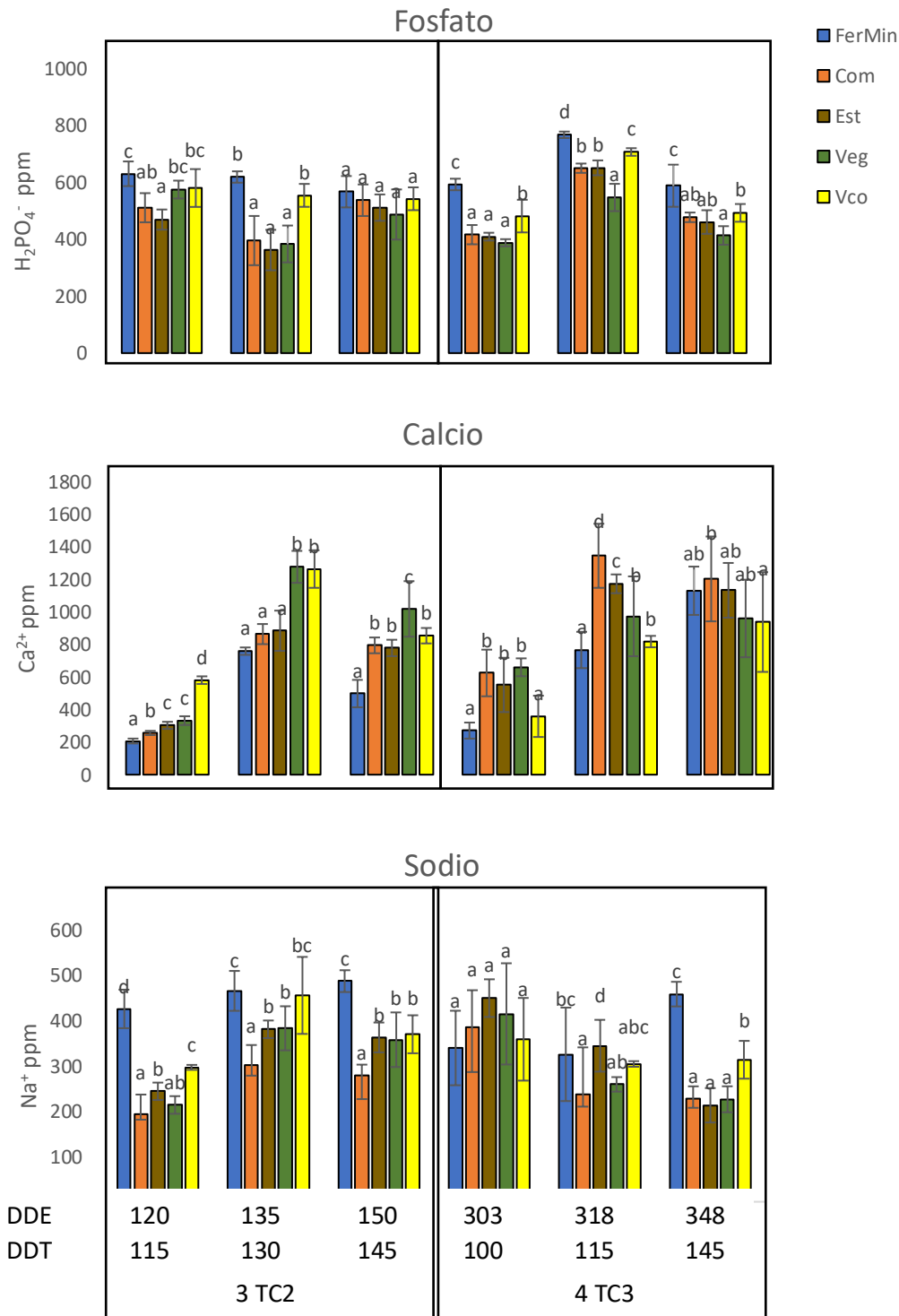


Figura 5.1. Concentración de $H_2PO_4^-$, Ca^{2+} y Na^+ en savia según día de muestreo. DDE: días después del enmienda y DDT: días después del trasplante. FerMin (fertirrigación solución mineral); Com (compost); Vco (vermicompost); Est (estiércol); Veg (residuos vegetales). Cultivo de tomate en el ciclo de primavera (3 TC2) y otoño (4 TC3).

5.3.4. Análisis de componentes.

Con el fin de analizar la influencia de cada factor en la variabilidad total de los tratamientos incluidos en el ensayo, y observar la relación entre el estado nutricional de las plantas, el tipo de fertilización y la producción se realizó un análisis de componentes (PCA) según el ciclo de cultivo (primavera-TC2 y otoño-TC3). La figura 5.2. muestra la influencia de cada factor sobre la variabilidad total del parámetro en el ciclo de primavera y de otoño.

En primavera, con respecto al componente 1, NO_3^- , H_2PO_4^- , Cl^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} se encuentran agrupados, demostrando una correlación entre ellos. De la misma forma se observan sinergias entre el consumo hídrico y la producción. El tratamiento mineral (FerMin) y el tratamiento con vermicompost (Vco) están alineados con la concentración en savia de los principales macronutrientes, NO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ y Mg^{2+} , y Cl^- , y Na^+ . La cercanía de estos dos tratamientos se debe a que el vermicompost es el material con mayor estado de maduración y/o mineralización en comparación con los demás materiales orgánicos empleados en el ensayo, los que le permite tener mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas.

En el cultivo de tomate del ciclo de primavera (TC2), el consumo hídrico y la producción están fuertemente asociados, como consecuencias del mayor consumo hídrico generado por la elevada demanda climática en este periodo. El tratamiento FerMin está alineado claramente con el consumo hídrico y la producción, así como con los niveles en savia de NO_3^- .

Igualmente, con respecto al componente 1, el tratamiento Vco (vermicompost) y FerMin (mineral) está asociado con la producción. El tratamiento con compost también se encuentra relacionado con la producción con respecto al componente 2. Los tratamientos estiércol y restos vegetales, aparecen en el cuadrante opuesto en comparación a producción y los principales elementos nutricionales. El menor contenido en elementos nutritivos del estiércol así como la falta de mineralización de los restos vegetales se manifiesta con la menor concentración en los principales macronutrientes.

En el ciclo de otoño (TC3), el H_2PO_4^- sigue siendo el factor que mayormente influye sobre un componente (componente 2). El tratamiento mineral y el vermicompost vuelven a mostrar comportamientos similares y en línea a los descrito para el ciclo de primavera. El vermicompost es el tratamiento en el que tuvieron mayor influencia la concentración en savia de Na^+ y NH_4^+ . Mientras que, como se observó en primavera, la concentración en savia de H_2PO_4^- está asociado mas al tratamiento mineral.

En el ciclo de primavera, según los resultados y el análisis de la PCA, los niveles en savia de NO_3^- y H_2PO_4^- son determinantes para la producción, y según los análisis la aplicación de vermicompost de restos vegetales hortícolas como enmienda al suelo permiten alcanzar concentraciones en savia similares al cuantificado en las plantas con fertirrigación mineral. De igual manera el Na y Cl tiene una marcada relación con la producción y consumo hídrico. Las enmiendas con los restos vegetales enterradas directamente al final del cultivo y estiércol no consiguen niveles en savia suficientes para alcanzar la producción esperada según la fertirrigación tradicional.

Sin embargo, en el ciclo de otoño es el H_2PO_4^- y el NH_4^+ como elementos nutritivos junto al Na^+ y Cl^- , los que presentan una relación con la producción y el consumo hídrico. Y vuelve a observarse la capacidad del vermicompost de conseguir los niveles de iones en savia que le permiten

alcanzar producciones similares a las plantas con fertirrigación tradicional.

Según los resultados de la PCA, en los dos ciclos de cultivo, el tratamiento mineral y el vermicompost aparecen asociados al consumo hídrico y la producción a la concentración NO_3^- y H_2PO_4^- en savia como principales macronutrientes y a la concentración Na^+ y Cl^- en savia: Ambos tratamientos, FerMin y Vcom, opuestos a la concentración de Ca^{2+} en savia, justificado porque a ningún tratamiento incluido el tratamiento mineral no se le aportó Ca^{2+} a través de fertilizantes externos, por eso las baja concentraciones en savia.

En general como cabía esperar según los resultados el H_2PO_4^- se convierte en un elemento determinante para los cultivos cuando fertilizamos con enmiendas orgánicas como el compost, restos vegetales enterrados y estiércol. Lo que obliga a tener que seleccionar las fuentes de nutrientes orgánicas por sus características físico, químicas y biológicas que nos permitan eliminar la fertirrigación mineral de los cultivos, con un control sobre la capacidad de mejorar los niveles en suelo y consecuentemente en savia.

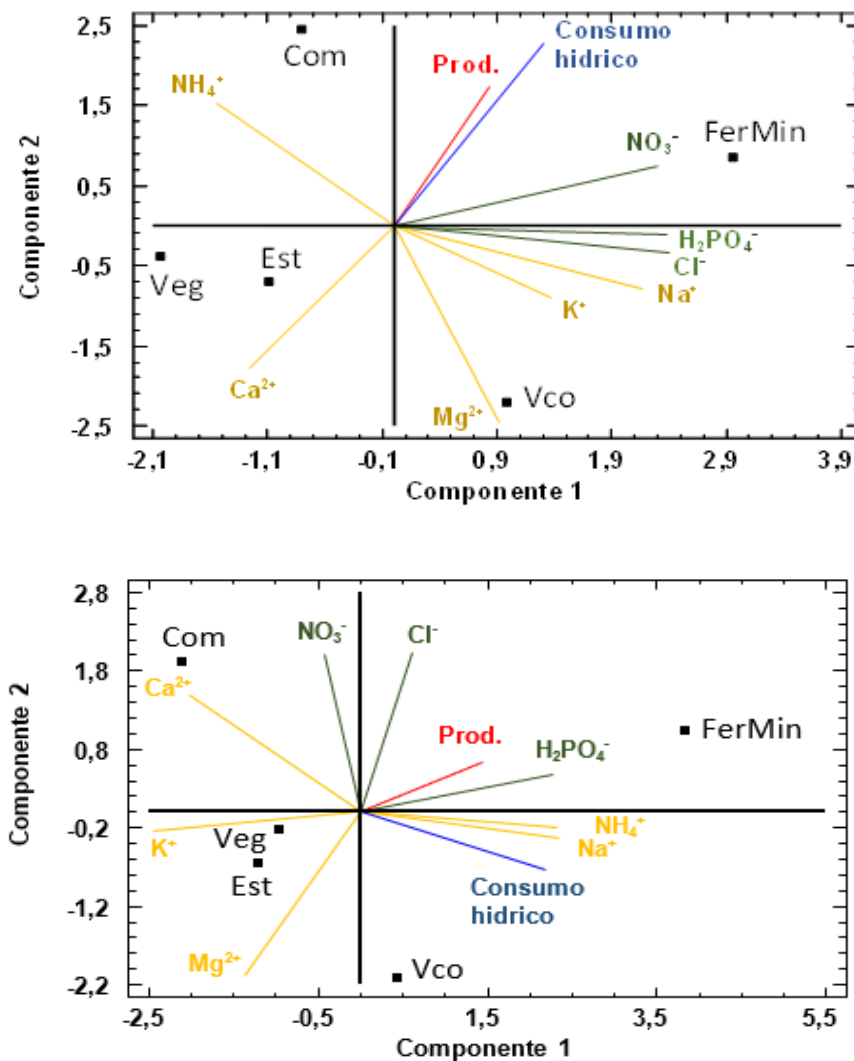


Figura 5.2. Análisis de Componentes Principales. Arriba: Ciclo primavera (3 TC2) y Abajo: Ciclo otoño (4 TC3).

5.4. Conclusiones.

La concentración de H_2PO_4^- , Ca^{2+} y Na^+ en extracto celular de peciolo se diferencia estadísticamente según se fertilice con solución nutritiva mineral o con fuente orgánica, y dentro de esta última se aprecian mejores valores (mayor de P y menor de Na) cuando el vermicompost es empleado como fuente de nutrientes. El análisis de savia manifiesta las deficiencias en determinados nutrientes como el P que son aportados en cantidades insuficientes en algunos materiales orgánicos como el estiércol empleado en el ensayo. Consecuentemente, el análisis de savia es una herramienta que permite apreciar las diferencias en las características de los materiales empleados como fuente de nutriente.

Según los resultados que relacionan la producción con el estado nutricional, según los análisis en savia, el H_2PO_4^- se convierte en un elemento limitante para los cultivos cuando fertilizamos con enmiendas orgánicas como el compost, restos vegetales de cultivo enterrados y estiércol. Lo que obliga a tener que seleccionar las fuentes de nutrientes orgánicas por sus características físico, químicas y biológicas que nos permitan eliminar la fertirrigación mineral de los cultivos, con un control sobre la capacidad de mejorar los niveles en suelo y consecuentemente en savia.

Se demuestra la capacidad como enmienda orgánica del vermicompost de restos vegetales de cultivos hortícolas de invernadero para conseguir las concentraciones de iones en savia suficientes que le permiten alcanzar producciones similares a las plantas fertirrigadas con fertilizantes minerales.

Bibliografía.

- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco-Muñoz, J. F., García-Arca, D., & López-Felices, B. (2020). Identification of opportunities for applying the circular economy to intensive agriculture in Almería (South-East Spain). *Agronomy*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy10101499>
- Cadahía, C. (2008). Fertirrigación. La savia como índice de fertirrigación en cultivos agroenergéticos, hortícolas, frutales y ornamentales.
- Cajamar. (2016). Plant waste from greenhouses in Almeria.
- Carricondo-Martínez, I., Falcone, D., Berti, F., Orsini, F., Del, M., & Salas-Sanjuan, M. C. (2022). Use of Agro-Waste as a Source of Crop Nutrients in Intensive Horticulture System. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020447>
- Carricondo-Martínez, I.; Berti, F.; Salas-Sanjuán, M.C. Different Organic Fertilization Systems Modify Tomato Quality: An Opportunity for Circular Fertilization in Intensive Horticulture. *Agronomy* 2022, 12, 174. [CrossRef]
- Castillo-Díaz, F. J., Marín-Guirao, J. I., Belmonte-Ureña, L. J., & Tello-Marquina, J. C. (2021). Effect of repeated plant debris reutilization as organic amendment on greenhouse soil fertility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph18211154>.
- Hochmuth, G. J. (1994). Efficiency Ranges for Nitrate-Nitrogen and Potassium for Vegetable Petiole Sap Quick Tests (Vol. 4, Issue 3).
- Leyva Ruelas, G., Sánchez García, P., Alcántar González, G., Valenzuela Ureta, J. G., Francisco, G. R., & Angel, M. G. (2005). Contenido de nitratos en extractos celulares de pecíolos y frutos de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2), 145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028208>Cómicitar el artículo Número completo Más información del artículo
- Llenderal, A., García-Caparrós, P., Pérez-Alonso, J., Contreras, J. I., Segura, M. L., Reca, J., & Lao, M. T. (2020). Approach to Petiole Sap Nutritional Diagnosis Method by Empirical Model Based on Climatic and Growth Parameters. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 188, 10(2), 188. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10020188>
- Mejía Guerra, P., Salas Sanjuan, M. C., & López, M. J. (2018). Evaluation of physicochemical properties and enzymatic activity of organic substrates during four crop cycles in soilless containers. *Food Science and Nutrition*, 6, 2066–2078.
- Mejía-Guerra, P. A. (2022). Valoración del uso combinado de mezclas de materiales orgánicos y biofertilización con microorganismos en cultivo sin suelo.
- Mona, S., Malyan, S. K., Saini, N., Deepak, B., Pugazhendhi, A., & Kumar, S. S. (2021). Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar. *Chemosphere*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>
- Pardossi A.; Incrocci L.; Salas M.C., Gianquinto, G. Managing mineral nutrition in soilless culture. *Rooftop urban agriculture* 2017.

- Phooi, C. L., Azman, E. A., & Ismail, R. (2022). Do it Yourself: Humic Acid. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 45(3), 547–564. <https://doi.org/10.47836/pjtas.45.3.01>
- Rodríguez, A., Peña-Fleitas, M.T., Padilla, F.M., Gallardo, M., Thompson, R.B. 2021. Petiole sap nitrate concentration to assess crop nitrogen status of greenhouse sweet pepper. *Scientia Horticulturae* 285: 110157.
- Ruiz, J. L., & Salas Sanjuan, M. D. C. (2022). The use of plant growth promoting bacteria for biofertiligation; effects on concentrations of nutrients in inoculated aqueous vermicompost extract and on the yield and quality of tomatoes. *Biological Agriculture and Horticulture*. <https://doi.org/10.1080/01448765.2021.2010596>
- Ruiz, J. L., & Salas-Sanjuan M. C. (2019). Evaluation of organic substrates and microorganisms as bio-fertilisation tool in container crop production. *Agronomy*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy9110705>
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- Shen, W., Hu, M., Qian, D., Xue, H., Gao, N., & Lin, X. (2021). Microbial deterioration and restoration in greenhouse-based intensive vegetable production systems. *Plant Soil*, 463, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04933-w>
- Tolón Becerra, A., & Lastra Bravo, X. (2010). LA AGRICULTURA INTENSIVA DEL PONIENTE ALMERIENSE Diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental.
- Thompson R., Gallardo, M., Valdez L., Fernandez M. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetables crops using soil moisture sensors. *Agricultural water management*, 2007, 141-158.

CAPÍTULO 6. DIFERENTES SISTEMAS DE FERTILIZACIÓN ORGÁNICA MODIFICAN LA CALIDAD DEL TOMATE: UNA OPORTUNIDAD PARA LA FERTILIZACIÓN CIRCULAR EN HORTICULTURA INTENSIVA.



Fotografía 6.1. Detalle del proceso de incorporación de los materiales orgánicos empleados como enmienda, cultivo de tomate, lixímetros y goteros de control empleados para el muestreo de lixiviados y riego durante el cultivo, producción de tomate medidas de calidad.

Resumen

La valorización de los residuos vegetales como fuente de nutrientes para los cultivos constituye una estrategia circular para mejorar la sostenibilidad de los sistemas intensivos de producción hortícola. El objetivo principal de este estudio fue evaluar los efectos de las enmiendas orgánicas derivadas de residuos vegetales sobre el rendimiento y la calidad del tomate. Se realizaron los siguientes tratamientos de fertilización: residuos vegetales frescos (4 kg m^{-1}), compost (3 kg m^{-1}), y vermicompost en dos dosis diferentes (3 y 9 kg m^{-1}), todos ellos derivados del cultivo de tomate anterior, un tratamiento orgánico con estiércol de cabra (3 kg m^{-1}), y un tratamiento de fertirrigación mineral de control. El mayor rendimiento se obtuvo con el manejo convencional de fertirrigación mineral y con las enmiendas con vermicompost a dos dosis diferentes (3 y 9 kg m^{-1}), sin diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Los tratamientos orgánicos con residuos de cultivos frescos, compost de restos hortícolas y estiércol de cabra resultaron con un menor rendimiento con diferencias estadísticas con respecto a la fertilización mineral y al vermicompost de restos hortícolas. En cuanto a los parámetros de calidad, el contenido de licopeno fue mayor en el tratamiento de fertilización mineral y vermicompost a 3 kg m^{-1} , mientras que el resto de los antioxidantes evaluados fueron más concentrados en tomates fertilizados con vermicompost a 9 kg m^{-1} y estiércol de cabra. El manejo de la nutrición de las plantas con enmienda con vermicompost es la mejor solución circular, ya que permite reintegrar al suelo los residuos generados en el cultivo anterior, obteniendo un rendimiento igual al de las plantas con el manejo de insumos químicos, sumado a frutos de tomate con alta calidad nutricional.

Artículo publicado: Carricondo-Martínez, I.; Berti, F.; Salas-Sanjuán, MdC Fertilización Orgánica Diferente Los sistemas modifican la calidad del tomate: un Oportunidad para Circular Fecundación en Intensivo Horticultura. *Agronomía* 2022, 12, 174. <https://doi.org/10.3390/agronomía12010174>

6.1. Introducción.

El modelo actual de agricultura intensiva se basa en un enfoque lineal de “extraer-usar-consumir- desechar” [1], caracterizado por un alto consumo de recursos externos [2]. En Almería (SE de España), la región con mayor concentración de invernaderos del mundo, cada año se generan mas de 2 mill. de toneladas de residuos orgánicos del sector hortofrutícola [1]. Los residuos vegetales pueden ser considerados como un problema, ya que su manejo inadecuado genera grandes problemas ambientales y de salud humana [1,3], pero también como una gran oportunidad. El reciclaje y la reutilización de residuos orgánicos constituyen una estrategia circular imprescindible para mejorar la sostenibilidad de los sistemas intensivos de producción [3,4].

En los sistemas hortícolas intensivos, la fertilización convencional se basa en productos minerales. Los fertilizantes minerales mejoran la productividad de los cultivos ya que garantizan la rápida reposición de nutrientes [5], pero su uso a largo plazo y el uso excesivo deterioran la fertilidad del suelo y la población microbiana del suelo [6], aumentan la erosión y acidificación del suelo [7] y conducen a la contaminación de las aguas subterráneas [1]. Además, la producción y el transporte de fertilizantes químicos contribuyen a las emisiones de CO₂ [8]. La adición de estiércol derivado de animales al comienzo del ciclo de cultivo también es una práctica común (figura 6.1).

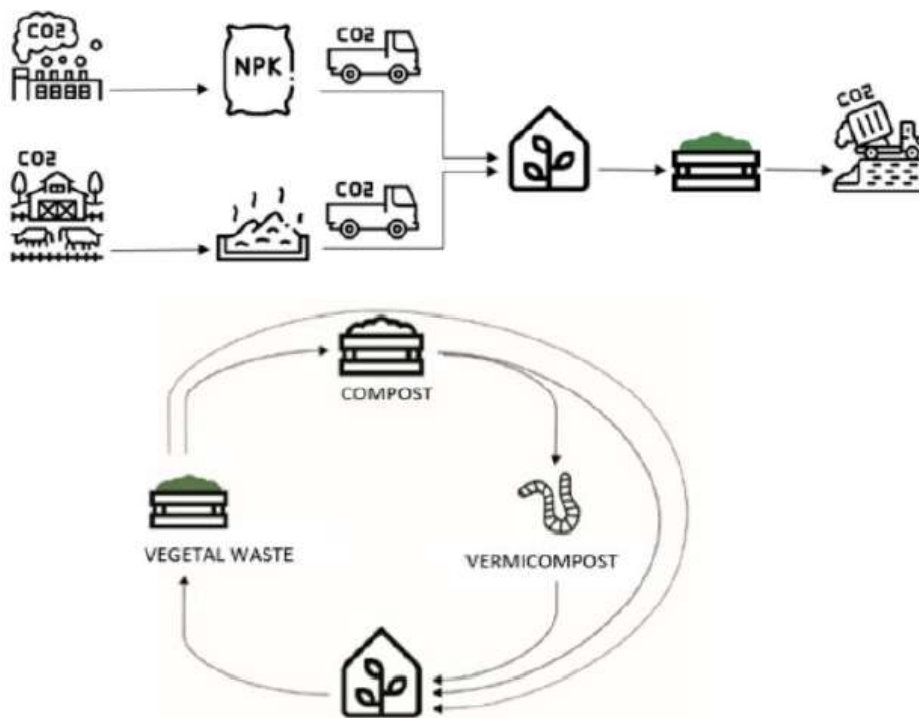


Figura 6.1. Fertilización convencional y gestión de residuos (arriba) y fertilización circular y gestión de residuos (abajo).

El uso de residuos vegetales generados dentro del mismo sitio de producción como fuente de nutrientes del cultivo debe ser considerado como una ventaja para el agricultor, ya que permite reducir el uso de fertilizantes externos [4,9], al tiempo que disminuye los costos de transporte y manejo de residuos. Además, la fertilización orgánica tiene un papel fundamental en la mejora de

la estructura y la fertilidad del suelo [10], mejorando sus propiedades químicas, físicas y biológicas del [11] y aumentando la captura de CO₂ en el suelo [12]. Los residuos vegetales pueden incorporarse al suelo directamente como residuos frescos, pero considerando la alta cantidad de residuos generados por cada ciclo de cultivo, se deben considerar procesos de compostaje o vermicompostaje para mejorar las características nutricionales de la materia orgánica y estabilizar la biomasa (figura 6.1).

Hoy en día, los consumidores son más concienciados sobre las prácticas de producción sostenibles para el medioambiente y la seguridad alimentaria, y los productos orgánicos se perciben como más saludables y nutritivos que los convencionales [13–15]. Algunos autores informaron cultivos de mayor calidad nutricional cuando se aplicaron fertilizantes orgánicos [4,12,16], mientras que otros no encontraron efectos sobre la calidad en los cultivos orgánicos [17].

El tomate, debido a sus beneficios para la salud, es uno de los cultivos hortícolas más importantes del mundo [18], siendo una importante fuente de nutrientes y antioxidantes como carotenoides, ácido ascórbico y polifenoles [19,20]. Bilalis et al. [21], en un experimento en campo abierto, obtuvieron el mayor contenido de licopeno en tomates fertilizados con compost de algas (2000 kg ha⁻¹) en comparación con tomates manejados con fertilizante inorgánico. Esto se atribuyó a la mayor disponibilidad de nitrógeno en el manejo de la fertilización inorgánica, que aumenta el área foliar y la sombra, reduciendo así la radiación solar, indispensable para la síntesis de licopeno.

Wang et al. [22], evaluando cuatro tratamientos de fertilización (sin fertilizante, urea, compost de gallinaza y vermicompost) en suelos con diferentes años de cultivo continuo (0, 5, 20 años), encontraron que la vermicompost mejoró la calidad del tomate. Sin embargo, se han realizado pocos estudios para evaluar los efectos de los residuos vegetales producidos en el mismo campo como fuente de nutrientes para los cultivos.

En este contexto, se planteó la hipótesis de que: (1) los residuos vegetales generados dentro de la misma finca pueden ser utilizados como fertilizante para cultivos de tomate, reemplazando la fertirrigación mineral estándar; (2) el uso de fertilizantes orgánicos podría igualar el rendimiento obtenido con fertilizantes minerales; y (3) el uso de fertilizantes orgánicos podría mejorar la calidad nutricional del fruto de tomate.

El objetivo del estudio fue evaluar los efectos de diferentes enmiendas derivadas de desechos vegetales, residuos vegetales frescos, compostados y vermicompostados (en dos dosis diferentes), (i) sobre el rendimiento del cultivo de tomate, (ii) y sobre las propiedades químicas y físicas del fruto de tomate.

6.2. Materiales y métodos.

6.2.1. Diseño del experimento.

El experimento se llevó a cabo en un sistema de cultivo continuo dentro de un invernadero de 1200 m² ubicado en Níjar (Almería, España), entre agosto de 2019 y enero de 2020. El invernadero era un “invernadero tipo Almería” (Raspa y Amagado) con control climático pasivo con ventanas cenitales.

Tomates (*Solanum lycopersicum* L.) cv. 'Surcal' (Naturesur SCA), injertadas sobre portainjertos Beaufort (Monsanto), fueron trasplantadas el 22 de agosto de 2019, en un área de 650 m², con una densidad de 0,66 plantas m⁻², estacadas y creciendo a dos tallos. La polinización fue realizada por abejorros. El control de plagas se realizó siguiendo los estándares de producción integrada. Antes del experimento, el invernadero había sido previamente cultivado con 5 ciclos de tomates durante 3 años. Las parcelas orgánicas se fertilizaron siempre con el mismo plan del estudio presentado. Las enmiendas se aplicaron a las parcelas orgánicas en febrero de 2017, febrero de 2018 antes del trasplante y la última aplicación se realizó en agosto de 2019 antes de iniciar el ciclo de cultivo examinado en este experimento (figura 6.2). Las propiedades químicas básicas del suelo se presentan en la tabla 6.1.

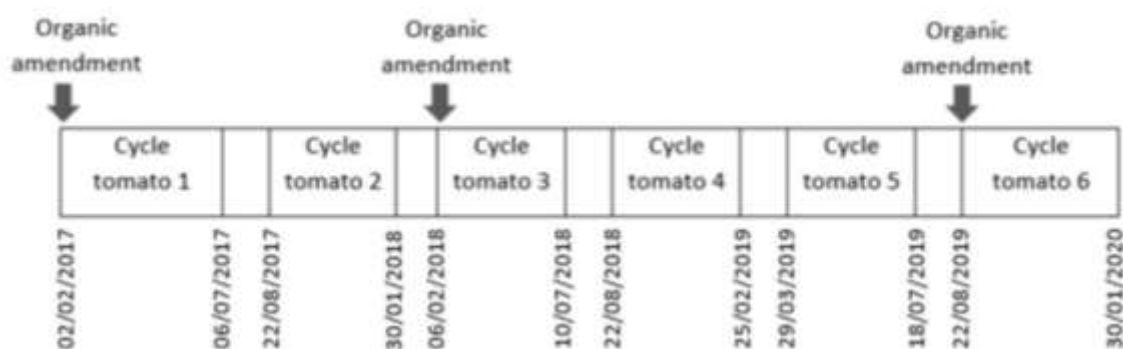


Figura 6.2. Historia de la parcela orgánica desde el ciclo 1 hasta el ciclo 6.

Se ensayaron los siguientes tratamientos de fertilización: residuos vegetales de cosecha anterior de tomate aplicados a razón de 4 kg m⁻¹ lineal (CR), residuos orgánicos compostados de cosecha anterior aplicados a razón de 3 kg m⁻¹ lineal (CO), vermicompostados de residuos orgánicos de cosecha anterior aplicado a 3 kg m⁻¹ lineal (V3) y a 9 kg m⁻¹ lineal (V9), estiércol de cabra aplicado a 3 kg m⁻¹ lineal (GM) y tratamiento de fertilización inorgánica (IF) como control.

Tabla 6.1. Propiedades fisicoquímicas del suelo original al inicio del experimento

pH	C.E.	M.O.	N Kjeldahl	C/N	N-NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻	K [*]	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Arena	Limo	Arcilla
8.3	2360	0.93	0.07	7.7	47.0	120	1000	5160	973	566	53.5	12.4	34.1

pH (volumen suelo-agua 1:2.5); CE (Conductividad Eléctrica, $\mu\text{S cm}^{-1}$); M.O. (Materia orgánica, % materia seca (ms)); N Kjeldahl (Nitrogeno Kjeldahl, % ms); N-NO₃⁻ (Nitrogeno, mg L⁻¹); PO₄²⁻ (Fosfato, mg L⁻¹); K^{*} (Potasio, mg L⁻¹); Ca²⁺ (Calcio, mg L⁻¹); Mg²⁺ (Magnesio, mg L⁻¹); Na⁺ (Sodio, mg L⁻¹); Arena (%); Limo (%); Arcilla (%).

El compost derivado de la degradación aeróbica de residuos vegetales de tomate y el vermicompost derivado de la biooxidación y transformación de residuos vegetales de tomate de la cosecha anterior, mediante la acción combinada de lombrices (*Eisenia fetida*) y microorganismos en condiciones aeróbicas y mesófilas fueron producidos por TECOMSA SL. El estiércol usado fue obtenido de la fermentación aeróbica de excrementos de cabra. La enmienda verde estaba hecha de residuos vegetales de la cosecha anterior de tomate, picados en trozos de 2 cm. Las enmiendas orgánicas se incorporaron y mezclaron en el suelo de las parcelas orgánicas antes del trasplante, y no se añadieron fertilizantes químicos. Las enmiendas fueron aplicadas tomando como referencia la práctica agrícola común en la horticultura almeriense. El estiércol de cabra se aplica comúnmente a 3 kg m⁻¹ antes del trasplante. El Compost y el vermicompost fueron aplicados a 3 kg m⁻¹

considerando la concentración de N total similar al estiércol de cabra. Todos los restos vegetales frescos generados en el ciclo de cultivo anterior fueron incorporados en el suelo, resultando en 4 kg m⁻¹. Se probó una dosis más alta de vermicompost, 9 kg m⁻¹, para evaluar la posible mejora del cultivo del tomate. Las características de las enmiendas orgánicas se presentan en la tabla 6.2.

Table 6.2. Propiedades fisicoquímicas de los materiales utilizados como enmienda: GM (estiércol de cabra); CR (cultivo residuos); CO (compost); V (vermicompost).

	pH	C.E.	M.O.	N Kjeldahl	C/N	P	K	Ca	Mg
GM	9.6	7.73	30.2	1.35	11	0.53	2.18	3.28	0.91
CR	6.9	10.79	75.5	2.50	15	0.89	3.39	4.34	0.72
CO	8.3	12.30	21.4	1.20	8.9	0.67	2.84	8.00	1.51
V	8.3	3.39	17.2	1.11	7.7	0.64	0.77	7.80	1.31

pH (volume material/water 1:5); C.E. (Conductividad Electrica, dS m⁻¹); M.O. (Materia organica, % materia seca (ms)); N Kjeldahl (Nitrogeno Kjeldahl, % ms); P (Phosphoro; % ms); K (potasio, % ms); Ca (Calcio, % ms); Mg (Magnesio, % ms).

El tratamiento testigo no recibió ninguna enmienda orgánica y fue fertirrigado con una solución mineral nutritiva (mmol L⁻¹): NO₃⁻ 12,93, NH₄ 1,54, H₂PO₄ 0,89, K⁺ 3,60, Ca²⁺ 1,80, Mg²⁺ 1,60, Na⁺ 13,21, Cl⁻ 11,55 y se ajustó el pH con ácido nítrico.

Se colocó un lisímetro (3 m × 0,50 m) por tratamiento en un ángulo de 0,7 m y 0,9 m de profundidad. Cada lisímetro recogía el riego de 6 goteros con un caudal de gotero de 3 L h⁻¹ que se aplicó a tres plantas. El parámetro de decisión utilizado para determinar la frecuencia de riego fue la conductividad eléctrica (C.E.) del drenaje (Aumentó el número de riegos para mantener la C.E. <6,0 dS m⁻¹) y el porcentaje diario de drenaje recogido en relación con el gotero control (10-15%).

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos y cuatro réplicas con cuatro plantas cada uno.

6.2.2. Muestreo y análisis.

a. Rendimiento.

Para registrar el rendimiento, los frutos fueron cosechados, contados y pesados con una balanza eléctrica con auto calibrado. La cosecha comenzó a los 88 días después del trasplante (DDT) y finalizó a los 159 DDT, para un total de siete cosechas.

b. Análisis físico de frutas.

Para cada cosecha, se seleccionaron dos frutos por repetición en la etapa de maduración adecuada y se analizaron los sólidos solubles, humedad y color. Luego, fueron homogenizados para

análisis químico [23]. Los sólidos solubles totales (SST) se midieron con un refractómetro manual (Atago model Digital PAL-1, ATAGO CO., LTD., Tokio, Japón), con una escala de 0 a 35 °Brix y 0,2 de precisión.

Antes de realizar los análisis, las muestras se lavaron, en primer lugar con agua corriente y luego con agua destilada, y se evaporó la humedad residual a temperatura ambiente [19].

c. Evaluación del color de las frutas.

Las mediciones de color de las muestras de tomate se realizaron como se describió anteriormente [23], utilizando un colorímetro (Espectrofotómetro CMY3500D; Konika Minolta, Madrid, España). Las coordenadas de color L* (luminosidad: 0, negro a 100, blanco), a* (variación de verde a rojo: -60 a 60), b* (variación de azul a amarillo: -60 a 60) (sistema CIELAB). Cada registro tuvo un promedio de tres mediciones en cada muestra de tomate. Se tomó una medida en la región ecuatorial y las otras dos en la zona distal del pericarpio [23].

Los atributos cromáticos (C), índice de color (CI) y relación a*/b* se calcularon a partir de las coordenadas CIELAB, según las siguientes ecuaciones:

$$C = (a^*2 + b^*2)^{1/2} \quad (1)$$

$$IC = 100 a^*/(L^*b^*) \quad (2)$$

d. Parámetros químicos de las frutas.

La humedad se determinó secando una muestra representativa de 2 g en un horno con circulación de aire a 100-105 °C durante 40 h [19].

La extracción y el análisis de los carotenoides (β -caroteno y licopeno) se realizó como se describió anteriormente [19]. La extracción se realizó en acetona, luego se saponificó el extracto [19,23]. El residuo de carotenoide se disolvió en una mezcla de metanol, y luego la solución se filtró y analizó con HPLC- espectrometría de masas, los análisis se realizaron con un Hewlett-Packard HP11100 [19]. Los fenólicos se extrajeron como se describió anteriormente [24], y el análisis UHPLC-Orbitrap-MS se llevó a cabo utilizando un UHPLC-Orbitrap-MS (Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA, EE. UU.) [23,24]. Para la extracción de esteroides y tocoferoles se llevó a cabo la saponificación como se informó previamente [25]. Luego, los esteroides se analizaron con espectrometría de masas HPLC [25], y los tocoferoles se analizaron de acuerdo con Fabrikov et al. [25]. El ácido ascórbico se determinó mediante el procedimiento de titulación de 2,6- diclorofenol-indofenol [26].

e. Características químicas del suelo.

Para realizar el análisis químico de suelo, por cada tratamiento se recolectó una muestra de suelo el día 15/11/2019. Cada muestra de suelo estuvo compuesta por 15 submuestras, recolectadas al azar dentro de las parcelas, a aproximadamente 15 cm de profundidad, cerca de la

zona de raíces. No se realizó análisis estadístico, ya que las submuestras se mezclaron y recolectaron en la misma bolsa de plástico.

El análisis químico del suelo se realizó en un centro certificado (Laboratorio Agroambiental FRAISORO, UNE EN ISO 17025, Gipuzkoa, España). Se siguieron los métodos UNE 77318:2001 y ADAS (Servicio de Asesoramiento y Desarrollo Agrario). El pH del suelo se determinó en suspensiones de agua en una proporción de 1:2,5 (suelo/agua) con un electrodo de vidrio [27]. La conductividad eléctrica (C.E.) se determinó en una suspensión de sulfato de calcio y se midió con un electrodo de vidrio [28]. La materia orgánica (MO) se midió como pérdida equivalente en la incineración en seco a 450 °C y se expresó como porcentaje [28].

La relación C/N se calculó mediante cromatografía de gases y un detector conductividad térmica (PerkinElmer® EA2400). N Kjeldahl se determinó según el método Kjeldahl [29]. El nitrógeno nítrico disponible ($N-NO_3^-$) se extrajo con sulfato de calcio y se determinó con un electrodo. El fósforo disponible en el suelo (PO_4^{2-}) se extrajo con bicarbonato de sodio (Método Olsen) y se determinó mediante cromatografía iónica [27]. Los cationes (calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+) se extrajeron con acetato de amonio y se midieron mediante espectrometría de absorción atómica [27].

f. Análisis estadístico.

Para el análisis estadístico se utilizó el software Statgraphics 18. Se llevó a cabo un análisis de varianza multifactorial (ANOVA) a $p < 0,05$ para comparar los efectos de las diferentes fertilizaciones sobre rendimiento y calidad del tomate. Se realizó también un análisis de componentes principales y una regresión simple para establecer correlaciones entre el análisis químico del suelo, el rendimiento y calidad de los tomates.

6.3. Resultados y discusión.

6.3.1. Rendimiento de tomate.

Los tratamientos tuvieron efectos estadísticamente significativos en el rendimiento de tomate ($kg\ m^{-2}$) (tabla 6.3). El mayor rendimiento medio ($5,00\ kg\ m^{-2}$) se obtuvo en el tratamiento con fertilizantes inorgánicos (IF), seguida de los tratamientos de vermicompost (V3, V9), que no mostraron diferencias significativas. Los tratamientos orgánicos con residuos frescos de cosecha (RC), estiércol de cabra (GM) y los residuos vegetales compostados (CO) mostraron rendimientos significativamente más bajos ($kg\ m^{-2}$) en comparación con el abono inorgánico (FI). Estos resultados están en línea con estudios previos, que reportaron mayores rendimientos de tomate con la aplicación de fertilizantes químicos en comparación con el manejo orgánico [21,30]. El problema principal en el suelo manejado orgánicamente es la liberación lenta de nutrientes, especialmente N, de la materia orgánica, lo que limita las condiciones para el crecimiento de las plantas [4]. Sin embargo, parcelas donde se aplicó vermicompost (V3, V9) no mostró diferencias significativas en los rendimientos en comparación con las parcelas fertilizadas con productos inorgánicos. En línea con los resultados de nuestro estudio, Murmu et al. [31] informó un rendimiento de tomate similar

cuando una dosis completa de fertilizante inorgánico y una dosis completa de vermicompost fue aplicada. Los resultados obtenidos se pueden atribuir a la alta fracción de materia orgánica degradada en el vermicompost, lo que resulta en una mayor disponibilidad de nutrientes en comparación con las otras enmiendas orgánicas. El vermicompost también contiene ácido húmico, que puede mejorar la liberación de cationes y promover el crecimiento de las plantas [31]. Además, el vermicompost puede mejorar la concentración de microorganismos fijadores de N en el suelo, lo que conduce a una alta disponibilidad de N [22]. No se encontraron diferencias significativas en el número de tomates (tabla 6.3).

Tabla 6.3. Efecto sobre el rendimiento de frutos (kg m⁻²) y número de frutos (N m⁻²) en cultivo de tomate fertilizado con fertilizantes inorgánicos (IF), estiércol de cabra a 3 kg m⁻¹ (GM), residuos de cultivos a 4 kg m⁻¹ (CR), compost a 3 kg m⁻¹ (CO), vermicompost a 3 kg m⁻¹(V3) y 9 kg m⁻¹ (V9).

Treatmentos	Producción (kg m ⁻²)	N° frutos (N m ⁻²)
IF (Control)	5.00 a	72.88
GM	4.10 b	66.22
CR	4.14 b	65.12
CO	4.32 b	66.80
V3	4.50 ab	66.50
V9	4.43 ab	68.97
	*	ns

* Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según a la prueba de LSD ($p \leq 0,05$); ns: no significativo.

6.3.2. Calidad del tomate.

a. Propiedades físicas del tomate.

El contenido de sólidos solubles (SS) en los tomates oscila entre 5 y 7 [32]. En este experimento, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (tabla 6.4). Los resultados están de acuerdo con estudios previos que no obtuvieron diferencias en sólidos solubles contenido entre tomates con diferentes tratamientos de fertilización [33]. Ferreira et al. [32] afirmó que las condiciones culturales no afectan el contenido de sólidos solubles en tomate.

Tabla 6.4. Efecto sobre el contenido de sólidos solubles (SS) (°Brix) y colores de frutos (L*, a*, b*, CI, C, a*/b*) en cultivo de tomate fertilizado con fertilizantes inorgánicos (FI), estiércol de cabra a 3 kg m⁻¹ (GM), residuos de cosecha a 4 kg m⁻¹ (CR), compost a 3 kg m⁻¹ (CO) y vermicompost a 3 (V3) y 9 kg m⁻¹ (V9).

	SS (° Brix)	L*	a*	b*	CI (colour index)	C Chroma	Brightness (a/b)
IF	5.68	39.50 b	21.20 a	20.00 d	26.93 a	29.15 b c	1.06 a
GM	5.69	40.40 b	18.20 c	23.80 b	18.91 b	29.96 a b	0.76 c
CR	5.49	42.80 a	16.90 d	21.80 c	18.15 b	27.58 d	0.78 c
CO	5.88	43.30 a	16.50 d	25.80 a	14.75 c	30.63 a	0.64 d
V3	5.64	40.10 b	19.90 b	20.60 d	24.27 a	28.65 c d	0.97 b
V9	5.91	43.90 a	15.50 e	20.50 d	17.26 b c	25.70 e	0.76 c
	ns	*	*	*	*	*	*

* Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos según ing a la prueba de LSD ($p \leq 0,05$); ns: no significativo.

El color del fruto es uno de los parámetros de calidad más importantes del tomate, y se debe a el contenido de carotenoides [34]. L* representa la luminosidad del color del tomate, y valores mayores se observaron en tomates tratados con vermicompost aplicado a 9 kg m^{-1} (V9), compost (CO) y residuos de cultivos (CR). Bilalis et al. [21] informaron valores más altos de L* en frutos de tomate fertilizados con compost en comparación con los frutos de tomate tratados con fertilizantes inorgánicos.

El valor a* indica la intensidad del color rojo, y está relacionado con el contenido de licopeno [35], valores más altos de a* son más deseables en tomates rojos [36]. El valor a* fue significativamente diferente entre los tratamientos. Contrariamente a los resultados de Bilalis et al. [21] y Viskelis et al. [37], en este estudio, el valor más alto de a* se obtuvo con manejo de la fertilización inorgánica, que también fue el tratamiento con mayor concentración de licopeno (tabla 6.5).

Tabla 6.5. Efecto sobre la composición química del fruto en cultivo de tomate fertilizado con fertilizantes inorgánicos (FI), estiércol de cabra (GM), residuos de cultivos (CR), compost (CO) y vermicompost a 3 (V3) y 9 kg m^{-1} (V9).

	Humedad ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$)	β - carotene (mg kg^{-1})	Lycopene (mg kg^{-1})	Total sterols (mg kg^{-1})	Total tocopherols (mg kg^{-1})	Total phenolics (mg kg^{-1})	Acido Ascorbico (mg kg^{-1})
IF	94.6 a	2.4 b	51.4 a	70.5 d	6.3 e	58.5 bc	190.0 b

GM	94.5 a	6.5 a	36.9 b	94.8 a	9.1 a	85.5 a	284.0 a
CR	93.9 a	6.4 a	30.6 c	67.8 e	7.6 abc	55.1 c	107.0 c
CO	94.3 a	7.2 a	35.6 b	73.0 c	7.1 cd	50.8 c	124.0 c
V3	94.8 a	5.7 ab	49.7 a	51.0 f	6.8 de	66.3 b	113.0 c
V9	93.9 a	8.0 a	35.5 b	86.4 b	8.0 b	79.2 a	267.0 a

* Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba LSD ($p \leq 0.05$).

El valor b^* indica el color amarillo de los frutos [38], y fue mayor en los tratamientos con compost (CO) seguido de tratamientos con estiércol (GM) y residuos de cultivos (CR).

En cuanto al índice de color IC, que refleja la apariencia visual de la fruta [39], C, que representa la saturación del color y aumenta durante la maduración de los frutos [35], y brillo (a^*/b^*), los valores más altos se obtuvieron en los tratamientos inorgánicos y vermicompost en las dosis más bajas, a excepción de C, que presentó el mejor resultado en el tratamiento con compost (CO). De manera similar, estudios previos reportaron valores más bajos de a^*/b^* en el orgánico régimen de fertilización [30,40].

b. Propiedades químicas del tomate.

Los resultados del análisis químico se muestran en la tabla 6.5. Varios estudios reportaron que la calidad de la fruta está relacionada con la genética, agronomía y factores ambientales [13,41]. Se ha informado que los tomates ecológicos contienen cantidades más altas de fitoquímicos en comparación con los convencionales [42–44], aunque Ulrichs et al. [45], analizando los parámetros nutricionales, no encontraron diferencias entre los tomates cultivados en condiciones convencionales y orgánicas, y el estudio comparativo de Vélez-Terrerros et al. [17] reportó que no había evidencia de que los tomates orgánicos tuvieran una mayor calidad nutricional.

El contenido de agua en la fruta influye en la textura y el sabor de los tomates [41]. En este experimento, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (tabla 6.5). Sin embargo, diferentes estudios reportaron diferentes niveles de humedad en frutos de tomate dependiendo del tratamiento de fertilización [39,46].

En cuanto al β -caroteno, el nivel más bajo se encontró en el tratamiento IF, sin diferencias significativas con el tratamiento V3. Los tratamientos orgánicos GM, CR, CO y V9 mostraron un contenido de β -caroteno significativamente mayor (tabla 6.6). Este hallazgo está en línea con los resultados de Pertopoulous et al. [39], quienes reportaron un efecto beneficioso en términos de contenido de carotenos en frutos de tomate bajo fertilización orgánica. Caris-Veyrat et al. [47] también encontró una mayor concentración de β -caroteno en los tomates orgánicos en comparación con los tomates cultivados como convencional.

El licopeno constituye alrededor del 80% del total de carotenoides en frutos de tomate rojo [45]. El nivel de licopeno fue mayor en el control (IF) y en el tratamiento de vermicompost a menor dosis (V3). Los tomates recolectados del tratamiento CR tenían el nivel más bajo de licopeno (tabla 5.5). Los resultados concuerdan con el estudio de Abu-Zahra et al. [15], que obtuvieron pimientos

con mayor contenido de licopeno cuando se aplicaron fertilizantes minerales, en comparación a diferentes tratamientos de enmiendas de estiércol animal. Murmu et al. [31] encontró el contenido más alto de licopeno en tomate cuando se aplicó una dosis óptima de fertilizante, ya sea de una fuente mineral u orgánica. No obstante, los resultados son controvertidos. Bilalis et al. [21] obtuvieron tomates con mayor concentración de licopeno cuando se aplicó compost de algas en comparado con tomates fertilizados con productos químicos. Vinha et al. [43], compararon tomates manejados con fertilización orgánica y control biológico de plagas con tomates cultivados convencionalmente, observando que los tomates orgánicos acumularon concentraciones más altas de licopeno, mientras que Borguini et al. [42] no encontraron diferencias significativas entre los tomates orgánicos y convencionales tradicionales en términos de contenido de licopeno.

Los esteroides y los tocoferoles totales constituyen una gran fracción de los de aceites vegetales insaponificables [48], que tienen una importante actividad antioxidante en el tomate. El tratamiento GM seguido del tratamiento V9, exhibió los mejores resultados (tabla 6.5). De manera similar, Petropoulos et al. [39] encontraron el mayor contenido de tocoferoles en tomates fertilizados con estiércol de oveja compostado.

Los fenólicos son compuestos nutricionales importantes en los tomates [17]. El contenido de fenoles totales fue mayor en GM y V9, con los valores más bajos en CR y CO. La cantidad de fenoles encontrados en IF no mostró diferencias significativas con CR y CO. Se reporta que uso limitado de fertilizantes químicos acelera la síntesis de compuestos fenólicos [49]. Diferentes estudios encontraron un mayor nivel de fenoles en tomates orgánicos que en aquellos fertilizados con químicos [42–44,50]. De acuerdo con los resultados anteriores, en este estudio el contenido fenólico depende de la fuente nutricional.

El ácido ascórbico es un poderoso antioxidante y su concentración en la fruta está influenciada principalmente por la genética y las condiciones ambientales [39]. Varios autores han encontrado mayor contenido de ácido ascórbico en tomates orgánicos [44,47,], aunque Vélez-Terrero [17], comparando resultados de diferentes estudios, encontró que la concentración de ácido ascórbico en tomates es similar entre manejo de cultivo orgánico y convencional. Los resultados presentados muestran diferencias en el contenido de ácido ascórbico según el régimen de fertilización. Los resultados más altos y significativos se obtuvieron en los tratamientos orgánicos con estiércol de cabra (GM) y lombricomposta en la concentración más alta (V9). Del mismo modo, Wang et al. [22] obtuvieron un mayor contenido de ácido ascórbico en tomates fertilizados con vermicompost. V3, CR y CO presentaron menor contenido de ácido ascórbico, y IF presentó un resultado intermedio.

6.3.3. Propiedades químicas del suelo.

La tabla 6.6 muestra las propiedades químicas del suelo de diferentes parcelas. El pH y la C.E. del suelo no se vieron afectados por los tratamientos de fertilización, como lo reportó Hernández et al. [11].

Los resultados subrayan que el nitrógeno nítrico ($N-NO_3^-$) fue el más alto en el suelo donde se aplicó fertilizante inorgánico. Esto se debe al continuo aporte de $N-NO_3^-$ con la fertiirrigación. Los resultados están en línea con estudios previos, que informaron un mayor contenido de N total con el manejo de fertilización inorgánica en comparación con el suelo manejado con enmiendas orgánicas [4].

También es claro que la aplicación de compost (CO) permitió aumentar la disponibilidad de fósforo (PO_4^{2-}) en el suelo, que fue un 45% mayor que el suelo fertilizado con minerales (FI). Esto puede atribuirse a la alta actividad de fosfatasa conferida con la aplicación de compost [28]. La materia orgánica del compost o vermicompost aumenta la población microbiana que mejora la solubilidad y mineralización del fósforo [28].

En cuanto a las concentraciones de cationes en la solución de suspensión, el potasio (K^+) mostró diferencias entre tratamientos, con el valor absoluto más alto en las parcelas IF y GM, mientras que la concentración más baja se observó en la parcela del tratamiento CR. Aunque la enmienda derivada de residuos frescos de cosecha (RC) tiene la concentración más alta de K (% dm) (tabla 6.2), las parcelas tratadas con esta enmienda resultaron en la concentración más baja de K^+ en el suelo, probablemente debido a la alta retención de K en el tejido vegetal, no disponible para plantas.

Tabla 6.6. Efectos sobre las propiedades químicas del suelo en cultivos de tomate fertilizados con fertilizantes inorgánicos (FI), estiércol de cabra (GM), residuos de cultivos (CR), compost (CO), vermicompost a 3 (V3) y 9 kg m^{-1} (V9), durante el ciclo de cultivo del tomate (15/11/2019).

	pH	C.E	M.O.	N Kjeldahl	C/ N	N- NO_3^-	PO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	CEC
IF	8.6	2330	0.50	0.05	5.8	26.9	170	1260	5320	1030	771	41.6
GM	8.7	2630	0.42	0.05	4.9	12.9	113	1390	5360	820	965	41.3
CR	8.6	1960	0.58	0.05	6.7	8.8	190	697	5230	1030	506	38.6
CO	8.8	2240	1.04	0.08	7.6	9.9	311	998	5140	1050	735	40.1
V3	8.7	2330	0.63	0.06	6.1	11.0	198	889	5230	972	780	39.8
V9	8.9	2110	0.45	<0.05	6.5	9.8	123	1000	5400	1010	626	40.6

pH (volumen suelo-agua 1:2,5); E.C, (conductividad eléctrica, $\mu\text{S cm}^{-1}$); MO (materia orgánica, % seco materia (dm)); N Kjeldahl (nitrógeno Kjeldahl, % dm); N- NO_3^- (mg L^{-1}); PO_4^{2-} (mg L^{-1}); K^+ (mg L^{-1}); Ca^{2+} (mg L^{-1}); Mg^{2+} (mg L^{-1}); Na^+ (mg L^{-1}); CIC (capacidad de intercambio de cationes, $\text{meq } 100 \text{ mL}^{-1}$). Cada muestra de suelo se compone de 15 submuestras, recolectadas al azar dentro de las parcelas. No se realizó ningún análisis estadístico, ya que las submuestras fueron mezcladas y recolectadas en la misma bolsa de plástico

No se realizó ningún análisis estadístico con las propiedades químicas del suelo. Estos resultados se utilizaron para comprender la correlación entre el rendimiento y la calidad del tomate y las propiedades químicas del suelo afectadas por el manejo de la fertilización.

6.3.4. Influencia de las propiedades del suelo en el rendimiento y la calidad del tomate.

Para establecer las relaciones entre el rendimiento y la calidad del tomate y las propiedades químicas del suelo, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). PCA es un método útil que reduce el número de variables a un número limitado de componentes principales, lo que permite comprender las relaciones entre factores en sistemas biológicos complejos [51].

El PCA (figura 6.3) se realizó incluyendo todas las variables presentadas anteriormente: rendimiento (kg m^{-2}) (tabla 6.3), parámetros de calidad (tabla 6.4 y 6.5) y análisis químico del suelo (tabla 6.6). Las variables que no mostraron una fuerte influencia en el modelo fueron eliminadas del análisis. Tras eliminar las variables no representativas, los dos primeros componentes principales explicaron el 32,61% y el 38,33%, respectivamente, de la varianza total.

El biplot muestra variables individuales, representadas por el segmento, y los puntos representan diferentes tratamientos. El N-NO_3^- se correlaciona positivamente con el rendimiento de los tomates ($r = 0,8400$, $p < 0,05$), como se indicó anteriormente [22]. N-NO_3^- está relacionado con el contenido de licopeno en la fruta ($r = 0,7106$; $p = 0,1135$) y el parámetro de color a^* ($r = 0,7781$, $p < 0,10$). El parámetro a^* está relacionado con el contenido de licopeno [32]. Además, los parámetros de color Cl y brillo se mueven en la misma dirección dentro de la figura.

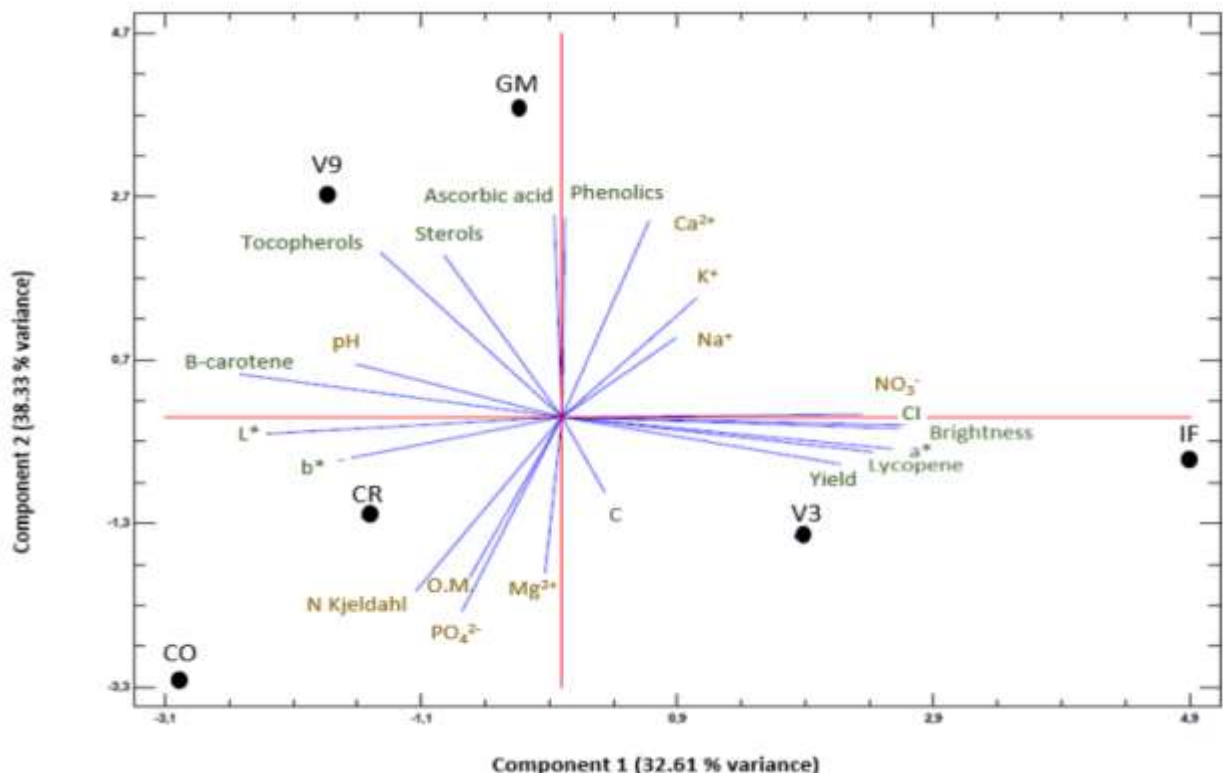


Figura 6.3. Relaciones PCA entre el rendimiento del tomate, la calidad del tomate y las propiedades químicas del suelo.

Se evidencia que la disponibilidad de nitrógeno (N) en el suelo favorece el desarrollo de la planta y consecuentemente la producción de frutos [22]. En cuanto a la relación entre la disponibilidad de N y el contenido de licopeno en frutos, los resultados son controvertidos. Zhang et al. [52] publicaron que los fertilizantes nitrogenados mezclados con estiércol dieron como resultado las cantidades más altas de licopeno, mientras que de manera similar a lo que se observó en este experimento, sugirieron una correlación positiva de las dosis de N con el contenido en licopeno. Por el contrario, Dorais et al. [13] afirmaron que la síntesis de metabolitos secundarios con bajos niveles de N, como el licopeno, se ve favorecida en condiciones limitantes de N. Otros autores sugirieron una variación significativamente positiva del contenido de licopeno en el procesamiento de frutos de tomate, con un uso integrado de compost y media dosis de fertilizante mineral recomendado [53]. Los tratamientos IF y V3 se presentan en esta sección de la gráfica, lo que indica que los resultados obtenidos con la fertilización mineral y vermicompost promueven el contenido de licopeno y el rendimiento.

Una de las principales preocupaciones en el cultivo de tomate orgánico es la adecuada fertilización y, en especial, la disponibilidad de $N-NO_3^-$ [54], ya que, para lograr un alto rendimiento, el N disponible en el suelo debe ser igual a la demanda de la planta [54]. 32]. En el tratamiento IF, los nutrientes están directamente disponibles para las plantas, mientras que la lenta tasa de solubilización y mineralización de la materia orgánica puede no satisfacer las necesidades de N de las plantas [27,55]. Además, el vermicompost tiene la fracción más grande de materia orgánica degradada en comparación con otras enmiendas orgánicas, lo que resulta en una mayor disponibilidad de nutrientes. La aplicación de vermicompost también puede mejorar la actividad microbiana en el suelo, mejorando así la disponibilidad de N para las plantas. Además, un estudio de Mejía et al. [28] en un experimento sin suelo demostraron que dosis más altas de vermicompost conducen a una mayor actividad microbiana, pero la concentración de N en el sustrato no aumenta. El NO_3^- es rápidamente absorbido por las plantas y lixiviado rápidamente, esto puede explicar que no se observa un aumento de la concentración de N en el suelo al aumentar las concentraciones de vermicompost (tabla 6.6).

El ácido ascórbico, los tocoferoles totales, los esteroides totales y los fenoles totales aumentan en forma conjunta, en contraposición al contenido de N disponible en el suelo, lo que implica que un bajo nivel de N induce una mayor producción de estos fitoquímicos. Previamente se observó una disminución en los compuestos fenólicos con un aumento en la disponibilidad de N [57]. El contenido de calcio (Ca^{2+}) en el suelo influye en estas variables, mostrando una correlación positiva y significativa con los fenoles ($r = 0,8188$, $p < 0,05$) y el ácido ascórbico ($r = 0,8845$, $p < 0,05$). Ca^{2+} y N tienen funciones críticas en las estructuras celulares y el metabolismo de las plantas [58]. Previamente se observó una mejora en la calidad del fruto con la aplicación de Ca^{2+} [59]. En la tabla 6.5, es claro que los tratamientos GM y V9 conducen a una mayor concentración de ácido ascórbico, tocoferoles y esteroides. Esto puede explicarse por la mayor presencia en el suelo de reguladores del crecimiento vegetal y ácido húmico (no analizados en este estudio) [60], que indirectamente promueven la actividad metabólica secundaria de tomates.

A excepción del licopeno, la mayor presencia de compuestos antioxidantes fue encontrada en los tomates tratados con la mayor dosis de vermicompost (V9), respecto a los tomates tratados con una dosis de 3 kg m^{-1} (V3). Esto puede explicarse por la mayor presencia de microorganismos y una mejora en la actividad enzimática cuando se aplica una mayor dosis de vermicompost [56]. Sin embargo, las diferencias en la actividad microbiana no están completamente relacionadas con la concentración de macronutrientes en el suelo registrada en este estudio, y se debe analizar la actividad biológica [56] para comprender las diferencias en los resultados.

PO_4^{-2} , N Kjeldahl, Mg^{2+} y O.M. parecen no haber afectado la calidad y el rendimiento del tomate.

El β -caroteno muestra un comportamiento opuesto con respecto al licopeno y se correlaciona negativamente (significación estadística) con el N-NO_3^- ($r = -0,9239$, $p < 0,05$). Los parámetros de color L^* y b^* se mueven en la misma dirección.

Los tomates tratados con vermicompost a 9 kg m^{-1} (V9) mostraron una mejora en la síntesis de metabolitos secundarios. posiblemente relacionado con la mayor presencia en el suelo de reguladores del crecimiento vegetal y ácido húmico [58], promoviendo indirectamente el metabolismo secundario.

6.4. Conclusiones.

En este estudio, el manejo de la nutrición vegetal con enmiendas con vermicompost elaborado a partir de residuos vegetales de ciclos anteriores de tomate, con una dosis estándar de 3 kg m^{-1} (V3) y una dosis superior de 9 kg m^{-1} (V9), como única fuente de nutrientes, permite igualar los rendimientos obtenidos con el tratamiento químico de fertirrigación (F1). Además, los tratamientos de vermicompost (V3, V9) dieron como resultado tomates de alta calidad nutricional, ya que la vermicompost a 3 kg m^{-1} (V3) da frutos con mayor contenido en licopeno, igual al tratamiento IF. Además, los tomates tratados con vermicompost a 9 kg m^{-1} (V9) mostraron una mejora en la síntesis de metabolitos secundarios.

El uso de vermicompost resultó ser la mejor solución circular, ya que permite reutilizar y reciclar los residuos vegetales generados en un sistema de cultivo intensivo [3], resolviendo el problema de la gestión de residuos y cerrando el circuito de los nutrientes. La calidad de esta enmienda procesada, utilizada como única fuente de nutrientes durante 3 años, permitió obtener la misma producción que con el manejo mediante la fertilización mineral estándar, además de una mejora en la concentración de antioxidantes (V9) y alta concentración de licopeno (V3).

Es necesario un cambio en las prácticas agrícolas para hacer frente a los problemas ambientales causados por los sistemas intensivos de producción y obtener productos de alta calidad. La reutilización de residuos vegetales para producir vermicompost es una solución circular que ayuda a reintegrar los residuos vegetales al suelo.

Los resultados nos animan a seguir buscando fuentes locales de insumos que permitan optimizar el uso de los recursos y reducir la generación de residuos. Según los resultados, es posible cerrar el círculo en la producción de hortalizas intensivas en cuanto a la fuente de nutrientes y reducir la cantidad de residuos orgánicos generados.

Bibliografía.

1. Aznar-Sánchez, J.A.; Velasco-Muñoz, J.F.; García-Arca, D.; López-Felices, B. Identification of Opportunities for Applying the Circular Economy to Intensive Agriculture in Almería (South-East Spain). *Agronomy* 2020, 10, 1499.
2. Toop, T.A.; Ward, S.; Oldfield, T.; Hull, M.; Kirby, M.E.; Theodorou, M.K. AgroCycle—developing a circular economy in agriculture. *Energy Procedia* 2017, 123, 76–80.
3. Lopez, M.J.; Masaguer, A.; Paredes, C.; Perez, L.; Muñoz, M.; Salas, M.C.; Hernandez, R. De residuos a recursos. El camino hacia la sostenibilidad. *Red Española Compost.* 2015, 1, 170.
4. Sánchez-Navarro, A.; Sánchez-Romero, J.A.; Salas-Sanjuan, M.C.; Arantzazu Blanco Bernardeau, M.; Delgado-Iniesta, M.J. Medium-Term Influence of Organic Fertilization on the Quality and Yield of a Celery Crop. *Agronomy* 2020, 10, 1418.
5. Walling, E.; Vaneekhaute, C. Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. *J. Environ. Manag.* 2020, 276, 111211.
6. Shen, W.; Hu, M.; Quian, D.; Xue, H.; Gao, N.; Lin, X. Microbial deterioration and restoration in greenhouse-based intensive vegetable production systems. *Plant Soil* 2021, 463, 1–18.
7. Gao, W.; Yang, H.; Kou, L.; Li, S. Effects of nitrogen deposition and fertilization on N transformations in forest soils: A review. *J. Soils Sediments* 2015, 15, 863–879.
8. Mona, S.; Malyan, S.K.; Saini, N.; Deepak, B.; Pugazhendhi, A.; Kumar, S.S. Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar. *Chemosphere* 2021, 275, 129856.
9. Madrid, R.; Valverde, M.; Guillén, I.; Sanchez, A.; Lax, A. Evolution of organic matter added to soils under cultivation conditions. *J. Plant Natur. Soil Sci.* 2004, 167, 39–44.
10. Williams, H.; Colombi, T.; Keller, T. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden. *Geoderma* 2020, 360, 114010.
11. Hernández, T.; Chocano, C.; Moreno, J.L.; García, C. Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (*Lactuca sativa* L.) crops—Effects on soil and plant. *Soil Tillage Res.* 2016, 160, 14–22.
12. Liang, B.; Zhao, W.; Yang, X.; Zhou, J. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat–maize experiment. *Field Crops Res.* 2013, 144, 126–134.
13. Dorais, M.; Ehret, D.L.; Papadopoulos, A.P. Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: From the seed to the consumer. *Phytochem. Rev.* 2008, 7, 231–250.
14. Fortis-Hernández, M.; Antonio-Ordoñez, E.; Preciado-Rangel, P.; Gallegos-Robles, M.A.; Vázquez-Vázquez, C.; Reyes-Gonzales, A.; Esparza-Rivera, J.R. Effect of substrate formulated with organic material on yielding, commercial and phytochemical quality, and benefit-cost ratio of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) produced under greenhouse conditions. *Not. Bot. Horti. Agrobot. Cluj Napoca* 2021, 49, 11999.
15. Abu-Zahra, T.R. Influence of agricultural practices on fruit quality of bell pepper. *Pak. J. Biol. Sci.* 2011, 14, 867–881.

16. Worthington, V. Nutritional Quality of Organic Versus Conventional Fruits, Vegetables, and Grains. *J. Altern. Complement. Med.* 2001, 7, 161–173. *Agronomy* 2022, 12, 174 13 of 14
17. Vélez-Terreros, P.Y.; Romero-Estévez, D.; Yáñez-Jácome, G.S.; Simbaña-Farinango, K.; Navarrete, H. Comparison of major nutrients and minerals between organic and conventional tomatoes. A review. *J. Food Compost Anal.* 2021, 100, 103922.
18. Bergougnoux, V. The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnol. Adv.* 2014, 32, 70–189.
19. Guil-Guerrero, J.L.; Reboloso Fuentes, M.M. Nutrient composition and antioxidant activity of eight tomato (*Lycopersicon esculentum*) varieties. *J. Food Compost. Anal.* 2009, 22, 123–129.
20. Perveen, R.; Suleria, H.A.; Anjum, F.M.; Butt, M.S.; Pasha, I.; Ahmad, S. Tomato (*Solanum lycopersicum*) carotenoids and lycopene chemistry; metabolism, absorption, nutrition, and allied health claims A comprehensive review. *Crit. Rev. Food. Sci. Nutr.* 2015, 55, 919–929.
21. Bilalis, D.; Krokida, M.; Roussis, I.; Papastylianou, P.; Travlos, I.; Cheimona, N.; Dede, A. Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Hort.* 2018, 30, 321–332.
22. Wang, X.X.; Zhao, F.; Zhang, G.; Zhang, Y.; Yang, L. Vermicompost Improves Tomato Yield and Quality and the Biochemical Properties of Soils with Different Tomato Planting History in a Greenhouse Study. *Front. Plant Sci.* 2017, 8, 1978.
23. Ramos-Bueno, R.P.; Romero-González, R.; González-Fernández, M.J.; Guil-Guerrero, J.L. Phytochemical composition and in vitro anti-tumour activities of selected tomato varieties. *J. Sci. Food Agric.* 2017, 97, 488–496.
24. Guillén, F.; Castillo, S.; Zapata, P.J.; Martínez-Romero, D.; Valero, D.; Serrano, M. Efficacy of 1-MCP treatment in tomato fruit: 2- Effect of cultivar and ripening stage at harvest. *Postharvest Biol. Technol.* 2006, 42, 235–242.
25. Fabrikov, D.; Guil-Guerrero, J.L.; González-Fernández, M.J.; Rodríguez-García, I.; Gómez-Mercado, F.; Urrestarazu, M.; Lao, M.T.; Rincón-Cervera, M.Á.; Álvaro, J.E.; Lyashenko, S. Borage oil: Tocopherols, sterols and squalene in farmed and endemic wild Borago species. *J. Food Compost. Anal.* 2019, 83, 103299.
26. Suárez, M.H.; Rodríguez, E.R.; Romero, C.D. Analysis of organic acid content in cultivars of tomato harvested in Tenerife. *Eur. Food Res. Technol.* 2008, 226, 423–435.
27. Fu, H.; Zhang, G.; Zhang, F.; Sun, Z.; Geng, G.; Li, T. Effects of continuous tomato monoculture on soil microbial properties and enzyme activities in a solar greenhouse. *Sustainability* 2017, 9, 317.
28. Mejia, P.A.; Salas, M.C.; López, M.J. Evaluation of physicochemical properties and enzymatic activity of organic substrates during four crop cycles in soilless containers. *Food Sci. Nutr.* 2018, 6, 2066–2078.
29. Bremner, J.M. Organic forms of nitrogen. *Methods Soil Anal. Part 2 Chem. Microbiol. Prop.* 1965, 9, 1238–1255.
30. Nassau Zuba, S.; Nogueira, W.C.L.; Fernandes, L.A.; Sampaio, R.A., da Costa, D.A. Yield and nutrition of tomato using different nutrient sources. *Hortic. Bras.* 2011, 29, 50–56.

31. Murmu, K.; Chandra Ghosh, B.; Kumar Swain, D. Yield and quality of tomato grown under organic and conventional nutrient management. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2013, 59, 1311–1321.
32. Ferreira, M.M.M.; Ferreira, B.F.; Fontes, P.C.R.; Dantas, J.P. Qualidade de tomate em função de doses de nitrogênio e da adubação orgânica em duas estações. *Hortic. Bras.* 2006, 24, 141–145.
33. De Matos, R.M.; Da Silva, P.F.; Neto, J.D.; De Lima, A.S.; De Lima, V.L.A.; Saboya, L.M.F. Organic fertilization as an alternative to the chemical in cherry tomato growing under irrigation depths. *Biosci. J.* 2021, 37, e37006.
34. López, A.F.; Gómez, P.A. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Hortic. Bras.* 2004, 22, 534–537.
35. Nour, V.; Ionica, M.E.; Trandafir, I. Bioactive compounds, antioxidant activity and color of hydroponic tomato fruits at different stages of ripening. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj Napoca* 2015, 43, 404–412.
36. Barrett, D.M.; Weakley, C.; Diaz, J.V.; Watnik, M. Qualitative and nutritional differences in processing tomatoes grown under commercial organic and conventional production systems. *J. Food Sci.* 2007, 72, 441–451.
37. Viskelis, P.; Radzevicius, A.; Urbonaviciene, D.; Viskelis, J.; Karkleliene, R.; Bobinas, C. Biochemical parameters in tomato fruits from different cultivars as functional foods for agricultural, industrial, and pharmaceutical uses. *Plants Future* 2015, 11, 45.
38. Van Roy, J.; Keresztes, J.C.; Wouters, N.; De Ketelaere, B.; Saeys, W. Measuring colour of vine tomatoes using hyperspectral imaging. *Postharvest Biol. Tech.* 2017, 129, 79–89.
39. Petropoulos, S.A.; Fernandes, Â.; Xyrafis, E.; Polyzos, N.; Antoniadis, V.; Barros, L.; C.F.R. Ferreira, I. The optimization of nitrogen fertilization regulates crop performance and quality of processing tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. Heinz 3402). *Agronomy* 2020, 10, 715.
40. Chassy, A.W.; Bui, L.; Renaud, E.N.; Van Horn, M.; Mitchell, A.E. Three-year comparison of the content of antioxidant microconstituents and several quality characteristics in organic and conventionally managed tomatoes and bell peppers. *J. Agric. Food Chem.* 2006, 54, 8244–8252.
41. Dumas, Y.; Dadomo, M.; Di Lucca, G.; Grolier, P. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *J. Sci. Food Agric.* 2003, 83, 369–382.
42. Borguini, R.G.; Bastos, D.H.M.; Moita-Neto, J.M.; Capasso, F.S.; Torres, E.A.F.D.S. Antioxidant potential of tomatoes cultivated in organic and conventional systems. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 2013, 56, 521–529.
43. Vinha, A.F.; Barriera, S.V.P.; Costa, A.S.G.; Alves, R.C.; Oliveira, M.B.P.P. Organic versus conventional tomatoes: Influence on physicochemical parameters, bioactive compounds and sensorial attributes. *Food Chem. Toxicol.* 2014, 67, 139–144.
44. Oliveira, A.B.; Moura, C.F.H.; Gomes-Filho, E.; Marco, C.A.; Urban, L.; Miranda, M.R.A. The Impact of Organic Farming on Quality of Tomatoes Is Associated to Increased Oxidative Stress during Fruit Development. *PLoS ONE* 2013, 8, e56354.
45. Ulrichs, C.; Fischer, G.; Büttner, C.; Mewis, I. Comparison of lycopene, β -carotene and phenolic contents of tomato using conventional and ecological horticultural practices, and

arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). *Agron. Colomb.* 2008, 26, 40–46. *Agronomy* 2022, 12, 174 14 of 14

46. Ewulo, B.S.; Ojeniyi, S.O.; Akanni, D.A. Effect of poultry manure on selected soil physical and chemical properties, growth, yield and nutrient status of tomato. *Afr. J. Agric. Res.* 2008, 3, 9–14.

47. Caris-Veyrat, C.; Amiot, M.J.; Tyssandier, V.; Grasselly, D.; Buret, M.; Mikolajczak, M.; Guillard, J.C.; Bouteloup, C.; Borel, P. Influence of organic versus conventional agricultural practice on the antioxidant microconstituent content of tomatoes and derived purees; consequences on antioxidant plasma status in humans. *J. Agric. Food Chem.* 2004, 52, 6503–6509.

48. Choo, W.S.; Birch, J.; Dufour, J.P. Physicochemical and quality characteristics of cold—Press flaxseed oils. *J. Food Compos. Anal.* 2007, 20, 202–211.

49. Hakkinen, S.H.; Torren, A.R. Content of flavonols and selected phenolic acids in strawberries and *Vaccinum* species: Influence of cultivar, cultivation site and technique. *Food Res. Int.* 2000, 33, 517–524.

50. Toor, R.K.; Savage, G.P.; Heeb, A. Influence of different types of fertilisers on the major antioxidant components of tomatoes. *J. Food Compos. Anal.* 2006, 19, 20–27.

51. Reboloso Fuentes, M.M.; Ación Fernández, G.G.; Sánchez Pérez, J.A.; Guil Guerrero, J.L. Biomass nutrient profiles of the microalga *Porphyridium cruentum*. *Food Chem.* 2000, 70, 345–353.

52. Zhang, E.; Duan, Y.; Tan, F.; Zhang, S. Effects of Long-term Nitrogen and Organic Fertilization on Antioxidants Content of Tomato Fruits. *J. Hortic.* 2016, 3, 172.

53. Verma, S.; Sharma, A.; Kumar, R.; Kaur, C.; Arora, A.; Shah, R.; Nain, L. Improvement of antioxidant and defense properties of Tomato (var. Pusa Rohini) by application of bioaugmented compost. *Saudi J. Biol. Sci.* 2015, 22, 256–264.

54. Gravel, V.; Blok, W.; Hallmann, E.; Carmona-Torres, C.; Wang, H.; Van De Peppel, A.; Golec, A.F.C.; Dorais, M.; Van Meeteren, U.; Heuvelink, E.; et al. Differences in N uptake and fruit quality between organically and conventionally grown greenhouse tomatoes. *Agron. Sustain. Dev.* 2010, 30, 797–806.

55. Kiehl, E.J. *Fertilizantes Organominerais*. Piracicaba: Edição do Autor. 1993. Available online:

<https://repositorio.usp.br/item/000850337> (accessed on 18 December 2021).

56. Ruiz, J.L.; Salas, M.C. Evaluation of organic substrates and microorganisms as bio-fertilisation tool in container crop production. *Agronomy* 2019, 9, 705.

57. Doll, H.; Holm, U.; Sogaard, B.; Bay, H. Phenolic compounds in barley varieties with different degree of partial resistance against powdery mildew. *Acta Hortic.* 1994, 381, 576–582.

58. Mumivand, H.; Babalar, M.; Hadian, J.; Fakhr-Tabatabaei, M. Plant growth and essential oil content and composition of Saturn (*Satureja hortensis* L.) in response to calcium carbonate and nitrogen application rates. *J. Med. Plants Res.* 2011, 5, 1859–1866.

59. Kadir, S.A. Fruit quality at harvest of “Jonathan” apple treated with foliarly-applied calcium chloride. *J. Plant Nutr.* 2005, 27, 1991–2006.

60. Arancon, N.Q.; Edwards, C.A.; Bierman, P.; Welch, C.; Metzger, J.D. Influences of vermicomposts on field strawberries: 1. Effects on growth and yields. *Bioresour. Technol.* 2004, 93, 145–153.

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES.

Capítulo 7. Discusión general y conclusiones.

El sistema de producción hortícola intensivo de Almería supera las 30000 ha de cultivos hortícolas generando cada año alrededor de 2 millones de toneladas de residuos vegetales (Cajamar, 2016). Para el aprovechamiento de los restos orgánicos y la implementación de un modelo circular, una de las soluciones más viable es la autogestión por parte de los agricultores.

Los restos vegetales son en su mayoría entregados a gestores de residuos, que los compostan y posteriormente son utilizados como enmienda orgánica. Una parte de estos restos también son vermicompostados. Y en otros casos son enterrados al finalizar el cultivo.

Que los restos vegetales procedentes de los cultivos hortícolas sean reutilizados en la propia finca de cultivo, contribuye a solucionar la gestión de estos residuos de una manera positiva, recuperando los nutrientes que contienen, y disminuyendo el uso de fertilizantes minerales. Para el planteamiento de esta tesis doctoral, partimos de la hipótesis de que los restos vegetales frescos, compostados o vermicompostados usados como fuentes de nutrientes permiten conseguir niveles productivos y calidad suficiente, comparables con el manejo mineral. Para contribuir a la promoción de estas prácticas de gestión de restos vegetales es necesario conocer los efectos que la fertilización orgánica a largo plazo tiene sobre la calidad y cantidad de las producciones en cultivos intensivos con alta demanda nutricional.

Por ello el objetivo general de este trabajo fue implementar una gestión circular de los residuos vegetales en un invernadero durante 6 ciclos consecutivos de tomate, en contraposición a la fertilización mineral por fertirriego, evaluando principalmente los efectos sobre los rendimientos, la calidad de la producción y las características del suelo, y valorar el efecto en el estado nutricional de los cultivos.

Los tratamientos orgánicos con restos vegetales hortícolas consistieron en la incorporación al suelo de material vegetal en 3 estados: procedente de residuo del cultivo fresco, después de procesos de compostaje y vermicompostaje (a dosis a 3 y 9 kg m⁻¹). También se incluyó un tratamiento control con fertirrigación mineral y un tratamiento de control orgánico con estiércol de cabra compostado.

Los resultados fueron agrupados para ser analizados y obtener 3 publicaciones.

- Uso de residuos agrícolas como fuente de nutrientes para los cultivos en horticultura intensiva (publicado *Agronomy* 2022, 12, 447. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020447>).
- Uso del extracto celular de peciolo en el diagnóstico nutricional en cultivo de tomate con fertilización orgánica (en prensa).
- Diferentes sistemas de fertilización orgánica modifican la calidad de frutos de tomate: Una oportunidad para la fertilización circular en horticultura intensiva (publicado *Agronomy* 2022, 12, 174. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010174>).

En este capítulo serán tratados los resultados de forma global para generar las conclusiones de tesis en su conjunto.

Según los resultados de este estudio, la aplicación de fertilizantes derivados de residuos agrícolas no afectó negativamente el rendimiento del tomate durante tres cultivos consecutivos, excepto en el tercer ciclo donde las parcelas fertilizadas con restos hortícolas (CropRes) registraron rendimientos más bajos. La influencia del manejo de la fertilización orgánica en la producción de cultivos es un tema controvertido ya que la fertilización mineral proporciona nutrientes fácilmente disponibles para las plantas, lo que resulta en altas tasas de crecimiento y rendimiento (Sánchez et al., 2020). En cambio, con la aplicación de fertilizantes orgánicos, la disponibilidad de nutrientes depende de la tasa de mineralización de la materia orgánica, que puede no satisfacer las demandas de nutrientes de la planta (Sánchez et al., 2020; Riahi et al., 2009).

Con respecto a la nutrición de los cultivos, en el manejo de la fertilización orgánica, se espera que el factor más limitante sea la disponibilidad de N (Sánchez et al., 2020), ya que el N orgánico debe mineralizarse para estar disponible para las plantas. En este estudio, no se observaron diferencias significativas en la concentración de N-NO_3^- en extracto de pecíolo entre el tratamiento con fertilizantes minerales (FerControl) y los tratamientos de fertilizantes orgánicos derivados de residuos agrícolas, lo que indica que la liberación de nutrientes de la materia orgánica fue suficiente para cubrir la demanda nutricional de las plantas.

La valoración de la población microbiana en los suelos del ensayo se realizó en el tercer ciclo de cultivo (TC3). Los resultados indican que el tratamiento testigo con fertirrigación mineral (FertControl) tuvo la mayor concentración de hongos totales (FT), con diferencias estadísticamente significativas al comparar con los tratamientos orgánicos. En general, la enmienda con compost (Comp) mejoró la biomasa bacteriana en la rizosfera, incluida una alta presencia de bacterias amonificantes, en consonancia con resultados de otros autores que reportaron una mejora en la biomasa microbiana después de la aplicación de enmiendas orgánicas (Hale et al., 2021; Fu et al., 2017). En los suelos tratados con fertilizantes químicos (FertControl) se produjo un aumento de los hongos (FT). Los resultados muestran que la mayor concentración de bacterias totales (BT) se observó en el tratamiento con compost como enmienda (Comp), mientras que los tratamientos fertilizados con fertilizantes minerales (FertControl) y estiércol compostado (OrgControl) mostraron las concentraciones más bajas. Comparado con los tratamientos orgánicos, FertControl registró la menor presencia de bacterias amonificantes (AB).

La incorporación de materias orgánicas al suelo como fertilizantes, mejoró significativamente la concentración de bacterias amonificantes en todos los tratamientos orgánicos en comparación al manejo de la fertilización mineral. Esto es atribuible a la mayor presencia de sustrato de crecimiento para los microorganismos amonificantes. También es atribuible principalmente a la microbiota asociada a la materia orgánica que se incorpora al suelo e interactúa con los microorganismos nativos (Luo et al., 2022).

Estos resultados justifican que los niveles de N en savia durante los cultivos fueron adecuados en todos los tratamientos; el aumento de las poblaciones de AB en el suelo permitió la disponibilidad de N para las plantas. La aplicación de fertilizantes orgánicos permite restaurar la microbiota del suelo, que mineraliza y solubiliza los nutrientes, evitando las deficiencias nutricionales de las plantas (la concentración de N-NO_3^- y K^+ en savia en las plantas de los tratamientos orgánicos fue estadísticamente comparable a la fertilización mineral) y pérdidas de producción.

A su vez, las enmiendas orgánicas aplicadas al suelo aumentan la presencia de ácidos húmicos, que según Liu et al. (2019) mejoran los macro agregados del suelo y permiten una reducción de la salinidad. Como consecuencia, las plantas de los tratamientos orgánicos muestran

una menor concentración de Na^+ en savia en comparación con las fertirrigadas con fertilizantes minerales. La concentración de H_2PO_4^- en savia en las plantas con fertirrigación mineral es significativamente mayor que en las plantas con fertilizantes orgánicos. La diferencia se debe a que la solución nutritiva aplicada en el tratamiento mineral en el fertirriego incluía fósforo, elemento que no era aportado a los tratamientos orgánicos. Según los resultados, las enmiendas orgánicas no han sido suficiente para mantener los niveles de H_2PO_4^- en savia a los valores cuantificados en la savia de las plantas fertirrigadas con solución mineral. El análisis de extracto celular de peciolo o savia ha permitido apreciar la deficiencia en fósforo en las plantas con los tratamientos con enmiendas orgánicas.

La concentración de Na^+ en savia presenta un comportamiento diferenciado entre el tratamiento de fertirrigación con solución nutritiva mineral y los tratamientos que emplean fuentes orgánicas de nutrientes. La concentración de Na^+ en savia en el tratamiento con fertilizantes minerales (FerMin), es mayor significativamente en todos los muestreos, al compararlo con los tratamientos orgánicos.

La actividad enzimática se considera un indicador de la calidad del suelo y se utiliza para monitorear la actividad microbiana (Zhou et al., 2015). La correlación negativa entre la actividad enzimática cuantificada en este estudio (DHA, ACP y β -GLU con FT) puede deberse a los efectos negativos de la comunidad fúngica sobre la actividad microbiana beneficiosa. La mayor población de FT se encontró en parcelas manejadas con un plan de fertirrigación y donde no se agregaron enmiendas orgánicas. La relación negativa entre la actividad enzimática del suelo y FT sugiere que la estructura de la comunidad de esta población de hongos juega un papel negativo en la salud del suelo. Además, los resultados mostraron una correlación negativa entre AB y FT, al mismo tiempo que la actividad enzimática aumenta con la población de bacterias. La actividad DHA, ACP y β -GLU se correlacionan positivamente con los microorganismos que facilitan la disponibilidad de nutrientes: ACP con AB (0,7121) y BT (0,7002), y β -GLU con AB (0,7736) y BT (0,7194). Simultáneamente, los suelos tratados orgánicamente en el experimento mostraron un aumento de la actividad DHA, ACP, β -GLU, lo que indica que las enmiendas orgánicas derivadas de residuos vegetales proporcionan un sustrato específico para las enzimas que juegan un papel clave en la descomposición de la materia orgánica del suelo.

En general, como cabía esperar, según los resultados el H_2PO_4^- como nutriente se convierte en un elemento determinante para los cultivos cuando fertilizamos con enmiendas orgánicas como el compost, restos vegetales enterrados y estiércol. Lo que obliga a tener que seleccionar las fuentes de nutrientes orgánicas por sus características físico, químicas y biológicas que nos permitan eliminar la fertirrigación mineral de los cultivos, con un control sobre la capacidad de mejorar los niveles en suelo y consecuentemente en savia.

Los resultados de este trabajo también indican que la fertilización con materiales derivados de residuos agrícolas mejora la calidad del tomate, la mayor presencia de compuestos antioxidantes fue encontrada en los tomates tratados con la mayor dosis de vermicompost (9 kg m^{-1} -V9), respecto a los tomates tratados con una dosis de 3 kg m^{-1} (V3). Esto se explica por la mayor presencia de microorganismos y una mejora en la actividad enzimática cuando se aplica una mayor dosis de vermicompost (Ruíz y Salas, 2019). Los resultados obtenidos en los tratamientos que incluyen la fertilización mineral y el vermicompost promueven el contenido de licopeno y el rendimiento.

En vista de los resultados de la valorización de residuos agrícolas como fuente de nutrientes, futuras investigaciones podrían centrarse en estrategias para enriquecer el compost o vermicompost, derivado de residuos vegetales, con microorganismos para mejorar la eficiencia de

los fertilizantes. Además, considerando que la fertirrigación es una práctica común en los sistemas hortícolas, se requiere un mejor conocimiento sobre la potencialidad de los extractos acuosos de compost/vermicompost utilizados como alternativas a las soluciones minerales convencionales.

Finalmente como conclusiones generales del análisis conjunto de los resultados evaluados:

- La aplicación continua de enmiendas derivadas de residuos agrícolas tiene un efecto positivo sobre la actividad de la microbiota, que en consecuencia da como resultado rendimientos similares a la fertilización mineral tradicional.
- La actividad enzimática (DHA, ACP, β -GLU) de los suelos fue menor en el tratamiento con fertilizantes minerales (FertControl). Una alta actividad enzimática está relacionada con la alta presencia de microorganismos activos en el suelo, que es esencial para la disponibilidad de nutrientes para las plantas.
- Los análisis de savia (extracto celular de peciolo) demuestran que, las enmiendas orgánicas representan una fuente de nutrientes capaz de mantener niveles iónicos en savia semejantes a las plantas con aporte mineral mediante fertirrigación, a excepción del P- H_2PO_4^- con concentraciones significativamente menores.
- La concentración de H_2PO_4^- , Ca^{2+} y Na^+ en extracto celular de peciolo se diferencia estadísticamente según se fertirrigue con solución nutritiva mineral o con fuente orgánica, y dentro de esta última se aprecian mejores valores (mayor de H_2PO_4^- , y menor de Na^+) cuando el vermicompost es la fuente de nutrientes.
- Se observa la capacidad del vermicompost de conseguir los niveles de iones en savia que le permiten alcanzar producciones similares a las plantas con fertirrigación tradicional.
- La calidad del vermicompost de los restos hortícolas como única fuente de nutrientes aplicada como enmienda, durante 3 años, permitió obtener la misma producción que con el manejo mediante la fertilización mineral estándar, además de una mejora en la concentración de antioxidantes (dosis altas 9 kg m^{-1} -V9) y alta concentración de licopeno (dosis bajas 3 kg m^{-1} V3).
- Entre las diferentes alternativas para valorizar los residuos agrícolas en zonas con producción hortícola intensiva, los resultados sugieren que el uso de los residuos vegetales como fuente de nutrientes es una estrategia válida para limitar el uso de fertilizantes químicos, ya que ayuda a mejorar la salud biológica del suelo sin comprometer el rendimiento.

Bibliografía.

- Carricondo-Martínez, I.; Berti, F.; Salas-Sanjuán, M.C. Different Organic Fertilization Systems Modify Tomato Quality: An Opportunity for Circular Fertilization in Intensive Horticulture. *Agronomy* 2022, 12, 174. [CrossRef]
- Fu, H.; Zhang, G.; Zhang, F.; Sun, Z.; Geng, G.; Li, T. Effects of continuous tomato monoculture on soil microbial properties and enzyme activities in a solar greenhouse. *Sustainability* 2017, 9, 317.
- Hale, L.; Curtis, D.; Azeem, M.; Montgomery, J.; Crowley, D.E.; McGiffen, M.E., Jr. Influence of compost and biochar on soil biological properties under turfgrass supplied deficit irrigation. *Appl. Soil Ecol.* 2021, 168, 104134.
- Hernández, T.; Chocano, C.; Moreno, J.L.; García, C. Use of compost as an alternative to conventional inorganic fertilizers in intensive lettuce (*Lactuca sativa* L.) crops—Effects on soil and plant. *Soil Tillage Res.* 2016, 160, 14–22.
- Luo, Y.; van Veelen, H.P.J.; Chen, S.; Sechi, V.; ter Heijne, A.; Veeken, A.; Buisman, C.J.N.; Bezemer, T.M. Effects of sterilization and maturity of compost on soil bacterial and fungal communities and wheat growth. *Geoderma* 2022, 409, 115598.
- Riahi, A.; Hdider, C.; Sanaa, M.; Tarchoun, N.; Kheder, M.B.; Guezal, I. Effect of conventional and organic productions systems on the yield and quality of field tomato cultivars grown in Tunisia. *J. Sci. Food Agric.* 2009, 89, 2275–2282.
- Ruiz, J.L.; Salas, M.C. Evaluation of organic substrates and microorganisms as bio-fertilisation tool in container crop production. *Agronomy* 2019, 9, 705.
- Sánchez, N.A.; Sánchez, J.A.; Salas, M.C.; Arantzazu, M.B.; Delgado, M.J. Medium-term influence of organic fertilization on the quality and yield of a celery crop. *Agronomy* 2020, 10, 1418.
- Zhou, X.G.; Wu, F.Z. Changes in soil chemical characters and enzyme activities during continuous monocropping of cucumber (*Cucumis sativus*). *Pak. J. Bot.* 2015, 47, 691–697.