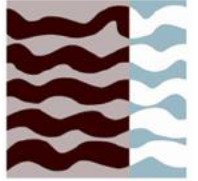




Universidad
Politécnica
de Cartagena



**Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Agronómica**



ETSIA

*Grado en Ingeniería Agroalimentaria
y de Sistemas Biológicos*

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE
FERTIRRIEGO EXPERTO EN UN CABEZAL DE
RIEGO. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA**

Autor: D. Sergio Parra Álvarez

Dirección: D. José Francisco Maestre Valero

Codirección: D. Alberto Imbernón Mulero

Cartagena, noviembre de 2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. La agricultura de regadío.....	1
1.3. Mezcla de aguas para la agricultura de regadío	4
1.4. La fertirrigación	5
1.5. Los cabezales de riego.....	7
1.6. Cabezales de riego tecnificados	9
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. Parcela experimental, fertilizantes y recursos hídricos	14
3.2. El cabezal de riego tecnificado.....	15
3.3. Programa para la optimización del fertirriego.....	18
3.3.1. Algoritmo de fertirrigación experto	18
3.3.2. Plan de fertirriego en la aplicación web	23
3.4. Proceso experimental y evaluación del sistema	26
3.4.1. Pruebas de fertirrigación y analíticas de muestras	26
3.5. Evaluación económica.....	27
3.5.1. Costes de amortización.....	28
3.5.2. Costes del agua y fertilizantes.....	29
3.5.3. Estimación del ahorro potencial	29
4. Resultados y discusión	31
4.1. Evaluación técnica.....	31
4.2. Evaluación económica.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ámbito territorial de la Cuenca del Segura. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura (2023).	2
Figura 2. Esquema de los equipos que componen un cabezal de riego. Fuente: PortalFrutícola (2019)	8
Figura 3. Cabezal de riego experimental. (A) Sistema de bombeo; (B) Sistema de filtrado; (C) Subsistema hidráulico; (D) Autómata de control.	16
Figura 4. Esquematación del sistema de fertirrigación del cabezal de riego. Fuente: Nutricontrol (2023).	17
Figura 5. Esquematación del proceso de ejecución del algoritmo empleado.	19
Figura 6. Introducción de los diferentes abonos en el agua de riego en la aplicación web.	24
Figura 7. Introducción de los sectores a aplicar receta de abonado en la aplicación web.	25
Figura 8. Introducción de los sectores a aplicar receta de abonado en la aplicación web.	26
Figura 9. Diagrama del proceso de validación.	27
Figura 10. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 1.	31
Figura 11. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 2.	33
Figura 12. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 3.	35
Figura 13. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 5.	36
Figura 14. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 7.	38
Figura 15. Ahorro de coste por año implementando Nutribalance.	44
Figura 16. Evolución del coste de una hectárea de pomelo de 3 años con el aumento de los precios de fertilizantes.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Compatibilidad entre los distintos fertilizantes. Fuente: PortalFrutícola (2023).....	6
Tabla 2. Valor de las propiedades físico-químicas y precio de los recursos hídricos empleados durante los ensayos.	14
Tabla 3. Propiedades físico-químicas y precio de los diferentes fertilizantes empleados en los ensayos.	15
Tabla 4. Equivalencias mol a mol para diferentes fertilizantes simples comerciales.	22
Tabla 5. Desglose de costes derivados de cada escenario.	30
Tabla 6. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 1.....	32
Tabla 7. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 1.....	32
Tabla 8. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 2.....	33
Tabla 9. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 2.....	34
Tabla 10. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 3.....	35
Tabla 11. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 3.....	35
Tabla 12. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 5.....	37
Tabla 13. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 5.....	37
Tabla 14. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 7.....	38
Tabla 15. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 7.....	39
Tabla 16. Ahorro de costes en los distintos escenarios.....	41
Tabla 17. Necesidades nutricionales para un cultivo de Citrus x paradisi, variedad Rio Red en estado fenológico adulto.	50

RESUMEN

El déficit hídrico se refiere a la falta de agua suficiente para satisfacer las necesidades de las plantas, así como de los sistemas agrícolas en general. Esto puede ser el resultado de una serie de factores como la escasez de precipitaciones, el cambio climático, la mala gestión del agua, o el aumento de la demanda debido al crecimiento de la población y la expansión agrícola. En la actualidad, la agricultura de regadío es el principal modelo de explotación agrícola, ya que es capaz de abastecer las demandas alimentarias derivadas del acelerado crecimiento demográfico. A pesar de ello, la situación actual requiere de un sistema de producción capaz de afrontar las exigentes demandas de los mercados futuros.

Para ello, la agricultura de precisión y el desarrollo de herramientas tecnológicas específicas desempeñan un papel crucial en la gestión eficiente del agua en la agricultura, especialmente en el contexto de un déficit hídrico. Estas soluciones permiten a los agricultores optimizar el uso del agua, reducir el desperdicio y aumentar la productividad de manera sostenible. Entre estas tecnologías, destaca la aparición de nuevos cabezales de riego tecnificados, capaces de operar de forma autónoma y muy precisa, para reducir el consumo de agua y fertilizantes y lograr un fertirriego adecuado para el cultivo.

El trabajo llevado a cabo tiene como objetivo principal evaluar de forma técnica y económica un sistema de fertirriego autónomo, experto e inteligente, el cual está controlado por una aplicación web que contiene un algoritmo capaz de efectuar un plan de fertirriego específico y óptimo para cada cultivo.

A través de un total de siete ensayos se ha verificado el funcionamiento del algoritmo, del controlador web, así como del sistema de fertirriego experto, empleando para ello diferentes tipos de datos como son: los recursos hídricos necesarios para el riego, los fertilizantes disponibles a nivel de parcela, las características del sistema de fertirrigación o las características y requerimientos hídricos y nutricionales del cultivo. Además, mediante una evaluación económica, se han analizado comparativamente dos escenarios: los costes asociados del fertirriego del cultivo de pomelo tomando el modelo tradicional en el que se siguen las recomendaciones de un técnico de la zona y los costes asociados de este mismo cultivo empleando en este caso el sistema de fertirriego NutriBalance desarrollado.

Regiones como la del sudeste español se caracterizan por su clima árido y periodos prolongados de sequía, por lo que es necesario llevar a cabo un manejo preciso y

optimizado de los recursos con el fin de obtener una actividad agrícola sostenible y eficiente. Es por ello, por lo que el sistema de fertirrigación presentado aspira a ser una novedosa herramienta para el manejo de la fertirrigación, capaz de cumplir con estos requisitos en dichas zonas agrícolas.

ABSTRACT

Water deficit refers to the lack of necessary water to meet plant needs, as well as agricultural systems in general. This may be the result of some factors such as low rainfall, climate change, poor water management, or demand increased due to population growth and agricultural expansion. Now a days, irrigated agriculture is the main model of agricultural exploitation, due to its capacity to supply food demands derived from the rapid population growth. Nevertheless, the current situation requires a production system that could be able to meet the demanding demands of future markets.

To this end, precision agriculture and the development of specific technological tools are crucial in efficient water management in agriculture, especially in the context of a water deficit. These solutions allow farmers to optimize water use, reduce waste and increase productivity in a sustainable manner. Among these technologies, the emergence of new technified irrigation heads, capable of operating autonomously and very precisely, to reduce water and fertilizer consume and achieve an adequate fertigation for the crop.

The main objective of the work is to technically and economically evaluate an autonomous, expert and intelligent fertigation system, controlled by a web application that contains an algorithm capable of developing a specific and optimal fertigation plan for each crop.

Through a total of seven trials, the functioning of the algorithm, the web controller and the expert fertigation has been verified using different types of data such as: the water resources needed for irrigation, the fertilizers available at plot level, the characteristics of the fertigation system, and the characteristics and water and nutritional requirements of the crop. In addition, by means of this evaluation, a comparison has been established between two situations: the associated costs of the fertigation of the crop taking the traditional model, in which the recommendations of a technician from the area are followed, and the associated costs of the same crop using in this case the fertigation system NutriBalance developed.

Regions such as South-East Spain are characterized by their arid climate and prolonged periods of drought, so it is necessary to carry out a precise and optimized management of resources in order to obtain a sustainable and efficient agricultural activity. This is why the fertigation system presented aims to be a novel tool for the management of fertigation, able to meet these requirements in such agricultural areas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. La agricultura de regadío

La agricultura de regadío se basa en el aporte de agua al cultivo de manera artificial con el objetivo de satisfacer las necesidades hídricas del mismo. Este tipo de agricultura se lleva a cabo tanto en aquellas zonas donde no es viable la implantación de sistemas de secano, caracterizadas por sus escasas precipitaciones, así como en regiones o cultivos de producción intensiva. Los métodos empleados son los siguientes:

- *Riego por superficie*: el agua se aplica directamente al suelo y por acción de la gravedad se distribuye por la parcela.
- *Riego por surcos*: el agua es aportada a través de pequeños canales estructurados entre el cultivo.
- *Riego por aspersión*: el agua es proporcionada al cultivo de forma localizada imitando la lluvia, mediante una aspersión continuada.
- *Riego automotriz*: se trata de una variante del riego por aspersión, en la que los aspersores son móviles.
- *Riego localizado*: el agua se aplica al cultivo a través de emisores de bajo caudal localizados cerca de la planta.

Esta agricultura es la más empleada en la actualidad debido a la multitud de ventajas que presenta respecto a la agricultura de secano. Entre éstas cabe destacar que se trata de una práctica con una mayor eficiencia y tecnificación en la aplicación de agua, que permite un aumento en la producción y rendimiento del cultivo mediante el estudio de las necesidades hídricas del cultivo. Además, la agricultura de regadío permite la implantación de ciertos cultivos en zonas con climas áridos y calurosos.

Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2020), en el año 2020, 3.831.181 hectáreas correspondieron a cultivos en regadío. Esto supuso un incremento del 1,5% de la superficie regada respecto al año 2018. Entre los diferentes sistemas de riego, el más empleado es el riego localizado (53,73%), seguido del riego superficial (23,56%) y riego por aspersión (14,76%).

En cuanto a las comunidades autónomas españolas, las situadas en zonas más áridas son las que presentan una mayor superficie de cultivo regada en relación a su superficie, siendo Canarias la comunidad autónoma con la mayor superficie cultivada regada

(57,40%), a la que le sigue la Comunidad Valenciana (45,70%) y la Región de Murcia (38,50%). Sin embargo, en las regiones localizadas en el norte peninsular predomina la agricultura de secano debido a la mayor tasa de precipitaciones existentes. (MAPA, 2020)

1.2. Escasez de agua en España y la Cuenca del Segura

La escasez de agua es un problema grave en muchas partes del mundo, incluyendo España y la cuenca del Segura. La cuenca del Segura es una de las siete cuencas hidrográficas principales de España y se encuentra en el sureste del país. Es una región semiárida que experimenta una disponibilidad limitada de recursos hídricos.

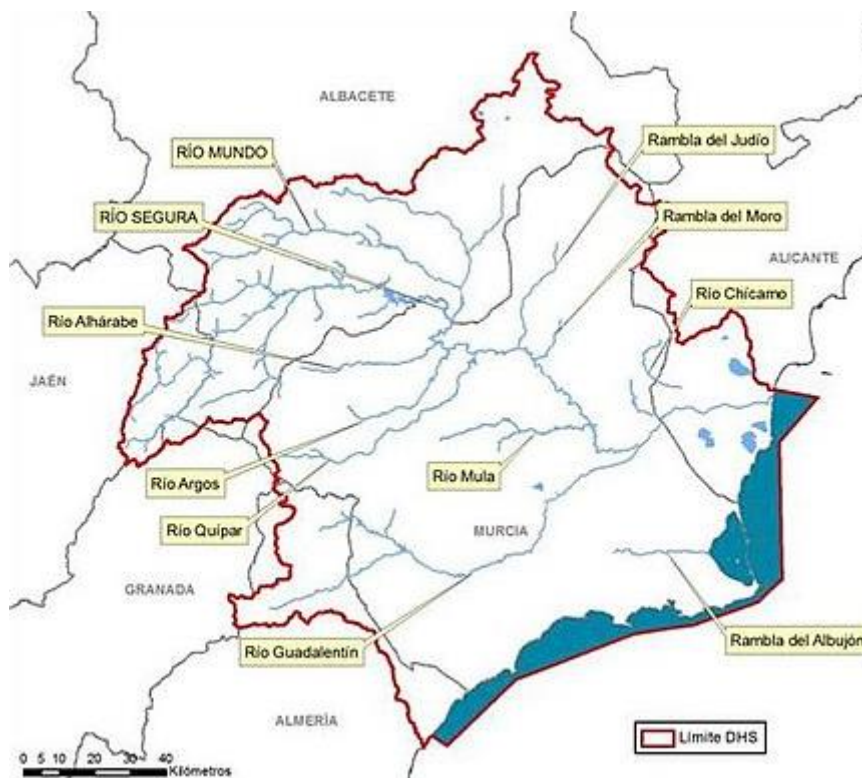


Figura 1. Ámbito territorial de la Cuenca del Segura. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura (2023).

En los últimos años, la cuenca del Segura ha enfrentado importantes desafíos en relación a la escasez de agua. Las principales causas de esta escasez son la variabilidad climática, la sobreexplotación de los recursos hídricos, la falta de infraestructuras adecuadas de almacenamiento, como es el caso de la escasez de embalses existentes en España, la falta de infraestructuras de transporte y distribución, pues la capacidad y eficiencia de estas a veces son insuficientes para satisfacer la demanda de agua en áreas específicas, y el

aumento de la demanda de agua debido al crecimiento demográfico y al desarrollo agrícola. (ONU,2013).

El clima en la cuenca del Segura se caracteriza por ser seco y recibir precipitaciones escasas y poco regulares. Esto provoca una situación de estrés hídrico, ya que la demanda de agua supera con creces la cantidad disponible. Además, el cambio climático está exacerbando esta situación, ya que se espera que las precipitaciones disminuyan y las temperaturas aumenten progresivamente en el futuro. (ONU,2013).

La sobreexplotación de los recursos hídricos es otro factor importante en la escasez de agua en la cuenca del Segura. La sobreexplotación se debe principalmente al uso intensivo del agua para la agricultura, especialmente para los cultivos intensivos como los cítricos y los productos hortícolas. Esto ha llevado a un agotamiento de los acuíferos subterráneos y a la disminución de los caudales de los ríos en la región. (ONU,2013).

La agricultura está a su vez íntimamente relacionada, pues en la actualidad ésta consume casi un 70% del total de los recursos de agua dulce disponible. Además de ello, el cambio climático y el aumento exponencial de la población mundial hacen que empeore aún más la situación de escasez de recursos. En caso de que se continúe con la proyección actual, se prevé que en el año 2023 se producirá un déficit hídrico del 40%, teniendo en cuenta la proyección efectuada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico en la que se estima un incremento de la demanda del 55% durante los primeros 50 años del siglo XXI (UNESCO, 2022).

La falta de infraestructuras adecuadas también contribuye a la escasez de agua en la cuenca del Segura. Aunque se han construido presas y embalses para almacenar agua, la capacidad de almacenamiento es limitada y no siempre es suficiente para hacer frente a la demanda. Además, la distribución del agua es otro desafío, ya que no todos los sectores tienen acceso equitativo a los recursos hídricos.

Ante esta situación, se han implementado diversas medidas para abordar la escasez de agua en la cuenca del Segura. Estas incluyen la promoción de prácticas de uso eficiente de los recursos, el fomento de la reutilización y el reciclaje del agua, la modernización de los sistemas de riego y la adopción de técnicas de agricultura sostenible. También se han

llevado a cabo campañas de concienciación y educación sobre la importancia de su conservación.

1.3. Mezcla de aguas para la agricultura de regadío

Mientras que la demanda de productos agrícolas aumenta cada vez más, los recursos hídricos se van regenerando de forma natural a un ritmo menor cada año, siendo estos un factor limitante. A su vez, esto conduce a un aumento de la escasez de agua, factor principal que impide el correcto desarrollo de la agricultura de regadío. La agricultura intensiva juega un papel decisivo para la obtención de productos agrícolas. Sin embargo, esta continua intensificación de la producción agrícola puede hacer que la disponibilidad de agua anual se vea mermada, tal y como está ocurriendo en la actualidad.

Debido a esta situación, se han puesto en marcha numerosos proyectos que estudian la innovación en el riego, basados en el empleo conjunto de aguas de distinta procedencia con el objetivo de hacer frente a su escasa disponibilidad. Una de ellas se basa en el uso de recursos hídricos no convencionales, que difieren de los empleados habitualmente en la agricultura (aguas superficiales). Entre estos recursos destacan (i) el agua marina desalinizada (DS), (ii) las aguas subterráneas o salobres y (iii) las aguas regeneradas. Dichos estudios se centran en España e Israel principalmente, aunque se trata sin ninguna de duda de una gran oportunidad para que aquellos lugares con un clima más árido opten por una elevada tecnificación de los sistemas agrícolas. (Martínez Alvarez et al., 2014).

En primer lugar, el agua regenerada es una de las alternativas más viables. Se trata del resultado del agua residual depurada y sometida a un tratamiento de desinfección adicional con el fin de obtener un recurso adecuado para el riego. A pesar de ello, las características del agua regenerada puedan variar en función del lugar de captación y del tiempo. Así mismo, su calidad puede sufrir continuas variaciones ya que depende de diferentes factores como son el tratamiento depurador, tratamiento terciario al que es sometida, o el origen de la misma.

El empleo de agua regenerada puede ser de gran interés en agricultura, pues en algunas ocasiones, esta agua puede presentar elevados niveles de potasio, sobre todo, y también de nitrógeno y fósforo. A pesar de ello, requieren de análisis de agua periódicos con el objetivo de conocer valores como conductividad eléctrica, pH y contenido de nutrientes. (Segura y Fernández, 2014).

El DS es un agua caracterizada por su baja salinidad y mineralización, presentando elevadas concentraciones de Na^+ y Cl^- e ínfimas concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Estas características hacen que el AM sea un agua totalmente diferente a las aguas convencionales (Martínez-Alvarez et al., 2019). Las elevadas concentraciones de Na^+ y Cl^- son el principal inconveniente de este tipo de agua ya que, además de la posible de sodificación de suelo existente, suponen un riesgo de toxicidad para el cultivo. Sin embargo, a pesar de sus bajas concentraciones el SO_4^{2-} actúa sobre la actividad fotosintética ya que actúa sobre el contenido de clorofilas, el Mg^{2+} es imprescindible en el proceso de la fotosíntesis y el Ca^{2+} interviene en el crecimiento de las raíces. (Martínez-Alvarez et al., 2014).

El bajo nivel de mineralización y salinidad hacen que regar con este tipo de agua pueda originar graves problemas en el cultivo. Es por esto por lo que surge la opción de remineralizar el AM con el fin de mejorar su calidad y reducir los posibles efectos adversos sobre el cultivo.

Finalmente, las investigaciones llevadas a cabo se están centrando también en el empleo de aguas regeneradas. El agua salobre es aquella que presenta más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. De forma técnica se puede decir que el agua salobre contiene entre 1.000 y 15.000 mg/L, en tanto que el agua dulce presenta valores máximos de 500 mg/L y el agua de mar 35.000 mg/L (Alghoul et al., 2009). En cuanto a su composición, esta depende de su origen principalmente. Se trata de aguas duras, con valores entre 1.500-3.000 mg/L de CaCO_3 y elevadas concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y Na^+ (Alghoul et al., 2009).

1.4. La fertirrigación

La fertirrigación consiste en el aporte de los nutrientes necesarios por el cultivo a través del agua de riego. A lo largo de la historia, la fertirrigación ha sido empleada con éxito a través del riego por gravedad y aspersión. Sin embargo, esta es de especial utilidad en el riego localizado. (MAPA, 2023). El empleo de la fertirrigación posee numerosas ventajas, como el aporte del agua y los nutrientes de forma totalmente localizada en la zona de absorción de las raíces, la posibilidad de establecer diferentes planes de riego y fertilización en función del estado fenológico del cultivo, o la posibilidad de corregir de forma rápida cualquier deficiencia nutritiva del cultivo. Pero entre todas estas ventajas, destacan su capacidad para aumentar la eficiencia en el uso de los fertilizantes al realizar una nutrición equilibrada, y el aumento de los rendimientos del cultivo. Esto permite

reducir la aplicación de fertilizantes, y con ello, una disminución de los costes asociados a la nutrición del cultivo y del impacto ambiental ocasionado sobre el ecosistema agrícola. (Pomares-García, 2004)

Esta técnica depende de la interacción de cuatro elementos: el cultivo, el sustrato, el agua de riego y los fertilizantes. Con el fin de aplicar la cantidad adecuada de fertilizante en cada riego, es necesaria la elaboración de planes de fertirriego precisos y específicos para cada cultivo y región. Dicha precisión resulta, en algunas ocasiones, difícil de lograr debido a que se deben de considerar gran multitud de factores en el proceso, como las curvas de absorción de los diferentes fertilizantes por parte de los cultivos, las posibles correcciones debido al aporte de nutrientes de las enmiendas orgánicas, o el sistema de inyección de fertilizante empleado.

Por otra parte, para que se pueda realizar un aporte de manera homogénea de los distintos, es necesaria la instalación de un cabezal de riego junto a un sistema de riego presurizado y un sistema de filtros. Las necesidades de los distintos macronutrientes, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio, será diferente en función del cultivo del que se trate. Esta demanda va a depender además de otros factores como son el tipo de cultivo, estado del suelo, climatología, etc. Es por esto por lo que se debe elegir aquel fertilizante que, según su forma, solubilidad, interacción con el agua de riego y corrosividad, se adapte mejor a las circunstancias del cultivo. Otro aspecto de gran importancia es el grado de compatibilidad entre los diferentes fertilizantes empleados, pues tal y como se expone en la figura siguiente, existen fertilizantes incompatibles entre sí. Una vez que se han calculado las dosis requeridas, se seleccionará el tipo de dosificación empleado, siendo las más comunes la dosificación cuantitativa y la proporcional.

Tabla 1. Compatibilidad entre los distintos fertilizantes. Fuente: PortalFrutícola (2023).

ABONOS	Sulfato Amónico	Urea	Nitrato Cálcico	Nitrato Potásico	Fosfato Monoamónico	Acido Fosfórico	Sulfato Potásico	Urea Fosfato	Acido Nítrico	Nitrato Amónico
Sulfato Amónico		X	I	C	I	I	C	X	C	C
Urea	X		X	X	X	X	C	C	C	X
Nitrato Cálcico	I	X		X	I	I	I	I	C	I
Nitrato potásico	C	X	C		C	C	C	X	C	C
Fosfato Monoamónico	I	X	I	C		C	C	C	C	C
Ácido Fosfórico	I	X	I	C	C		C	C	C	X
Sulfato Potásico	C	C	I	C	C	C		C	C	C
Urea Fosfato	X	C	I	X	C	C	C		C	X
Ácido Nítrico	C	C	C	C	C	C	C	C		C
Nitrato Amónico	C	X	I	C	C	X	C	X	C	

1.5. Los cabezales de riego

El cabezal de riego es el conjunto de sistemas encargados de filtrar, gestionar y suministrar agua a la red de riego (Novagric, 2023). Este sistema está conformado por el equipo de bombeo, el equipo de filtrado, el equipo de inyección de fertilizantes y el equipo de control. En primer lugar, el equipo de bombeo es el encargado de aportar el caudal de agua a una presión determinada, específica para una configuración concreta de la red de riego. Por otro lado, el equipo de filtrado se encarga de acondicionar el agua para evitar así obturaciones en los emisores, reduciendo la presencia de partículas sólidas presentes en el agua. El equipo de fertilización es el encargado del aporte de fertilizantes al agua de riego, aunque permite también aportar desinfectantes o fungicidas en algunos casos. Este sistema puede estar compuesto por un tanque de fertilizante conectado a la propia tubería principal, un inyector Venturi, o por un sistema de inyección de pequeñas bombas (Quizhpe-Pineda, 2010). La distribución de estos sistemas de elementos que componen un cabezal de riego se muestra en la siguiente figura.

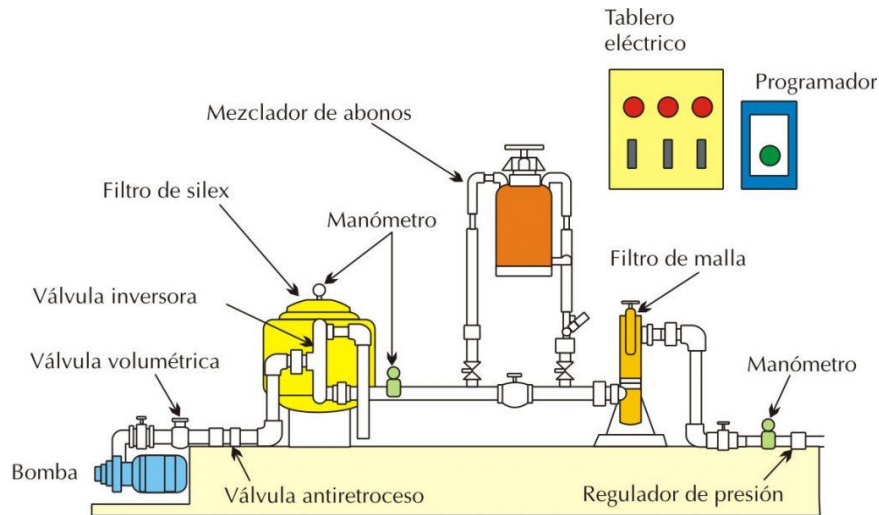


Figura 2. Esquema de los equipos que componen un cabezal de riego. Fuente: PortalFrutícola (2019)

Además de los diferentes sistemas y equipos mencionados, el cabezal de riego debe de contar con un equipo de control. Este está compuesto por válvulas hidráulicas y volumétricas y reguladores de presión, entre otros elementos, y permiten accionar o interrumpir el riego en el momento deseado y/o programado. Debido al avance tecnológico es cada vez más común la presencia de elementos programadores de riego en los cabezales, que controlan de forma autónoma desde la apertura de electroválvulas y el arranque o cese del sistema de bombeo, hasta el control de la inyección de fertilizantes, pH y conductividad eléctrica de riego, es decir, permiten la automatización del sistema de riego a través del empleo de elementos de control.

A la hora de realizar la instalación de los diferentes componentes que conforman el cabezal de riego, es importante tener en cuenta la superficie de riego, el tipo de riego y fertilización, las condiciones de la fuente del agua de riego y las necesidades del agricultor. La superficie de riego es un factor relevante, ya que dependiendo de la misma varían las necesidades de caudal, de manera que la selección del equipo de bombeo dependerá de forma directa del tamaño de la explotación y organografía del terreno. El origen y condiciones de la fuente de agua para el riego determinarán el sistema de filtrado necesario, así como el empleo o no de una instalación de bombeo. Finalmente, los sistemas que conforman el cabezal de riego dependen también del grado de automatización deseado.

En la actualidad, la gran mayoría de sistemas de riego empleados siguen siendo “rudimentarios”, debido a la baja adopción de tecnología y herramientas por parte de los agricultores (Bondesan et al., 2023). Por lo que los sistemas inteligentes deben ser más

accesibles y fáciles de usar para impulsar a que los agricultores los adopten (Li y Wang, 2021).

El cálculo de la dosis de fertilizante y el tiempo de riego se basa generalmente en la experiencia del agricultor y la documentación disponible (Barry- Stelljes, 2000; Mainardis et al., 2022). Y es que, a partir de estudios recientes, se ha demostrado que los agricultores se basan principalmente en los siguientes métodos a la hora de elaborar un plan de fertirriego: (i) métodos de estimación de la evapotranspiración de cultivos (FAO56 Penman Monteith; Allen et al., 1998), (ii) recomendaciones de la literatura sobre requisitos de nutrientes (Mainardis et al., 2022), (iii) algunos sensores de suelos y plantas (Gallardo et al., 2020) y (iv) en controladores de pH y CE en cabezales de riego (Zaman et al., 2018).

1.6. Cabezales de riego tecnificados

La integración de sistemas y la interoperabilidad son conceptos clave cuando se trata de hacer funcionar un cabezal de riego tecnificado de forma autónoma. En este contexto, el término "interoperabilidad" se refiere a la capacidad de diferentes elementos o componentes de un sistema para trabajar juntos y compartir información de manera efectiva.

En un sistema de riego tecnificado autónomo, varios componentes deben integrarse para lograr un funcionamiento fluido y eficiente. Estos componentes pueden incluir:

1. *Sensores*: Los sensores son dispositivos que recopilan datos del entorno, como la humedad del suelo, la temperatura o la radiación solar. Estos sensores pueden estar conectados al cabezal de riego y proporcionar información en tiempo real sobre las condiciones del suelo y las necesidades de riego.
2. *Actuadores*: Los actuadores son dispositivos que responden a las señales o comandos del sistema y realizan acciones específicas. En el caso de un cabezal de riego, los actuadores pueden controlar la apertura y cierre de las válvulas de riego, la activación de las bombas de agua u otras acciones relacionadas con la distribución del agua.
3. *Controladores*: Los controladores son el "cerebro" del sistema de riego tecnificado. Recopilan datos de los sensores, procesan la información y toman decisiones sobre cuándo y cuánto regar. Los controladores también pueden

comunicarse con otros componentes del sistema para coordinar las acciones necesarias.

4. *Comunicación:* La comunicación efectiva entre los diferentes elementos del sistema es esencial. Puede implicar el uso de tecnologías como redes inalámbricas, protocolos de comunicación estándar y sistemas de transmisión de datos. La información recopilada por los sensores debe transmitirse al controlador, y las instrucciones del controlador deben llegar a los actuadores de manera confiable.

La interoperabilidad entre estos componentes se logra mediante la definición de estándares de comunicación y protocolos que permiten la compatibilidad y el intercambio de información entre ellos. Al seguir estos estándares, diferentes fabricantes pueden desarrollar componentes que funcionen juntos de manera efectiva, lo que facilita la construcción de sistemas de riego tecnificado autónomos.

Es importante destacar que la integración de sistemas y la interoperabilidad también pueden implicar desafíos técnicos y de compatibilidad. La elección adecuada de los componentes, la planificación cuidadosa de la infraestructura y la consideración de los requisitos de comunicación son aspectos clave para asegurar una integración exitosa y un funcionamiento autónomo del cabezal de riego tecnificado.

1.7.2. Softwares de tecnificación

Pese a estos avances, los planes de fertirriego son elaborados por el agricultor a partir de la bibliografía disponible. La elaboración de un plan de fertirriego óptimo es una pieza fundamental a la hora de establecer un uso eficiente de los recursos empleados; es por ello por lo que actualmente se han desarrollado diferentes softwares o modelos informáticos que permiten ayudar al agricultor en la toma de estas decisiones. Entre estos avances destaca Os Ecofert, una nueva aplicación para Android que permite determinar la combinación de fertilizantes óptima, en la que tiene en cuenta factores como el precio de los fertilizantes con el fin de minimizar el coste total del fertirriego.

Además, el uso del agua desalinizada (DS) en la agricultura está en un continuo aumento, lo que está originando problemas de fitotoxicidad, deficiencias nutricionales, así como un

aumento de los costes debido a su elevado precio. Esto hace necesario el desarrollo e implementación de sistemas que faciliten al agricultor el riego con agua de distinta procedencia. Entre los diferentes softwares que se han desarrollado para ello destaca el software GARUM (Gestión óptima del uso de Aguas de Riego de calidades no Uniformes de invernaderos Mediterráneos), con el que se determina la combinación de agua salada y desalinizada de la forma más eficiente, económicamente hablando, y óptima para el cultivo.

No obstante, recientemente se ha desarrollado y presentado el software llamado Irriblend-DSW (Gallego-Elvira et al., 2021) con una evolución significativa. Este software está destinado a conseguir la combinación más eficiente de los distintos tipos de agua que el agricultor tenga disponibles, incluyendo el agua marina desalinizada (DS). La evolución de este programa reside en la posibilidad de determinar la cantidad idónea de fertilizantes que se han de aplicar para la combinación de aguas obtenidas. Para lograr esto, el software tiene en cuenta el aporte mineral que se lleva a cabo a través de las características físico-químicas de los diferentes tipos de agua empleados en el riego. Estos softwares surgen con el fin de facilitar el empleo de aguas mezcla (AM) y desalinizada en el riego, a pesar de ello, este se puede utilizar de igual manera para cualquier tipo de agua conociendo las características.

Los cabezales de riego ejercen un papel fundamental en la agricultura intensiva de la actualidad, por lo que, con el fin de desarrollar una agricultura más eficiente y óptima, estos requieren de nuevas tecnologías que ayuden a conseguirlo.

El algoritmo desarrollado y validado en el siguiente trabajo combina varios de los elementos de tecnificación ya desarrollados junto con elementos innovadores. Elabora planes de fertirriego óptimos teniendo en cuenta la composición de los fertilizantes disponibles por el agricultor y el tipo de agua con el que se riega. A diferencia de otros softwares, este no presenta una base de datos de fertilizantes, la composición de los fertilizantes disponibles se debe introducir en el algoritmo. De esta forma el agricultor no depende de una lista concreta de fertilizantes, pudiendo utilizar cualquier fertilizante comercial. Además, permite el riego con cualquier tipo de agua, ya que tiene en cuenta los nutrientes que se aplican únicamente con el agua a la hora de determinar los nutrientes que se deben aportar por medio de fertilizantes. Esto se consigue mediante la incorporación al algoritmo de un análisis físico-químico del agua o de los distintos tipos de aguas disponibles.

El algoritmo desarrollado se caracteriza por su elevado grado de personalización respecto al cultivo, pues este puede ser programado para condiciones muy diferentes entre sí y concretas. Además de ello, este presenta una autonomía mayor, así como un mayor control de los fertirriegos debido a su implementación en una aplicación web.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los principales objetivos del estudio son:

- Evaluar un algoritmo capaz de elaborar de forma autónoma un plan de fertirriego óptimo y adaptado a cada cultivo y al sistema de riego disponible en parcela
- Implementar el algoritmo en una aplicación web para controlar y programar un fertirriego autónomo y óptimo.
- Evaluar técnicamente la capacidad y precisión de un cabezal de riego inteligente para el suministro de diferentes aguas de riego y fertilizantes, así como su interoperabilidad con el algoritmo encargado de la programación del fertirriego.
- Evaluar económicamente el sistema de riego, considerando el uso de distintos tipos de agua de riego y fertilizantes.

En este contexto, en el estudio se consideraron las siguientes hipótesis iniciales:

- La precisión del cabezal de riego para inyectar una cantidad determinada de agua y fertilizante no ha sido evaluada hasta el momento.
- El empleo de aguas y fertilizantes de diferentes orígenes y características físico-químicas puede provocar interacciones entre los distintos elementos y compuestos que las conformen.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Parcela experimental, fertilizantes y recursos hídricos

El estudio experimental fue llevado a cabo en una finca comercial de cítricos de 3,18 hectáreas. Está localizada en Torre Pacheco, Región de Murcia, España (37°47'30" N; 1°03'85" W; 30 m sobre el nivel del mar). Esta zona presenta un clima semiárido caracterizado por un verano caluroso y seco e inviernos con temperaturas suaves. En cuanto a la tasa de precipitaciones, se dan intensas lluvias esporádicas durante el otoño, por lo que los cultivos dependen exclusivamente del riego.

El ensayo experimental se llevó a cabo en una superficie delimitada de la finca de 0,28 hectáreas, conformada por 144 árboles de pomelo, *Citrus x paradisi*, var. Rio Red de 3 años de edad.

La validación técnica del cabezal de riego se llevó a cabo mediante el empleo de diferentes tipos de agua que disponibles en la finca, presentando cada una de ellas presentaba físico- químicas variables:

- Agua desalinizada (DS), procedente de la desaladora costera situada en Escombreras (Cartagena), a unos 30 kilómetros de la finca experimental.
- Agua procedente de la Comunidad de Regantes (CR), proporcionada por el canal de agua dulce Tajo-Segura.
- Agua mezcla (AM), obtenida como resultado de la mezcla de los dos tipos de agua anteriores en las mismas proporciones (50% DS + 50% CR).

Tabla 2. Valor de las propiedades físico-químicas y precio de los recursos hídricos empleados durante los ensayos.

TIPO DE AGUA	PRECIO (€/m³)	pH	EC (dS/m)	Cl⁻ (mg/L)	NO₃⁻ (mg/L)	PO₄³⁻ (mg/L)	NH₄⁺ (mg/L)	K⁺ (mg/L)	Ca²⁺ (mg/L)	Mg²⁺ (mg/L)	Na⁺ (mg/L)	B (mg/L)
DS	0,60	8,3 ± 0,2	1,0 ± 0,1	315,9 ± 63,7	2,6 ± 1,0	2,9 ± 2	0,0 ± 0,0	8,2 ± 0,8	35,1 ± 12,4	12,5 ± 8,0	190,2 ± 38,5	0,9 ± 0,1
AM	0,48	8,0 ± 0,1	1,2 ± 0,2	261,5 ± 14,9	4,1 ± 0,9	2,9 ± 2,0	0,0 ± 0,0	7,2 ± 0,8	49,4 ± 15,1	20,8 ± 8,9	154,5 ± 18,6	0,6 ± 0,1
CR	0,35	7,7 ± 0,2	1,4 ± 0,2	187 ± 38,5	5,4 ± 1,7	3,8 ± 1,2	0,0 ± 0,0	6,4 ± 2,4	63,5 ± 12,8	32,2 ± 9,2	117,9 ± 27,9	0,4 ± 0,1

Finalmente, los macronutrientes y micronutrientes fueron aplicados a través de una serie de fertilizantes de uso común en la zona de estudio y adquiridos a partir de diferentes

proveedores locales. Para la validación del fertirriego, se prepararon cinco cubas de abono simple compuestas por agua y fertilizante. Los fertilizantes empleados fueron los siguientes: nitrato cálcico ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), nitrato potásico (KNO_3), nitrato amónico (NH_4NO_3), nitrato magnésico ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$) y ácido fosfórico (H_3PO_4). La Tabla 3 muestra las principales características físico-químicas de los fertilizantes empleados, además de sus precios.

Tabla 3. Propiedades físico-químicas y precio de los diferentes fertilizantes empleados en los ensayos.

Fertilizante comercial	Fórmula química	N-P-K + Ca + Mg riquezas	Masa molecular (g/mol)	Densidad (g/L o kg /m3)	Precio (EUR/L o EUR/kg)
Ácido fosfórico	H_3PO_4	0-52,5-0	98,00	1580	0,66
Nitrato potásico	KNO_3	13,5-0-46,2	101,1	2110	0,88
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	34,5-0-0	80,04	1720	0,36
Nitrato de magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	7-0-0 + 9,5 MgO	256,41	2300	0,57
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	15-0-0 + 26 CaO	164,09	2500	0,44
Ácido nítrico	HNO_3	12-0-0	63	1325	0,41
<i>Unicquel</i> (Quelato de hierro)	–	Fe 6%	–	460	6,90
Lanzadera de cobre	–	Cu 6,13%	–	1287	8,50
<i>Vitaséve</i> (Bioestimulante con micronutrientes)	–	MgO 5% + Mo 0,1% + B 0.2% + Mn 0,5% + Zn 0,5%	–	1210	9,00

3.2. El cabezal de riego tecnificado

En el estudio se implementó un cabezal de riego tecnificado con la finalidad de obtener una dosificación autónoma y precisa de fertilizantes a través de un sistema de riego por goteo, con un programa de optimización de la empresa “NutriControl”. En cuanto a las especificaciones técnicas del cabezal de riego, este presentó unas dimensiones de 1,6 metros de altura, 2,25 metros de longitud, 1,125 metros de anchura, y un peso de 200 kg aproximadamente.



Figura 3. Cabezal de riego experimental. (A) Sistema de bombeo; (B) Sistema de filtrado; (C) Subsistema hidráulico; (D) Autómata de control.

El cabezal de riego contó con tres sistemas principales: (i) sistema de bombeo, (ii) sistema de filtrado y (iii) sistema de fertirrigación. La disposición de cada uno de estos sistemas se puede observar en la Figura 3.

- El sistema de filtrado lo integra un filtro de anillas de limpieza manual comercializado por la empresa “Nutricontrol Automatic Fertigation & Climate Control”. Este es capaz de filtrar caudales de hasta 30 m³/h, ya que cuenta con una superficie de filtrado de 1198 cm² y un grado de filtrado de 130 micrones.
- El sistema de bombeo está compuesto por una bomba única EH 9/3 de 50 Hz de la marca “Franklin Electric”. La bomba tiene la capacidad de aportar hasta 28 m³/h a una presión de 3,5 bar. Presenta además un caudalímetro WS-NKP horizontal suministrado por la empresa “APATOR POWOGAZ”.
- El sistema de fertirrigación es el elemento principal y más novedoso del cabezal de riego. Este cuenta con tenía cinco tanques cerrados de fertilizantes y ácido de polietileno (PE) (125 L), un agitador de aire monofásico (1,4 kW, 2500 rpm) para facilitar la disolución de los fertilizantes, cinco caudalímetros con un caudal máximo de 1500 L/h (señal continua de fluido con 1000 pulsos por litro) y cinco inyectoros Venturi con 500 metros L/h, válvulas solenoides de giro de 4 mm y válvulas manuales y unidireccionales. Este tiene como objetivo principal aplicar agua y fertilizantes al cultivo en el momento óptimo, con una presión y

homogeneidad muy elevadas. A su vez, este sistema de fertirrigación está compuesto por una serie de subsistemas que se exponen a continuación:

- *Subsistema eléctrico*: este lo forman los dispositivos de protección eléctricos del sistema y accionamientos de control de maniobra del subsistema hidráulico.
- *Subsistema hidráulico*: este subsistema hidráulico está constituido por los colectores de entrada y salida del agua de riego a tratar, el colector con sondas de pH y CE, electrobomba y las líneas de inyección de abono y fertilizante (con un caudal de 300 l/h). Todas ellas se disponen sobre una estructura de acero inoxidable.
- *Autómata de control*: es el encargado de la gestión de la fertirrigación, así como de la interfaz del usuario y de la comunicación de todo el sistema con el cloudserver. El diseño de este automático de control se basa en una unidad micro procesadora interconectada con las tarjetas de entradas y salidas del sistema con las que interactúa con los sensores y actuadores.

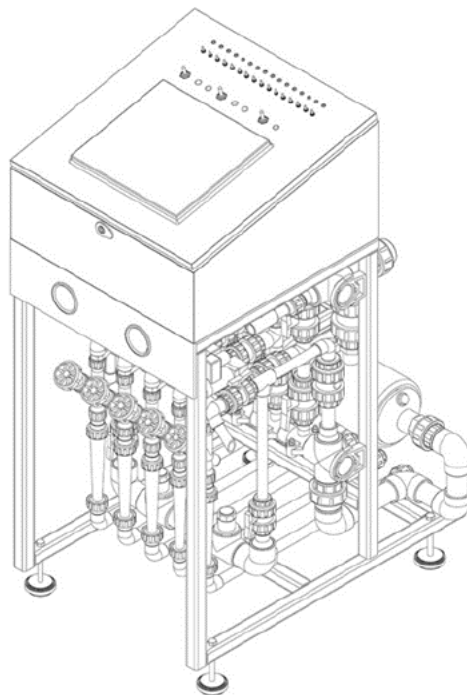


Figura 4. Esquematación del sistema de fertirrigación del cabezal de riego. Fuente: Nutricontrol (2023).

3.3. Programa para la optimización del fertirriego

El programa de fertirrigación fue desarrollado con el objetivo de suministrar de forma precisa diferentes concentraciones de fertilizante bajo diferentes condiciones de calidad de agua, así como reducir el consumo tanto de agua como de fertilizantes.

En la finca experimental, los agricultores emplean agua desalinizada sola, o combinada con otros recursos, dependiendo de la disponibilidad. Por lo que el sistema de fertirriego debe de estar capacitado para poder trabajar con fluctuaciones en la composición del agua de entrada.

3.3.1. Algoritmo de fertirrigación experto

El algoritmo de fertirrigación experto permite conocer la mezcla y la concentración óptima de fertilizante, en función del agua de riego de la que se disponga, para planificar el fertirriego. Este algoritmo es ejecutado a través del software informático Nutribalance, el cuál se encuentra en la web de NutriControl. Es en este programa NutriBalance en el que el agricultor introduce todos los datos necesarios, y el propio programa calcula las cantidades de abono que deben de tener las cubas de abono. Una vez que el agricultor introduce dichas cantidades de fertilizante en las cubas, el programa vuelve a calcular las cantidades de fertilizante que se debe de inyectar de cada cuba en cada uno de los riegos para suplir las necesidades específicas de un cultivo. En la siguiente figura se muestra el esquema del proceso efectuado para la elaboración del algoritmo.

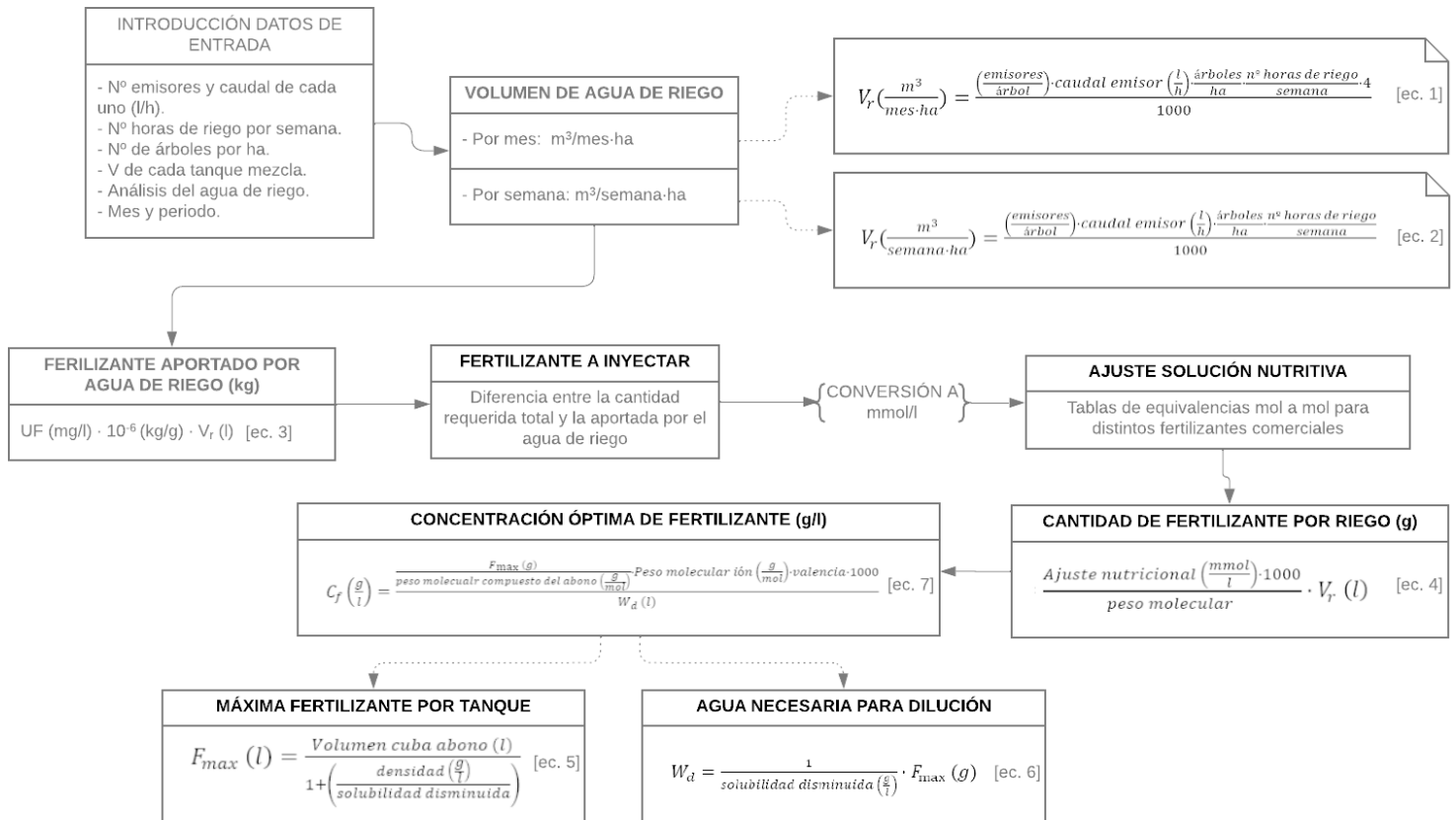


Figura 5. Esquematación del proceso de ejecución del algoritmo empleado.

El proceso llevado a cabo para la ejecución del algoritmo es el mostrado a continuación:

1. Datos de partida para:

- Características técnicas del sistema de fertirrigación e hidráulico. Estas características incluyen:
 - Número de goteros por árbol
 - Caudal de cada emisor (l/h)
 - Número de árboles por hectárea
 - Número de horas de riego por semana
 - Volumen de cada tanque de mezcla (l).
- Datos de la estación meteorológica y coeficiente de cultivo para calcular la FAO Penman-Monteith ET₀ (Allen et al., 1998).
- Análisis físico y químico del agua de riego, indicando la composición iónica.
- Necesidades nutricionales de los cultivos, extracciones nutricionales del cultivo según su estado fenológico.

- Inventario de los abonos comerciales disponibles, indicando su precio y propiedades físico-químicas.
 - Restricciones del usuario: valores máximos de pH o CE en la solución nutritiva.
2. Primeramente, se realiza el cálculo de las necesidades de agua y el tiempo de riego. Las necesidades semanales de agua del cultivo se calculan como la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ET_c) siguiendo el método del coeficiente de cultivo (Allen et al., 1998) menos las precipitaciones (P). El requerimiento bruto de agua por planta (NG, L/planta/día) se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de uniformidad (UC, %) y la relación de transpiración (T_r , adimensional) de la siguiente manera:

$$NG = \frac{\sum ET_c - R}{UC} * \frac{1}{Tr * 100} \quad [\text{ec. 1}]$$

Por lo tanto, el tiempo mínimo de riego, T_a (h), se calcula mediante el empleo de la ecuación siguiente:

$$Ta = \frac{NG}{\left(\frac{N_{goteros}}{\text{árbol}}\right) * Q_{gotero}} \quad [\text{ec. 2}]$$

Donde $N_{Goteros}$ es el número de goteros empleados por árbol y Q_{Gotero} es el caudal de cada uno de los goteros (L/h).

3. Para determinar el volumen de agua de riego, se contabiliza el agua de riego y volumen conformado por los abonos a inyectar. El volumen de agua de riego puede ser expresado tanto en m^3 por mes y hectárea de riego, como en m^3 por semana y hectárea de riego. Las ecuaciones empleadas para ello son las siguientes:

- Por mes:

$$Vr \left(\frac{m^3}{\text{mes} * \text{ha}} \right) = \frac{\left(\left(\frac{\text{emisores}}{\text{árbol}} \right) * \text{caudal emisor} \left(\frac{l}{h} \right) * \left(\frac{\text{árboles}}{\text{ha}} \right) * \left(\frac{n^{\circ} \text{ horas de riego}}{\text{semana}} \right) * 4 \right)}{1000}$$

[ec. 3]

➤ Por semana:

$$Vr\left(\frac{m3}{semana * ha}\right) = \frac{\left(\left(\frac{emisores}{\text{árbol}}\right) * caudal\ emisor\ \left(\frac{l}{h}\right) * \left(\frac{\text{árboles}}{ha}\right) * \left(\frac{n^o\ horas\ de\ riego}{semana}\right) * 4\right)}{1000}$$

[ec. 4]

4. Se realiza una selección de la mejor combinación de abonos comerciales teniendo en cuenta la composición de la mezcla de agua. Se utiliza el algoritmo de optimización descrito en Martínez-Alvarez et al., 2020, que determina el tipo y la cantidad de fertilizante comercial que puede proporcionar los nutrientes necesarios a un costo mínimo. El algoritmo utiliza una minimización restringida con programación secuencial de mínimos cuadrados para minimizar la función de costo considerando las restricciones de CE y pH proporcionadas por el usuario.
5. Volumen específico de agua y abono en cada depósito de abonos. La concentración final de cada abono en el depósito se calculará como sigue:

$$Fmax(L) = \frac{V\ tanque}{1 + \left(\frac{\rho\ fertilizante}{SM}\right)}$$

[ec. 5]

Donde, F_{max} es la cantidad máxima de fertilizante por tanque (L), V_{tanque} es el volumen del tanque (L), ρ es la densidad del fertilizante (g/ L) y SM es la solubilidad mínima del fertilizante (g/ L).

$$Ar(L) = \left(\frac{1}{SM}\right) * Fmax * \rho$$

[ec. 6]

Se calcula Ar, que es la cantidad de agua requerida para diluir el fertilizante.

6. Seguidamente, se calculan las cantidades de los diferentes fertilizantes comerciales que se vayan a emplear. Para ello, es necesario realizar un ajuste de la solución nutritiva a partir de los aportes nutricionales necesarios (mmol/L) calculados anteriormente. Este ajuste debe de efectuarse mol a mol, con la ayuda de una tabla de equivalencias como la que se muestra a continuación.

Tabla 4. Equivalencias mol a mol para diferentes fertilizantes simples comerciales.

	NO3-	H2PO4	SO42-	HCO3-	NH4+	K+	Ca+2	Mg+2
H3PO4		0,75		1				
HNO3	1			1				
Ca (NO3)2	2						1	
KNO3	1					1		
NH4NO3	1				1			
K2SO4			1			2		
NH4H2PO4		1			1			
KH2PO4		1				1		
Mg (NO3)2	2							1

7. La cantidad de cada uno de los fertilizantes comerciales que se aportan al cultivo a través del sistema de inyección en un riego en concreto, se calculan a partir de la siguiente expresión (ec.6), en la que el algoritmo recoge el ajuste nutricional anterior.

$$Cantidad\ de\ fertilizante\ por\ riego\ (g) = \frac{Ajuste\ nutricional\ \left(\frac{mmol}{l}\right) * 1000}{Peso\ molecular} * V_r\ (l)$$

[ec. 7]

8. Donde, C_f es la concentración final de cada fertilizante en el tanque, MW_f es el peso molecular del fertilizante y V es la valencia del ion.

$$c_f\ \left(\frac{g}{l}\right) = \frac{\frac{F_{max}(g)}{Peso\ molecular\ compuesto\ abono\ \left(\frac{g}{mol}\right)} * Peso\ molecular\ ion\ \left(\frac{g}{mol}\right) * Valencia * 1000}{W_d\ (l)}$$

[ec. 8]

9. Finalmente, los volúmenes calculados de agua y fertilizantes se envían al autómata de control. Es importante tener en cuenta que el tanque de fertilizante siempre debe tener la misma concentración de fertilizante (mg/ L) con el fin de realizar un ajuste adecuado del volumen de fertilizante. Por lo tanto, es un parámetro fijo, que el agricultor debe mantener constante al rellenar los tanques de fertilizantes.

3.3.2. Plan de fertirriego en la aplicación web

Una vez que se ha determinado la cantidad óptima de cada fertilizante comercial a emplear en cada fertirriego a través del algoritmo, es necesaria la elaboración de un plan de fertirriego.

Junto a la empresa Nutricontrol, se ha desarrollado una aplicación web en la que se puede integrar el algoritmo desarrollado, así como programar un plan de fertirriego. Esta aplicación web permite que cualquier dispositivo que disponga de conexión a internet tenga la posibilidad de programar los fertirriegos necesarios para los cultivos implantados en una finca. Esto se debe a la comunicación remota existente en el cabezal de riego gracias a aplicación y el controlador “NTC MITHRA HIDRO” del cabezal.

La programación del plan de fertirriego a través de la aplicación web requiere de un procedimiento para poder ser ejecutado. A continuación, se describen detalladamente los pasos a seguir para llevar a cabo la programación del fertirriego.

Una vez que se inicia la aplicación web, lo primero que se puede observar es un mapa satelital en el que se localizan las diferentes válvulas y bombas instaladas que están introducidas en la base de datos del algoritmo. Además, se puede apreciar un escritorio en el que se expone:

- Estado de funcionamiento de las bombas instaladas
- Estado de funcionamiento de las diferentes válvulas
- Gráficas que exponen los valores obtenidos de los distintos parámetros a lo largo del día. En el caso del estudio llevado a cabo, estos valores son únicamente pH y CE.

Ya dentro de la aplicación web, se encuentra también el apartado de “*Programas*”, en el que se pueden elaborar los diferentes programas de riego. Para efectuar dicha programación, es necesario que el usuario introduzca una serie de parámetros necesarios en las distintas pestañas:

1. En primer lugar, a partir de los valores obtenidos a través del algoritmo en Excel, se introduce la cantidad de los diferentes abonos a inyectar en el agua de riego. A la hora de introducir dichos valores en el sistema, este permite hacerlo en distintas magnitudes como son:
 - En *porcentaje*
 - En *tiempo*

- En *volumen* (L/m³)
- Como *aportación especial*

Una de las ventajas de este programador de riego, es que permite un control del abonado en función de diferentes parámetros del agua de riego como son CE o pH, pudiendo establecer valores ideales y desviaciones máximas admitidas.

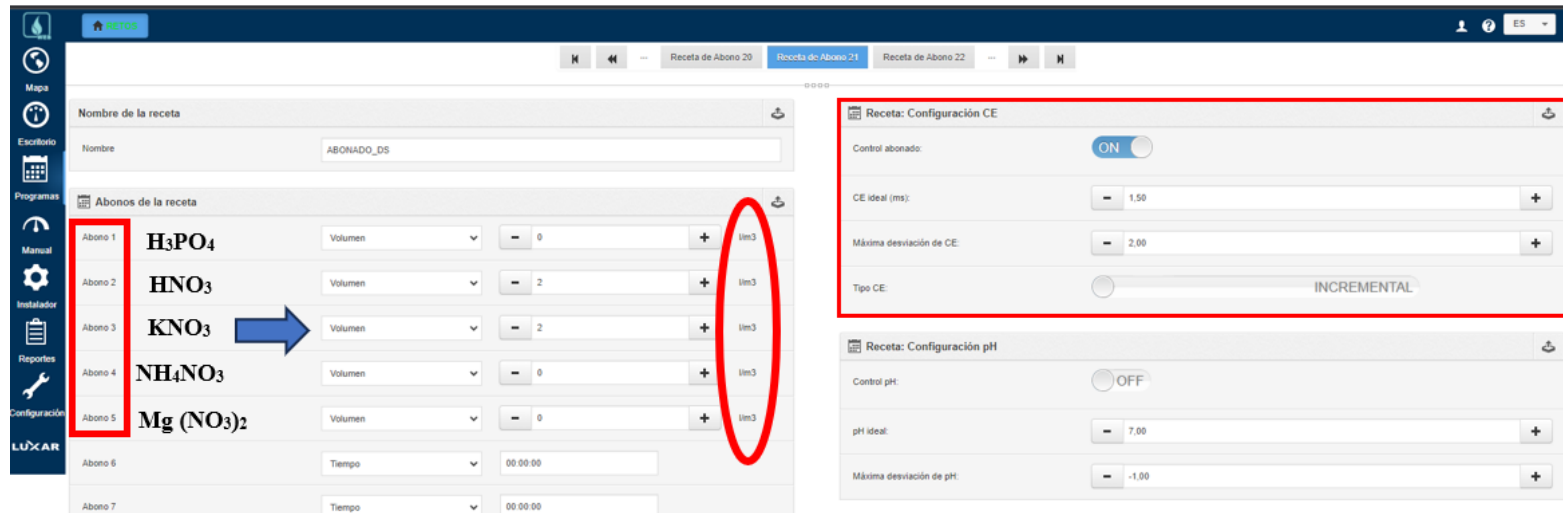


Figura 6. Introducción de los diferentes abonos en el agua de riego en la aplicación web.

- Tras haber introducido la receta de abonado en el programador, el siguiente paso consiste en indicar los sectores en los que se quiere aplicar dicha receta. Para esto, es necesario seleccionar:
 - Las válvulas que definen la agrupación (apertura del tanque de agua adecuado y apertura de las secciones que se quieren regar).
 - La receta de abonado previamente creada para dicha agrupación.
 - Las bombas instaladas que se desean emplear.

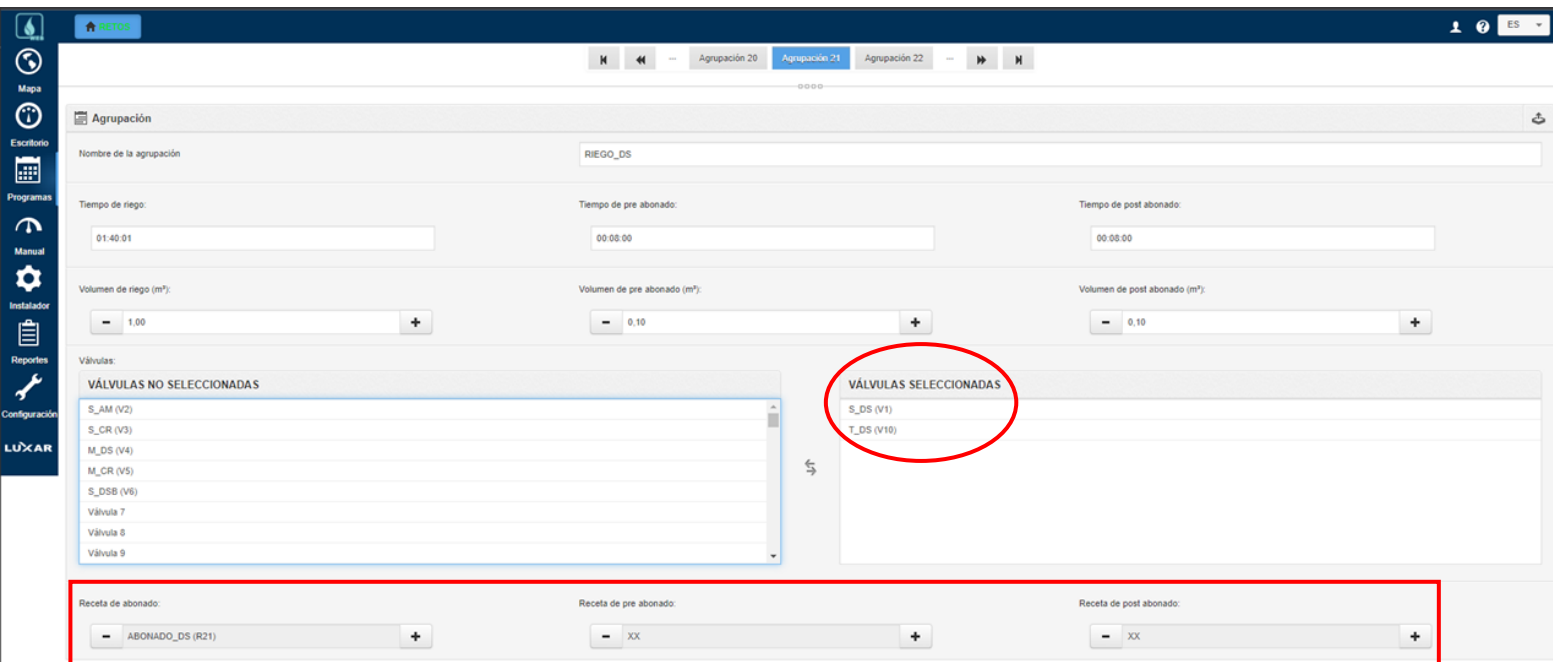


Figura 7. Introducción de los sectores a aplicar receta de abonado en la aplicación web

Para finalizar, es necesario indicar el volumen (m^3) y tiempo (h), tanto de pre-abonado como de post-abonado. Este último es de gran importancia para la limpieza de abono del circuito hidráulico del cabezal de riego y de la agrupación seleccionada.

3. El proceso de programación concluye con el establecimiento temporal del riego, en el que se debe de especificar las fechas de inicio y fin del programa, incluyendo la franja horaria de inicio y fin del riego. Es necesario también seleccionar la agrupación de sectores que se desean regar con dicho programa. Finalmente, se incorporan las condiciones requeridas para la activación del riego como son la fecha, horario, temperatura, humedad, o algún parámetro medido con las sondas instaladas.

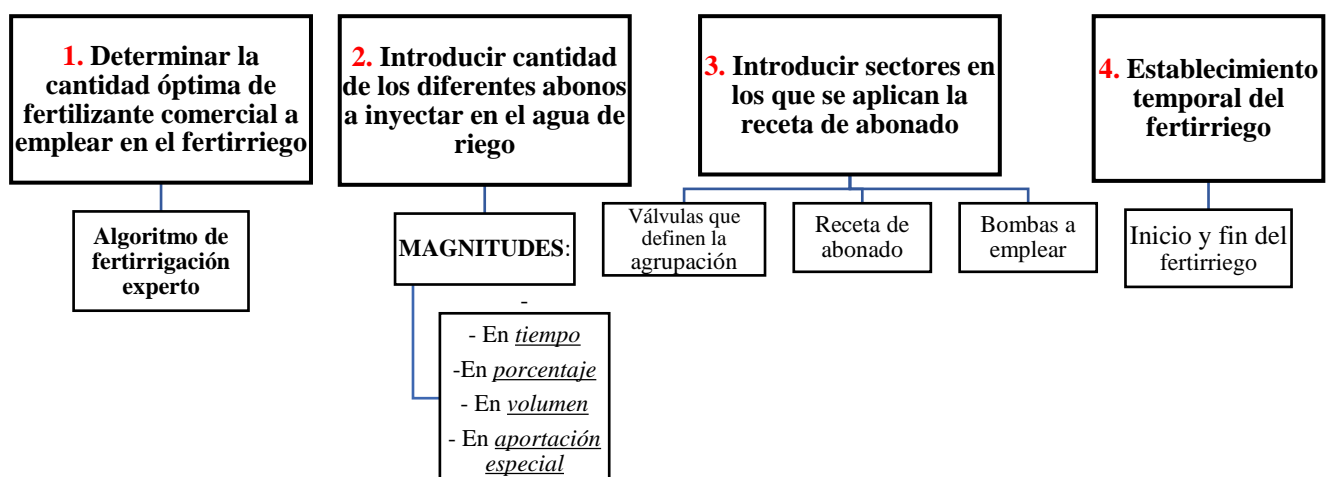


Figura 8. Introducción de los sectores a aplicar receta de abonado en la aplicación web.

3.4. Proceso experimental y evaluación del sistema

En la evaluación técnica se efectuaron un total de 7 ensayos con el fin de determinar la capacidad del sistema para elaborar y desarrollar un plan de fertirriego óptimo y preciso

3.4.1. Pruebas de fertirrigación y analíticas de muestras

Las pruebas de fertirrigación se llevaron a cabo siguiendo las fases mostradas en la Figura 9.

- I. En primer lugar, se establecieron las necesidades nutricionales del cultivo implantado a través del empleo de bibliografía disponible. Estas necesidades son calculadas en función del estado fenológico del cultivo y de la época del año de la que se trate. Estas necesidades se muestran en el Anexo I.
- II. Seguidamente, se fijó el volumen de agua a aportar en el riego, este fue de 1 m³.
- III. El siguiente paso consistió en llevar a cabo la simulación de ajuste nutricional y composición estimada del agua en cada fertirriego (agua + fertilizantes).
- IV. Una vez realizada esta simulación, se procedió a elaborar el programa de fertirriego, estableciendo la receta de abonado, la agrupación de sector/ es a aplicar y el programa para cada tipo de agua disponible, y se realiza la puesta en marcha del equipo de fertirriego. En el programa de fertirriego, se estableció en este caso que el agua iría a un depósito de 1 m³. Esta prueba se efectuó en tres ocasiones, una para cada tipo de agua.
- V. En las diferentes pruebas llevadas a cabo, se recogió una muestra de 0,5 L de cada una de las aguas de entrada disponibles (CR, DS Y AM) desde el depósito de 1m³, siendo estas conservadas en nevera. Una vez recogidas las muestras, el depósito de agua fue vaciado para realizar las siguientes pruebas.
- VI. Las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio del SAIT de la UPCT con el fin de llevar a cabo los análisis de CE, pH y concentración de iones (Cl⁻, NO³⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH⁴⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) a través de cromatografía iónica ((METROHM, Modelo 861 Advanced Compact IC). Estos análisis han sido realizados por el laboratorio del Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

VII. Finalmente, se validó el equipo a través de la comparación entre la composición nutricional estimada en el agua de riego por el algoritmo (Punto 4) y la real generada por medio del cabezal de fertirriego (Punto 7).

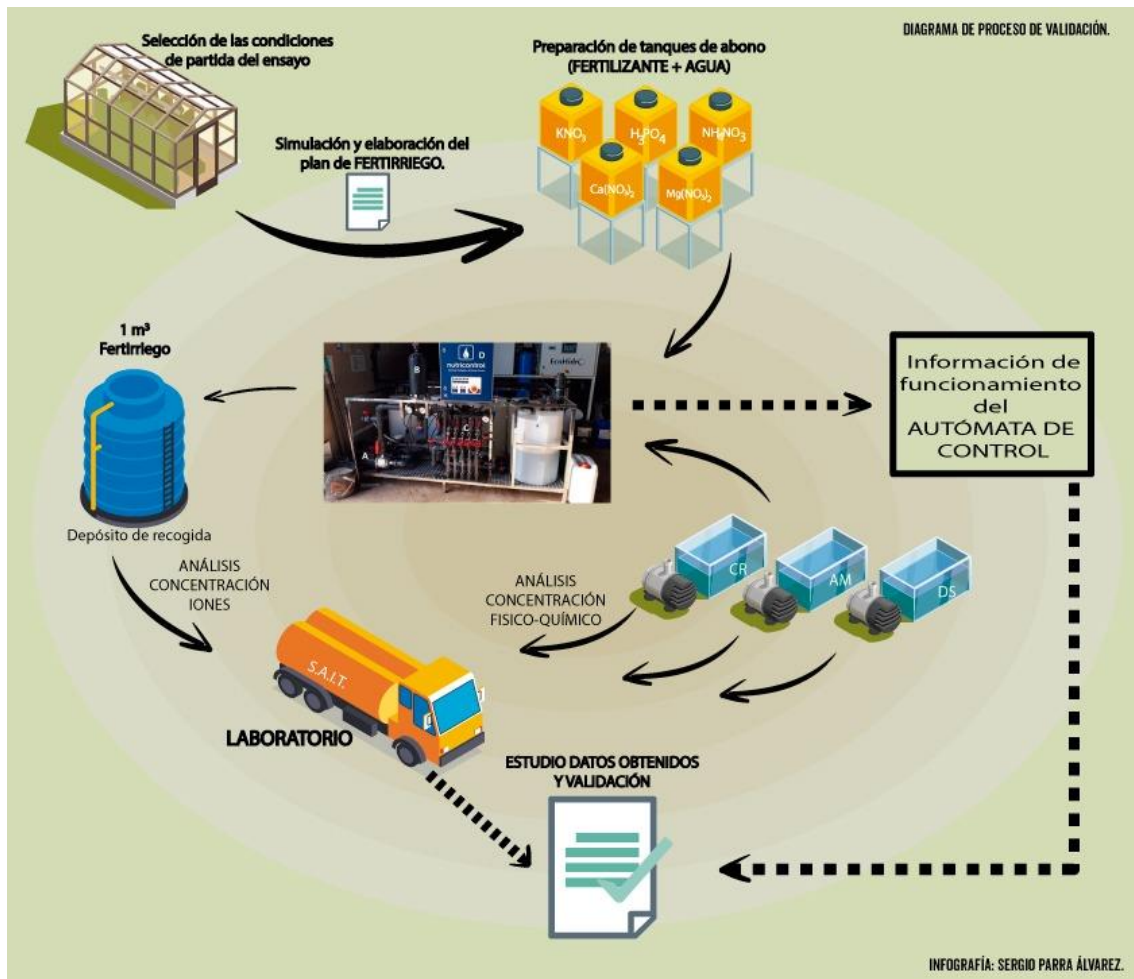


Figura 9. Diagrama del proceso de validación.

3.5. Evaluación económica

En primer lugar, es importante recordar que, a la hora de efectuar esta evaluación económica, se tuvieron en cuenta dos variables: el coste de depreciación del equipo, así como el coste derivado del agua y fertilizantes empleados.

- *Coste de depreciación del equipo*, siendo este un coste fijo.
- *Coste asociado al consumo de agua y fertilizantes*, tratándose este de un coste variable.

Con el fin de calcular los gastos asociados a cada uno de los dos escenarios ya mencionados anteriormente, se establecieron una serie de variables para llevar a cabo dicha evaluación.

Estas variables empleadas en ambos escenarios son las que se muestran en la siguiente figura (Figura 12), y estas son las siguientes:

- *Coste de fertilizantes*. Consiste en el coste asociado a los diferentes fertilizantes utilizados en los ensayos realizados, tal y como se ha explicado ya en apartados anteriores de la evaluación técnica.
- *Coste del agua de riego*. Coste asociado al agua de riego empleada en el sistema de fertirriego. En el caso del Escenario 1, no se diferencia entre los diferentes tipos de agua empleada, mientras que en el caso del Escenario 2 si que se hace (Agua desalada, agua de la comunidad de regantes o agua mezcla).
- *Coste de amortización*, del sistema de fertirriego empleado. Se trata de un coste fijo idéntico para ambos escenarios, este es de 2112,09 EUR/ha.
- *Coste total*, correspondiente a la suma de los tres costes anteriormente mencionados.

Apuntar también que, en este caso, no se incluyeron el coste asociado a la energía ni al mantenimiento del sistema de fertirrigación. En este caso, el caudal medio del sistema experimental fue de 1,2 m³/h. Debido a que se trata de un caudal notablemente inferior al de los sistemas comerciales típicos, se evaluaron económicamente dos cabezales de riego análogos con caudales de 12 m³/h (D2) y 28 m³/h (D3), para determinar el efecto del escalado.

3.5.1. Costes de amortización

El coste de amortización fue calculado como el pago anual correspondiente, de la siguiente forma: V_{ad}

$$C = Vad * \frac{i*(1+i)^a}{(1+i)^a - 1} \quad [\text{ec. 10}]$$

Donde C (EUR/año) era la tasa de pago anual (EUR), V_{ad} el valor de adquisición de equipos (EUR), i los intereses (%), y a vida útil del equipo (años). La vida útil del sistema se estimó en 12 años, considerando 1224 horas de funcionamiento anual, y el tipo de interés utilizado fue del 5%.

El valor de adquisición del sistema experimental (D1) suministrado por NutriBalance fue de 18.720 euros, mientras que para los sistemas comerciales D2 y D3 su valor de adquisición fue de 25.230 y 34.550 euros respectivamente.

3.5.2. Costes del agua y fertilizantes

Los precios de los distintos tipos de agua y de fertilizantes empleados a lo largo del ensayo experimental (2021- 2022) se encuentran en la Tabla 5. No se trata de precios fijos, pues estos sufren cambios con el paso del tiempo.

A su vez, el empleo de agua y fertilizantes varía en función de la época del año en la que nos encontremos y del estado fenológico del árbol. En el Anexo I se muestran las necesidades nutricionales para un cultivo de *Citrus x paradisi* en estado fenológico adulto.

3.5.3. Estimación del ahorro potencial

Debido a su coste económico, el consumo de fertilizantes pasa a ser un aspecto clave en la actualidad. Por lo que para considerar los ahorros potenciales a través del empleo de NutriBalance, se ha calculado el consumo de fertilizante por hectárea para dos escenarios:

- I. *Sin NutriBalance*, en la que el aporte de fertilizantes se lleva a cabo según los cálculos efectuados por el técnico de campo. Se trata de una práctica habitual, y la llevada a cabo en la finca experimental donde se llevó a cabo el ensayo.
- II. *Con NutriBalance*, basada en la aplicación de fertilizantes calculado por NutriBalance, en la que se cumple con los requisitos nutritivos del cultivo al menor costo posible.

Por lo que, obteniendo los costes totales derivados de cada una de las variables de cada escenario, se puede establecer una comparación entre el coste derivado de la implantación del sistema Nutribalance, o, por el contrario, llevar a cabo un fertirriego recomendado por un técnico de la zona. Estos costes se calcularon tanto para la superficie del ensayo de pomelos de 0,2772 ha, como para una superficie de 1 hectárea, con el fin de poder establecer así un coste unitario y comparar con mayor facilidad. Los costes derivados de cada escenario han sido los siguientes:

Tabla 5. Desglose de costes derivados de cada escenario.

ESCENARIO 1				ESCENARIO 2				AHORRO DE COSTE POR AÑO	TIPO DE AGUA	
COSTE FERTILIZANTES	COSTE AGUA DE RIEGO	COSTE AMORTIZACIÓN	COSTE TOTAL	COSTE FERTILIZANTES	COSTE AGUA DE RIEGO	COSTE AMORTIZACIÓN	COSTE TOTAL			
D1 (0,2772 ha)										
2021	86,78	343,74	2112,09	2542,61	35,87	432,36	2112,09	2580,33	-37,72	DS
					34,73	343,74	2112,09	2490,56	52,05	AM
					33,93	255,12	2112,09	2401,15	141,46	CR
2022	147,73	415,95	2112,09	2675,77	78,63	523,19	2112,09	2713,91	-38,14	DS
					76,99	415,95	2112,09	2605,03	70,73	AM
					74,37	308,72	2112,09	2495,18	180,59	CR
D2 (1,0 ha)										
2021	313,04	1240,05	2846,65	4399,75	129,41	1559,75	2846,65	4535,81	-136,06	DS
					125,28	1240,05	2846,65	4211,99	187,76	AM
					122,41	920,36	2846,65	3889,42	510,33	CR
2022	532,92	1500,55	2846,65	4880,12	283,67	1887,40	2846,65	5017,73	-137,61	DS
					277,75	1500,55	2846,65	4624,95	255,17	AM
					268,31	1113,69	2846,65	4228,65	651,47	CR

En el ensayo efectuado, con el fin de estimar los ahorros potenciales para la vida útil del equipo (12 años), se sopesaron dos casos:

- I. *Caso 1*, en el que se supuso que el precio de los fertilizantes se mantuvo estable en el tiempo.
- II. *Caso 2*, el precio de los fertilizantes siguió incrementando su precio siguiendo las tendencias actuales.

Finalmente, un aspecto a tener en cuenta es que desde que los árboles de la finca experimental tenían tres años de edad hasta el final del ensayo, se consideró un aumento del consumo de fertilizantes del 15% anual hasta el comienzo de la adultez de los árboles (7 años de edad; Maestre-Valero et al., 2016).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación técnica

Primeramente, cabe destacar que el cabezal de riego recibió de forma correcta la información del algoritmo de cálculo y la aplicación web, efectuando por lo tanto el aporte de agua y fertilizantes según las órdenes del programador. A continuación, se mostrarán los diferentes ensayos efectuados en los que se puede apreciar la precisión con la que el cabezal de riego aportó el agua y los fertilizantes requeridos sin errores significativos.

Ensayo 1. Los resultados obtenidos del análisis del fertirriego del ensayo 1 se representan en la Figura 10. Durante este ensayo se usaron los fertilizantes KNO_3 , NH_4NO_3 y H_3PO_4 . A su vez, las tablas 5 y 6 representan la composición físico- química del agua empleada, así como la información del autómata de control de este primer ensayo.

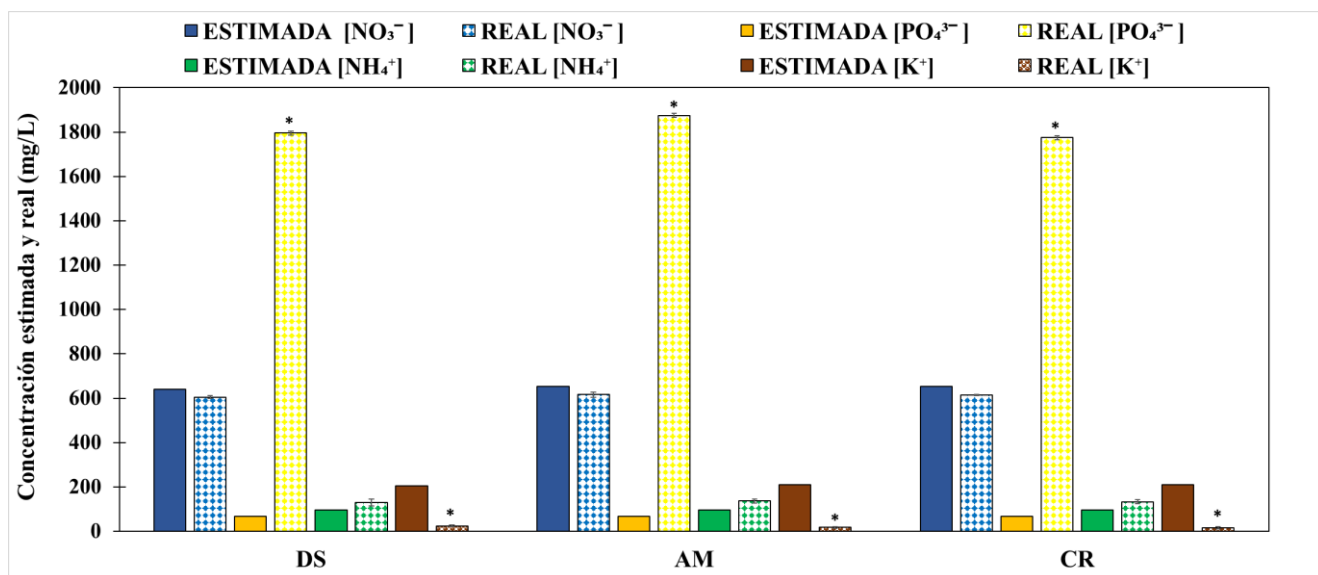


Figura 10. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 1.

Tabla 6. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 1.

TIPO AGUA	pH	CE (dS/m)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)
DS	-	1,205	291,29	0,00	0,00	16,67	174,78	8,64	32,80	11,17
AM	-	0,934	193,53	2,02	0,00	40,98	118,66	5,23	30,12	9,30
CR	-	0,685	121,90	2,88	2,45	53,79	75,06	5,17	32,84	10,94

Tabla 7. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 1.

ENSAYO	AGUA (L)	KNO ₃ (L)	NH ₄ NO ₃ (L)	H ₃ PO ₄ (L)	
DS	1000	14,72	5,05	2,29	Real
	1000	16,11	5,52	2,51	Teórico
	0,0%	8,6%	8,5%	8,8%	Error
AM	1000	15,21	5,01	2,18	Real
	1000	16,67	5,51	2,39	Teórico
	0,0%	8,8%	9,1%	8,8%	Error
CR	1000	15,21	5,03	2,19	Real
	1000	16,68	5,51	2,39	Teórico
	0,0%	8,8%	8,7%	8,4%	Error

Tras observar la Figura 10 en la que se exponen los resultados obtenidos en el Ensayo 1, se pueden destacar una serie de aspectos.

En primer lugar, existen unos niveles de PO₄³⁻ excesivos. Los niveles de este deberían de haberse situado en unos 68 mg/L, sin embargo, se obtuvieron valores superiores a los 1.700 mg/L. El motivo por el que se produjo este incremento en la concentración de PO₄³⁻ fue a que no se realizó una dilución del ácido fosfórico, por lo que este se inyectó puro.

Por otra parte, en este primer ensayo se produjeron unas deficiencias importantes de K⁺. Estas bajas concentraciones obtenidas puede que se debieran a un error en la mezcla de aguas y fertilizantes, obteniendo una deficiencia superior a los 10.000 mg/L de K⁺ tras analizar la composición del tanque.

Finalmente, los resultados obtenidos para el ion NO₃⁻ se encuentran entre los niveles estimados, mientras que en el caso del NH₄⁺ se da un excedente, que supone únicamente 40 mg/L más de lo estimado.

En lo que respecta a este primer ensayo, se han producido los mayores errores respecto a la ejecución del autómata de control. Se alcanzó el error máximo en la inyección del KNO_3 , siendo este del 8,80%, lo que supuso un déficit de 1,50 L. El autómata fue ajustado de cara a los siguientes ensayos con el fin de disminuir así los errores obtenidos.

Ensayo 2. Los resultados obtenidos en el segundo ensayo se representan en la Figura 11. A su vez, las tablas 8 y 9 representan la composición físico- química del agua empleada, así como la información del autómata de control de este segundo ensayo. En este ensayo los fertilizantes utilizados volvieron a ser KNO_3 , NH_4NO_3 y H_3PO_4 .

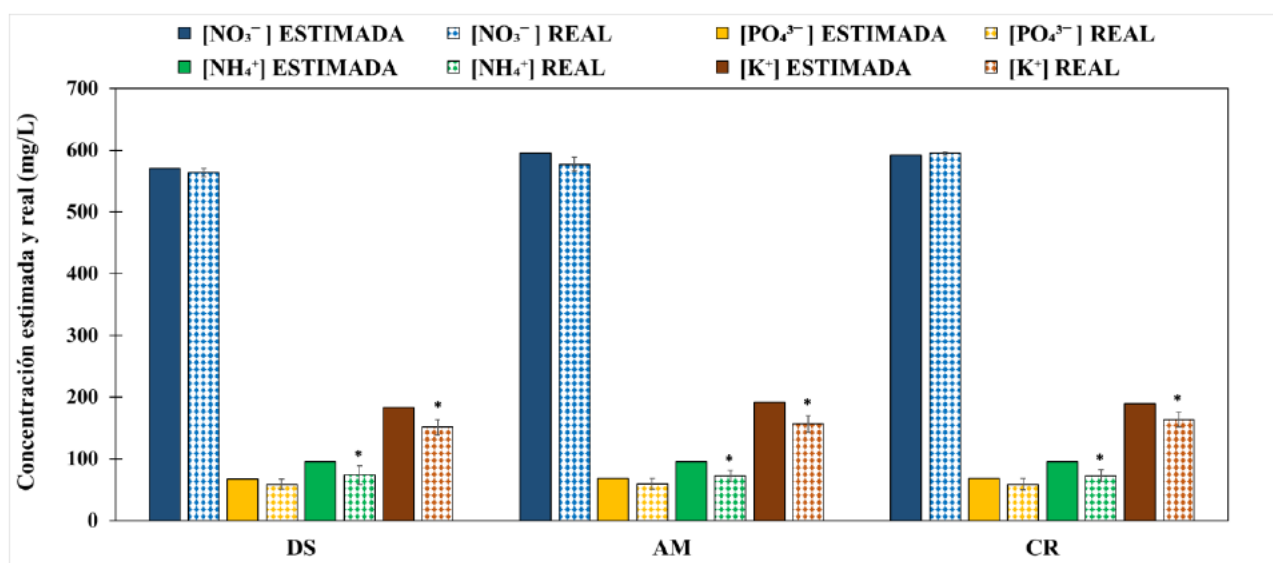


Figura 11. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 2.

Tabla 8. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 2.

TIPO AGUA	pH	CE (dS/m)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)
DS	-	1,1	334,53	2,46	4,75	11,52	185,46	31,28	23,67	6,83
AM	-	0,88	223,86	2,29	2,51	42,64	128,52	23,16	31,43	10,20
CR	-	0,68	138,33	2,74	2,79	75,82	76,81	24,43	43,22	115,39

Tabla 9. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 2.

ENSAYO	AGUA (L)	KNO ₃ (L)	NH ₄ NO ₃ (L)	H ₃ PO ₄ (L)	
DS	1000	12,32	5,46	1,36	Real
	1000	12,4	5,51	1,37	Teórico
	0,0%	0,6%	0,9%	0,7%	Error
AM	1000	13,71	5,45	1,42	Real
	1000	13,74	5,49	1,43	Teórico
	0,0%	0,2%	0,7%	0,7%	Error
CR	1000	13,44	5,47	1,41	Real
	1000	13,53	5,51	1,42	Teórico
	0,0%	0,7%	0,7%	0,7%	Error

En el segundo ensayo realizado, se produjo una reducción de las diferencias de concentraciones de los distintos nutrientes respecto al Ensayo 1. Se pueden destacar una serie de aspectos del siguiente ensayo realizado.

En primer lugar, el ion PO₄³⁻ se diluyó correctamente, alcanzando valores muy cercanos a los estimados. Tras llevar a cabo el análisis del tanque del fertilizante KNO₃, este mostró una mezcla más ajustada a la prevista, lo que ocasionó un ajuste mayor en la concentración de K⁺ real obtenida. Las concentraciones de NH₄ que se obtuvieron fueron algo inferiores a las estimadas. A pesar de esto, el error obtenido para dicho ion disminuyó hasta el 10%. Por otro lado, las concentraciones de NO₃ se ajustaron a las estimadas de forma verdaderamente precisa, obteniendo un error máximo de tan solo el 3% para la prueba con agua AM y un error mínimo del 0,43% para la prueba con agua CR.

El funcionamiento del autómata de control en este ensayo resultó ser extraordinario. El autómata se ajustó con respecto al primer ensayo obteniendo como resultado un error máximo de 0,90%, lo que supuso 0,05 L.

Ensayo 3. Los resultados obtenidos en el tercer ensayo se representan en la Figura 12. Las tablas 10 y 11 muestran la composición físico-química del agua utilizada y la información del autómata de control, respectivamente, en este tercer ensayo. En este ensayo los fertilizantes utilizados fueron KNO₃, NH₄NO₃ y H₃PO₄.

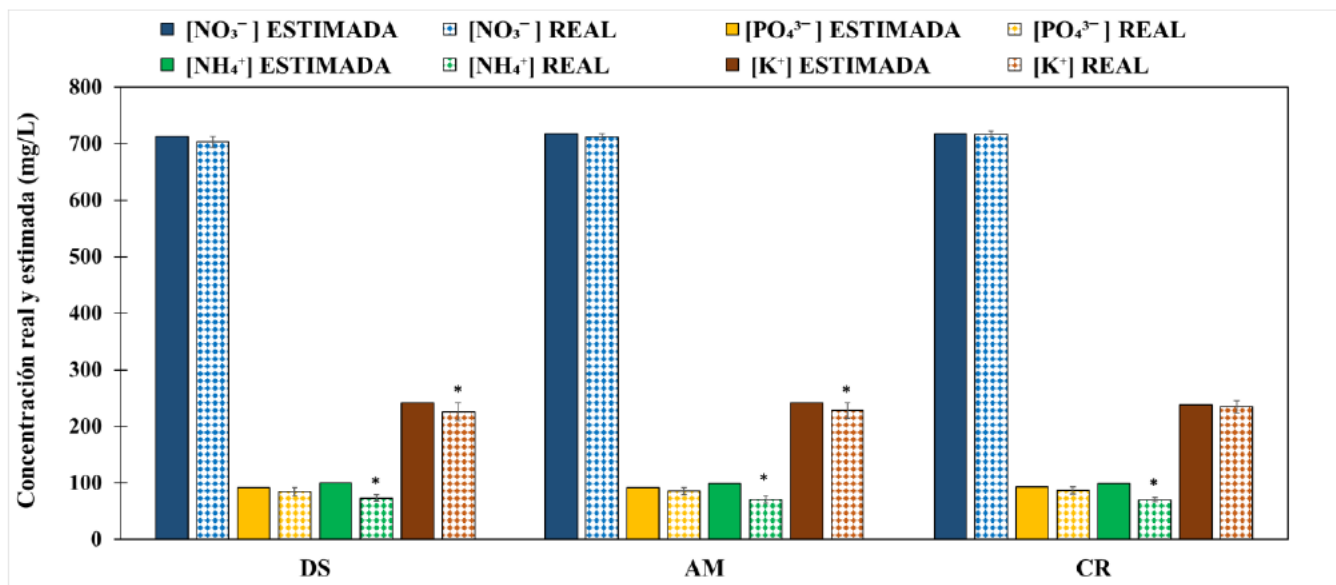


Figura 12. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 3

Tabla 10. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 3.

TIPO AGUA	pH	CE (dS/m)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)
DS	7,75	1,375	363,97	0,00	0,00	15,90	213,79	8,29	32,64	10,21
AM	8,16	1,014	256,76	3,25	0,00	47,73	143,27	6,81	36,07	12,11
CR	8,20	0,752	146,89	3,44	2,45	61,53	90,49	3,72	33,33	12,77

Tabla 11. Resultados en la ejecución del automatista en el ensayo 3.

ENSAYO	AGUA (L)	KNO ₃ (L)	NH ₄ NO ₃ (L)	H ₃ PO ₄ (L)	
DS	1000	19,3	5,82	1,99	Real
	1000	19,07	5,77	2,01	Teórico
	0,0%	1,2%	0,9%	1,0%	Error
AM	1000	18,94	5,7	2	Real
	1000	19,2	5,76	2,01	Teórico
	0,0%	1,4%	1,0%	0,5%	Error
CR	1000	18,83	5,65	1,99	Real
	1000	19,23	5,76	1,97	Teórico
	0,0%	2,1%	1,9%	1,0%	Error

Este tercer ensayo fue el último en el que se emplearon únicamente tres fertilizantes (KNO₃, NH₄NO₃ y H₃PO₄), en el que se obtuvo un ajuste muy preciso en las

concentraciones de los distintos iones, excepto el ion NH_4^+ . Este ion NH_4^+ presentó errores del 29,50% (para la prueba con agua CR) y del 26% (para la prueba con DS) respecto a las concentraciones estimadas. Del resto de iones, destaca el NO_3^- debido a los valores idóneos obtenidos, pues presentó en este un error del 1,36% únicamente, para la prueba con agua DS.

En el caso de los iones PO_4^{3-} y K^+ , estos se ajustaron de forma más precisa a las concentraciones estimadas con respecto a los dos ensayos efectuados anteriormente. Este ajuste provocó un déficit de 6,50 mg/L y 10,88 mg/L respectivamente (error del 7% y 4,50%, respectivamente).

Finalmente, la precisión de este tercer ensayo se ajustó de manera adecuada a lo previsto. El error máximo obtenido fue del 2,10%, correspondiente al Abono 2 (KNO_3), siendo este de 0,40 L menos de lo previsto. El error obtenido para el resto de abonos obtuvo errores de entre el 0,50% y 1,90%.

Ensayo 5. Los resultados obtenidos en el quinto ensayo se representan en la Figura 13. Las tablas 12 y 13 muestran la composición físico-química del agua utilizada y la información del autómata de control, respectivamente, en este quinto ensayo. En este caso, los fertilizantes empleados fueron KNO_3 , NH_4NO_3 , H_3PO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$.

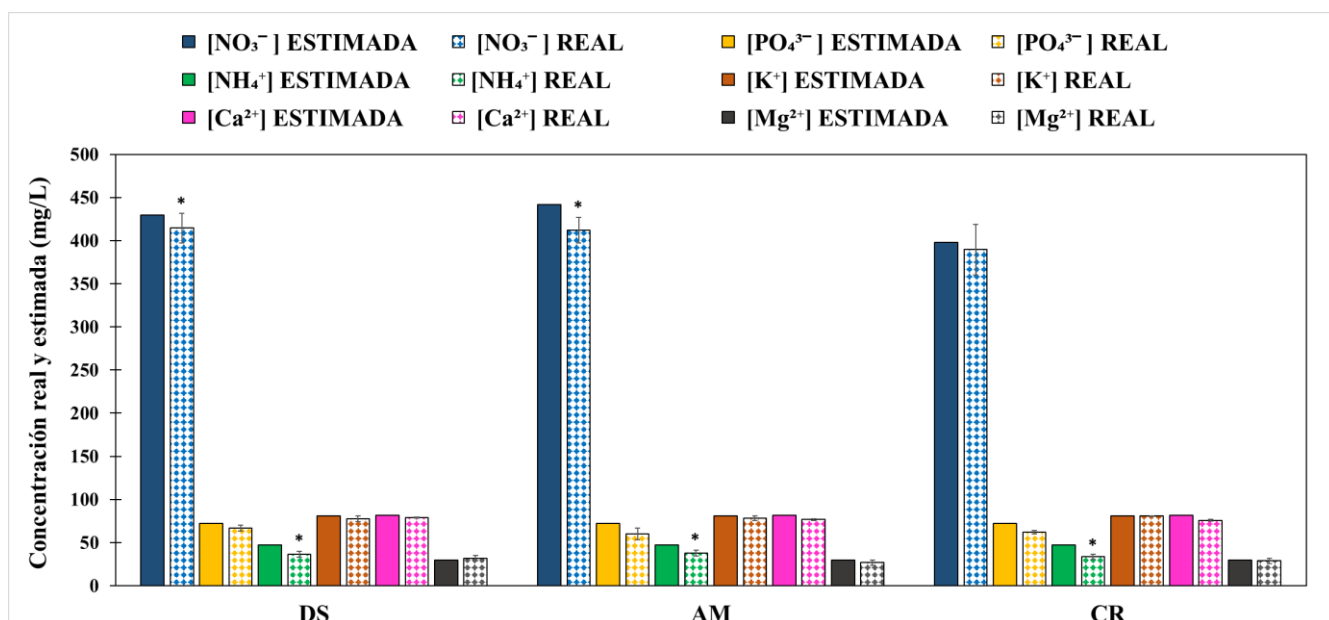


Figura 13. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 5

Tabla 12. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 5.

TIPO AGUA	pH	CE (dS/m)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)
DS	-	-	243,68	5,81	4,85	108,20	145,78	7,30	48,62	21,38
AM	-	-	249,64	5,05	4,81	97,54	144,31	6,58	46,17	20,55
CR	-	-	190,64	6,28	4,88	132,79	116,77	7,03	54,11	24,41

Tabla 13. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 5.

ENSAYO	AGUA (L)	Ca(NO ₃) ₂ (L)	KNO ₃ (L)	NH ₄ NO ₃ (L)	Mg(NO ₃) ₂ (L)	H ₃ PO ₄ (L)	
DS	1005	2,64	6,06	2,87	3,03	1,56	Real
	1000	2,64	6,05	2,71	3,03	1,47	Teórico
	0,5%	0,0%	0,2%	5,9%	0,1%	6,1%	Error
AM	1006	3,05	6,6	2,93	3,59	1,58	Real
	1000	2,84	6,1	2,71	3,34	1,47	Teórico
	0,6%	7,4%	8,2%	8,1%	7,5%	7,5%	Error
CR	1005	2,33	6,35	2,65	2,02	1,55	Real
	1000	2,20	6,06	2,71	1,92	1,47	Teórico
	0,5%	5,9%	4,8%	2,2%	5,4%	5,4%	Error

Tal y como se ha indicado anteriormente, el Ensayo 5 fue en el que se emplearon por primera vez cinco fertilizantes diferentes. Estos fueron KNO₃, NH₄NO₃ y H₃PO₄, y a los que se le sumaron Ca(NO₃)₂ y Mg(NO₃)₂. Tal y como se puede apreciar en la tabla de resultados del autómata, la composición real del fertirriego realizado se asemejó bastante a la estimada teóricamente, pues no existieron apenas diferencias significativas. En este caso, la única variación producida fue la del NO₃⁻ y el Ca²⁺, siendo estas del 6,70% y del 18,50% respectivamente, en el caso del riego con AM.

Respecto a la precisión del autómata de riego durante este Ensayo 5 ejecutado, esta ha sido correcta. Cabe destacar un exceso en la inyección del Abono 2 de un 8,20% con agua AM, lo que supone 0,50 L en exceso. Además, se produjo un exceso de 5L de agua en el riego para las tres pruebas. Pero a pesar de ello, comparando esta excedencia con los 1000

litros que se requieren para el riego, se trata de un error mínimo que supone el 0,50% únicamente.

Ensayo 7. Los resultados obtenidos en el séptimo ensayo se representan en la Figura 14. Las tablas 14 y 15 muestran la composición físico-química del agua empleada y la información del autómata de control, respectivamente, en este séptimo ensayo. En este caso, los fertilizantes empleados fueron nuevamente KNO_3 , NH_4NO_3 , H_3PO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$.

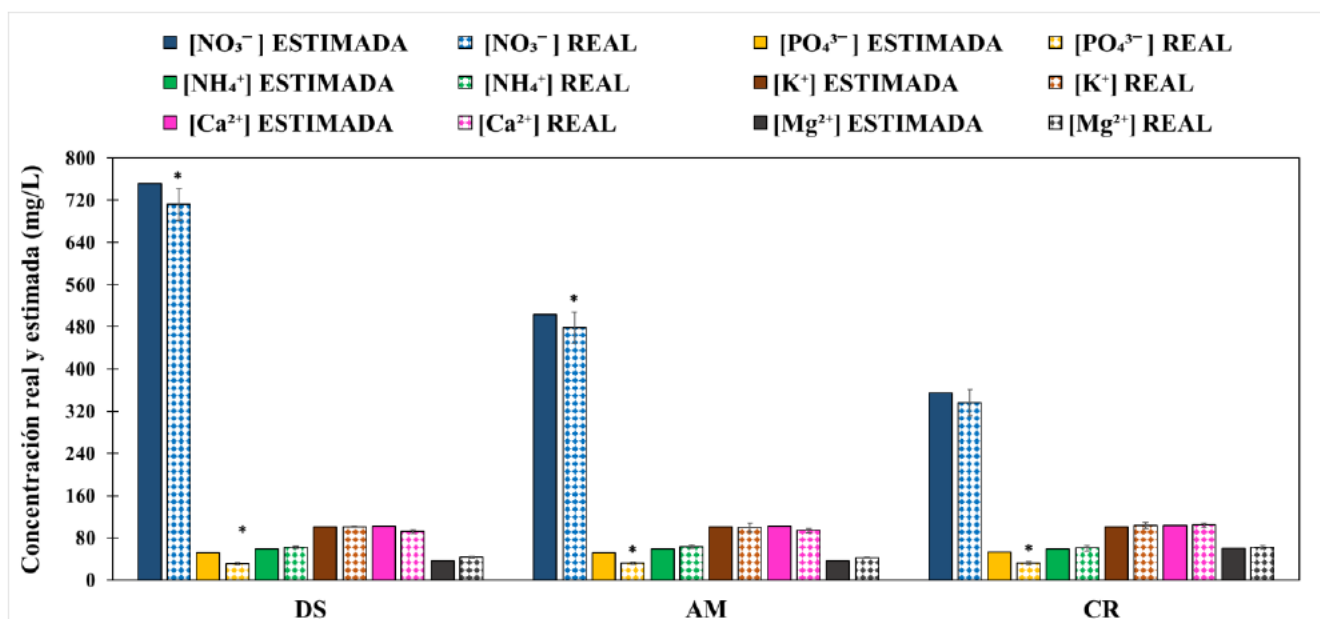


Figura 14. Resultados del análisis del fertirriego del ensayo 7

Tabla 14. Composición físico-química de los recursos hídricos empleados en el ensayo experimental 7.

TIPO AGUA	pH	CE (dS/m)	Cl^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)
DS	8,5	1,184	339,91	1,86	3,0,9 2	7,62	211,13	8,96	24,14	5,93
AM	8,08	1,367	278,19	4,03	3,93	169,33	175,92	8,11	65,82	29,87
CR	7,28	1,527	223,57	6,44	4,09	338,10	146,35	8,38	102,98	59,29

Tabla 15. Resultados en la ejecución del autómata en el ensayo 7.

ENSAYO	AGUA (L)	Ca(NO ₃) ₂ (L)	KNO ₃ (L)	NH ₄ NO ₃ (L)	Mg(NO ₃) ₂ (L)	H ₃ PO ₄ (L)	
DS	1000	6,32	7,6	3,27	11,47	1,1	Real
	1000	6,21	7,56	3,4	11,4	1,06	Teórico
	0,00%	1,77%	0,53%	3,82%	0,61%	3,77%	Error
AM	1001	2,96	7,83	3,49	2,70	1,076	Real
	1000	2,9	7,63	3,39	2,63	1,06	Teórico
	0,1%	2,1%	2,6%	2,9%	2,7%	1,5%	Error
CR	1004	-	7,80	3,49	-	1,11	Real
	1000	-	7,61	3,39	-	1,06	Teórico
	0,4%	-	2,5%	2,9%	-	4,7%	Error

Finalmente, tras observar en la figura los resultados obtenidos en este Ensayo 7, se puede decir que este es el más relevante de los tres últimos ensayos llevados a cabo. Esto se debe a los elevados requerimientos nutricionales de NO₃⁻ para el caso del agua DS, así como por el déficit derivado de este requerimiento. Una vez realizado el análisis de agua pertinente, los resultados de la composición nutricional del agua recogida muestran cómo los valores reales de NO₃⁻ medidos llegan a ser hasta un 16% menores a los estimados para el caso del riego con agua DS. A su vez, esta diferencia es menor para el caso del riego con agua CR, donde esta es del 6% (19,05 mg/L).

Esta diferencia producida en el aporte de NO₃⁻ puede deberse a que se trata del nutriente que requiere un mayor aporte en las tres pruebas llevadas a cabo, aunque esta diferencia se va reduciendo a medida que aumenta la proporción de agua CR. La capacidad del sistema de fertirrigación empleado para aportar de forma precisa los diferentes fertilizantes se puede ver afectada por este aporte excesivo de NO₃⁻ (en torno a 800 mg/L), tal y como se puede apreciar al comparar cómo el error incrementa a medida que aumenta el requerimiento en NO₃⁻. Esta diferencia entre la inyección real llevada a cabo y la estimada mediante el algoritmo no se apreciaron en el resto de fertilizantes empleados, pues ambas fueron prácticamente equivalentes. En el caso del nutriente PO₄³⁻, la diferencia obtenida para este nutriente es del 40% aproximadamente entre el aporte teórico calculado por el algoritmo y el real obtenido. Por otro lado, no se produjo ningún error significativo en los datos de inyección del abono obtenidos mediante el autómata de control ni en la composición nutricional de la cuba de abonado. Los fallos en la concentración realmente inyectada puede que se produjeran debido a una mala

homogeneización de los distintos abonos, pues es posible que, en el proceso de agitación de los tanques de fertilizante, este no fuera capaz de lograr una correcta mezcla de los fertilizantes en las cubas.

La capacidad del algoritmo para inyectar el volumen de agua y de abono requerido se ve influenciada por dos factores principales como son la composición nutricional del agua de riego y los fertilizantes disponibles. Es por esto por lo que el agua de riego del tipo CR, caracterizada por unas elevadas concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , no se requiere del aporte de abono para alcanzar los requerimientos del cultivo en algunos de los ensayos efectuados. Sin embargo, en el caso del agua de riego DS, esta presenta unos niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} del 75% y 90% menor que el agua de riego del tipo CR, lo que hace imprescindible la aportación de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ en el agua de riego. Por lo que esta diferencia en la composición del agua nos podría conducir hacia una mayor variación respecto a otros tipos de agua debido a una acumulación de los posibles errores mencionados anteriormente.

Una vez evaluados los diferentes ensayos, se puede decir que el algoritmo realizó un ajuste nutricional realmente precisos en la mayor parte de estos. A pesar de ello, es cierto que se produjeron variaciones significativas en las concentraciones obtenidas en algunos de los ensayos efectuados. Estas variaciones fueron ocasionales, por lo que se deben de contemplar otras causas que las originaran antes que un fallo o imprecisión en el funcionamiento del algoritmo. Una de las posibles causas de estas variaciones puntuales fueron las mezclas en los tanques de abonado para cada uno de los fertilizantes empleados, pues la precisión con la que se elaboren dichas mezclas es primordial de cara a la obtención de unos resultados más ajustados a los estimados. Y es que, en este caso, las mezclas se llevaron a cabo de forma manual, por lo que el factor humano pudo ocasionar errores puntuales en la precisión de estas mezclas, como es el caso del H_3PO_4 del ensayo 1. Además, la calidad de los fertilizantes comerciales empleados puede influir en la precisión de las mezclas, ya que, en algunos casos, estos presentan concentraciones inferiores a las indicadas en el producto.

4.2. Evaluación económica

Una vez llevada a cabo la evaluación del sistema siguiendo la metodología explicada anteriormente, se obtuvieron una serie de resultados de los que se pudieron sacar una serie de conclusiones respecto a la implantación del sistema.

Los gastos asociados a cada uno de los dos escenarios establecidos se obtuvieron a través del establecimiento de una serie de variables que fueron: costes de fertilizantes, costes del agua de riego y costes de amortización, siendo estos últimos fijos en ambos escenarios.

Por lo que, obteniendo los costes totales derivados de cada una de las variables de cada escenario, se puede establecer una comparación entre el coste derivado de la implantación del sistema Nutribalance, o, por el contrario, llevar a cabo un fertirriego recomendado por un técnico de la zona. Estos costes se calcularon tanto para la superficie del ensayo de pomelos de 0,2772 ha, como para una superficie de 1 hectárea, con el fin de poder establecer así un coste unitario y comparar con mayor facilidad. Los costes derivados de cada escenario han sido los siguientes:

Tabla 16. Ahorro de costes en los distintos escenarios.

		2021	2022	TIPO DE AGUA
AHORRO DE COSTE POR AÑO (EUR/ha)	D1 (0,2772 ha)	-37.72	-38.14	DS
		52.05	70.73	AM
		141.46	180.59	CR
	D2 (1,0 ha)	-136.06	-137.61	DS
		187.76	255.17	AM
		510.33	651.47	CR

El coste del agua de riego es un factor determinante en el fertirriego, pues su precio influye de manera directa en el coste asociado al fertirriego del cultivo. En este caso, se observa una clara diferencia de costes entre ambos escenarios, así como entre los tres tipos de agua empleados en el ensayo.

En primer lugar, se puede observar un aumento del coste del agua de riego del Escenario 1, en el que en el año 2021 presentaba un coste de 1240,05 EUR/ha mientras que en el año 2022 este fue de 1500,55, siendo este incremento del 21%, debido al incremento en el consumo de agua derivado del crecimiento de los árboles.

En el Escenario 2, sí que se observaron notables diferencias de coste al comparar entre los tres tipos de agua empleados, la más importante de ellas es el aumento del 21% en el coste de los tres tipos de agua empleados en el año 2022. En primer lugar, destaca por su elevado coste el agua desalada (DS), siendo este de 1559,75 EUR/ha en el año 2021 y de 1887,40 EUR/ha en el 2022. Se trata del agua más cara de las diferentes alternativas debido a que se emplean sistemas de ósmosis inversa, lo que origina un elevado consumo de energía que proviene de la necesidad de elevar la presión de esta agua, con el fin de que atraviese las membranas semipermeables. Además, este tipo de agua presenta costes derivados de la aplicación de una mayor cantidad de fertilizantes respecto a los otros tipos de agua tal y como se mostrará más adelante.

El agua mezcla tuvo un precio de 1240,05 EUR/hectárea en el año 2021 y alcanzó los 1500,55 euros/hectárea en el 2022. Además, destacar que el coste del agua mezcla coincide con el coste unitario del agua empleada en el Escenario 1 ya que se considera que en el escenario 1 se emplea este tipo de agua (Agua mezcla).

Finalmente, el agua de la Comunidad de regantes es la que presenta un menor coste, siendo este de 920,36 EUR/ha en el 2021 y de 1113,69 EUR/ha en el 2022. Además de ello, es el tipo de agua que presenta un coste asociado menor, pues tal y como se mostrará a continuación, no requiere de la aplicación de grandes cantidades de abono debido a su composición química.

El coste de los fertilizantes es otra de las variables que influyen de manera directa en el coste asociado del fertirriego del cultivo. En este caso, tal y como se puede apreciar, existe una clara diferencia en los costes derivados de fertilizantes entre el Escenario 1 y el Escenario 2, debido al uso de NutriBalance.

Primeramente, el Escenario 1 presenta unos costes de fertilizantes muy superiores a los diferentes tipos de agua que conforman el Escenario 2. Los costes de fertilizantes de este Escenario fueron de 313,40 EUR/hectárea en el año 2021, aumentando a 532,92 EUR/hectárea en el 2022. Este ascenso de los costes fue del 70% en tan solo un año debido al aumento de los requerimientos nutricionales del árbol, y, por consiguiente, a un mayor aporte de fertilizantes. Además, este Escenario 1 presenta unos costes derivados del empleo de fertilizantes muy superior a los del Escenario 2, en los que no se usa el sistema NutriBalance. Esta diferencia de gastos fue del 142% en el año 2021 y del 187% en el año 2022, por lo que se trata de una diferencia realmente notable de costes entre

ambos escenarios, y aún más teniendo en cuenta que esta comparación se ha establecido teniendo en cuenta los costes asociados al agua desalada en el Escenario 2, que es el agua que presenta unos requerimientos de abonado mayores.

En lo que respecta al Escenario 2, se puede observar cómo el sistema NutriBalance implantado ha provocado una disminución en los gastos derivados del uso de fertilizantes tal y como se venía haciendo hasta ahora, es decir, con el asesoramiento de un técnico cualificado. Además, se puede apreciar cómo existe diferencia en los costes de fertilizantes en los diferentes tipos de agua que se pueden emplear en este Escenario 2. Entre los tres tipos de agua existentes, el agua desalada es la que presenta unos costes de fertilizante mayores debido a que requiere de un aporte mayor de fertilizantes. Por el contrario, el agua de la comunidad de regantes es la que muestra un coste de fertilizantes menor, siendo este un 5,66% inferior al del agua desalada.

El coste de amortización es la última variable que compone el coste total del fertirriego del cultivo de pomelo. Tal y como se puede apreciar en la gráfica, se trata de un valor fijo para ambos escenarios, y es de 2.846,65 EUR/hectárea y año. Mencionar que, a pesar de cuadruplicar la superficie de cultivo frente a D1 (0,2772 ha), el coste de 1 hectárea de superficie, el coste es tan solo un 34,7% superior respecto a esta.

Atendiendo a la Figura 15, se puede observar la reducción en los costes del fertirriego para el cultivo de pomelo. Para los casos en los que se emplean agua de la Comunidad de Regantes y agua mezcla, se han producido ahorro en los costes respecto al Escenario 1, es decir, los resultados obtenidos han sido positivos. Sin embargo, con el empleo de agua desalada no se han logrado ahorros en los costes. Esto es debido al elevado precio de esta, así como la elevada cantidad de abono que requiere para poder ser utilizada para el fertirriego. Estos ahorros producidos se muestran a continuación más detalladamente.

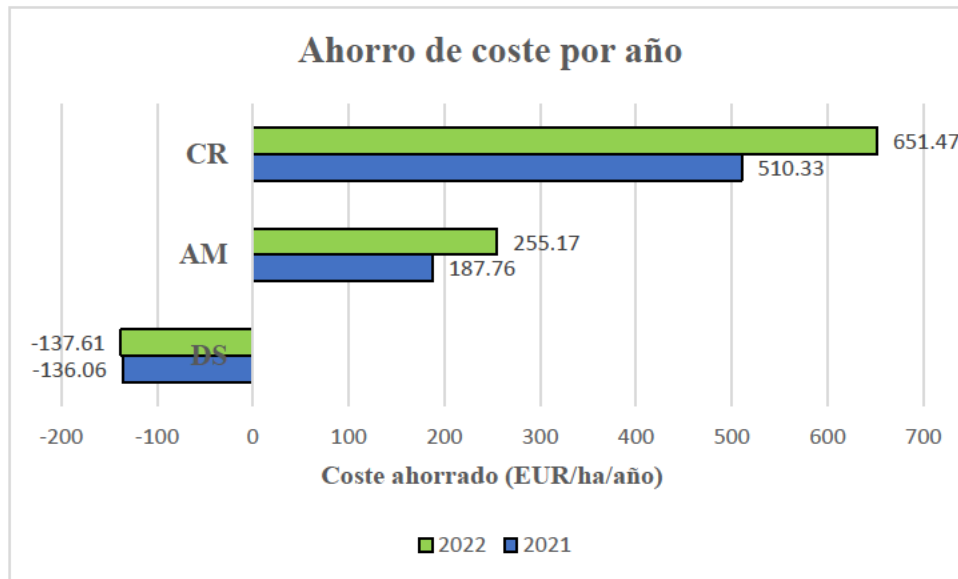


Figura 15. Ahorro de coste por año implementando Nutribalance.

Como ya se ha comentado anteriormente, los resultados obtenidos de este análisis económico llevado a cabo han sido realmente favorables. Y es que se han producido ahorros de costes considerables respecto al Escenario 1 (en el que no estaba implantado el sistema NutriBalance). Estos ahorros han sido máximos para el caso del agua procedente de la Comunidad de Regantes, en los que estos han sido de 651,47 y 510,33 EUR/ha/año en los años 2022 y 2021 respectivamente. Esto nos conduce a ahorros del 13,12% en el 2021 y del 15,41% en el 2022.

Para el caso del agua mezcla, se han producido también ahorros notables en los costes. La diferencia de estos costes ha sido de 255,17 y de 187,76 EUR/ha/año en los años 2022 y 2021 respectivamente. Lo que corresponde a ahorros del 4,46% en el 2021 y del 5,52% en el 2022.

Finalmente, para el caso del agua desalada no se produjeron ahorros, si no que los costes producidos empleando este tipo de agua fueron superiores a los del Escenario 1. Esto se debe principalmente a los dos factores ya comentados, que son el elevado coste del proceso de desalación de la misma y la gran cantidad de abonos que requiere para su empleo. El empleo de agua desalada con el sistema Nutribalance fue tan solo 136,00 y 137,60 EUR/ha más caro que el Escenario 1 en los años 2021 y 2022 respectivamente.

Tras evaluar los resultados obtenidos en el análisis económico del sistema NutriBalance implantado, se puede apreciar la rentabilidad que este proporciona al agricultor en las situaciones actuales de cultivo. Pero en la actualidad, las variables que contribuyen de

forma directa al coste del fertirriego del cultivo están aumentando su coste de manera desmesurada, como es el caso del agua de riego o los fertilizantes.

El coste de los fertilizantes es uno de los factores determinantes en la nutrición del cultivo. El coste de los mismos ha crecido de manera exponencial en los últimos años, y se prevé que lo siga haciendo del mismo modo en los próximos. Esto juega un papel fundamental en los costes del fertirriego, por lo que se requiere de una aplicación lo más precisa posible de los mismos.

Por otro lado, esta evaluación económica muestra como el sistema NutriBalance reduce de manera considerable este consumo de fertilizante, por lo que se ven reducidos también los gastos del agricultor. Un aumento en precio futuro de estos fertilizantes puede hacer que la implantación del sistema NutriBalance permita reducir en gran medida los costes.

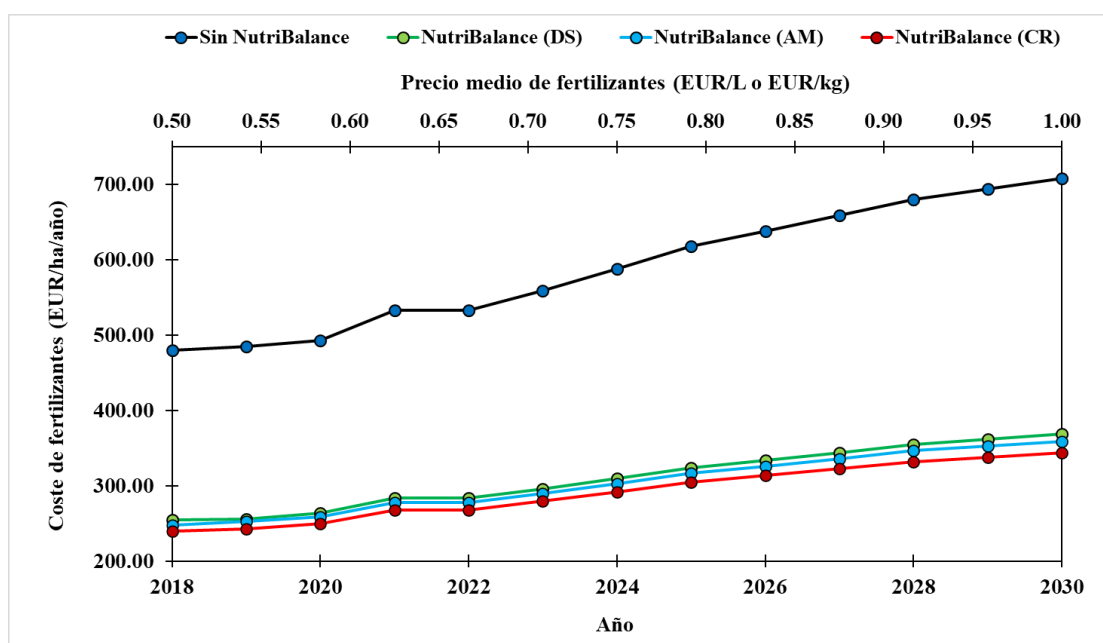


Figura 16. Evolución del coste de una hectárea de pomelo de 3 años con el aumento de los precios de fertilizantes.

En la Figura 17 se aprecia cómo el año 2018 el coste de fertilizantes en un sistema de fertirriego sin NutriBalance fue de 480,32 EUR/ha/año, mientras que con el empleo de NutriBalance estos costes se redujeron un 93,73% obteniendo un coste medio de 247,93 EUR/ha/año. A medida que pasan los años, el precio de los fertilizantes ha ido en aumento, y se espera que lo siga haciendo en los años próximos pudiendo alcanzar valores de 0,885 EUR/kg en el año 2030. Y es en estos años futuros donde el sistema NutriBalance mostrará una mayor rentabilidad aún, pues los costes de una hectárea sin este sistema serían de 708,57 EUR/ha/año, mientras que implantando el sistema NutriBalance estos

costes se verían reducidos en un 97,18% mostrando un coste medio de 359,36 EUR/ha/año.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha evaluado técnica y económicamente un sistema de fertirrigación autónomo y experto, capaz de elaborar planes de fertirriego óptimos para un cultivo en concreto (*Citrus x paradisis*) y en unas condiciones específicas de trabajo.

El algoritmo (NutriBalance) ha respondido de forma precisa en la elaboración de los planes de fertirriego. Este ha demostrado ser apto para llevar a cabo la evaluación de las composiciones de todos los abonos empleados en el fertirriego de manera conjunta, ajustando su dosificación de forma exacta en función del tipo de agua que se dispone en cada tratamiento de riego.

El sistema de fertirrigación experto ha logrado una dosificación y aplicación muy precisa de los diferentes abonos y tipos de agua usados en el riego. La comunicación entre NutriBalance, el autómatas de control y el sistema de inyección ha sido adecuada en todas las pruebas, presentando errores poco o nada significativos. Las pequeñas desviaciones observadas entre la cantidad de fertilizante a inyectar y la inyectada en el agua de riego, pueden deberse a fallos en el sistema de agitación de fertilizante, al factor humano al elaborar las mezclas de agua y fertilizantes en sus tanques correspondientes, o a la incapacidad del propio sistema de aportar concentraciones de fertilizante demasiado elevadas o pequeñas. Este último aspecto denota la necesidad de una calibración adecuada de las sondas, así como de la precisión a la hora de efectuar las mezclas de fertilizantes de forma manual. En general, estos resultados denotan el elevado grado de autonomía al cabezal de riego, capaz de optimizar considerablemente el proceso de fertirrigación.

Una vez llevada a cabo la evaluación económica del sistema, se ha comprobado que este confiere una gran cantidad de ventajas respecto a las condiciones tradicionales de fertirriego. La implantación del sistema de fertirrigación experto ha logrado reducir considerablemente la cantidad de fertilizantes aplicados en el fertirriego, independientemente del tipo de agua de riego disponible, reduciendo por tanto los costes asociados, así como los posibles efectos negativos de la lixiviación de fertilizantes hacia las aguas subterráneas.

Este software se encuentra a día de hoy en fase de finalización. A pesar de ello, existen algunos aspectos a incorporar de cara a su innovación como por ejemplo la capacidad del sistema para permitir la exportación de los resultados obtenidos directamente a la receta de abonado en aplicación web ya desarrollada. Asimismo, son recomendables futuros estudios relacionados con el manejo de los distintos fertilizantes de forma conjunta, con el fin de conocer las posibles interacciones entre ellos y determinar el alcance de las sinergias e incompatibilidades que presentan en la práctica. El desarrollo e implantación de un software mejorado que logre una ampliación del grado de autonomía del sistema de fertirriego es el objetivo principal a corto plazo.

El sistema de fertirriego presentado pretende ser una novedosa herramienta para mejorar el proceso de fertirrigación en sistemas tecnificados, elementos presentes en el futuro de la agricultura del sureste español, en el que la optimización de los recursos y la precisión de las labores agrícolas son parte fundamental en la búsqueda de la sostenibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Alghoul, M.A., Poovanaesvaran, P., Sopian, K., Sulaiman, M.Y. (2009). Review of brackish water reverse osmosis (BWRO) system designs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

13, 2661-2667. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.013>.

Bueno-Delgado, M.V.; Molina-Martínez, J.M.; Correoso-Campillo, R.; Pavón-Mariño,

P. (2016). Ecofert: An Android application for the optimization of fertilizer cost in fertigation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 121, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.006>

CHS, Confederación Hidrográfica del Segura O.A. (2015). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2015-2021. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España. Disponible online:

https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion15-21/docsdescarga/docplan1521/01_MEMORIA/Memoria_PHDS2015_21.pdf

CHS, Confederación Hidrográfica del Segura O.A. (2020). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura: Revisión de tercer ciclo (2021-2027). Ministerio para la Transición Ecológica, España.

https://www.chsegura.es/export/sites/chs/descargas/planificacionydma/planificacion21-27/docsdescarga/DI_TERCERCiclo_MEMORIA_CONSOLIDADO.pdf

Eke, J.; Yusuf, A.; Giwa, A.; Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. 495.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.

Gallego-Elvira, B.; Reca, J.; Martín-Gorriz, B.; Maestre-Valero, J.F.; Martínez-alvarez, V. (2021). Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. 255. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107012>.

Kafkafi, U., y Tarchitzky, J., (2012). Fertirrigación: Una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes, Francia & Instituto Internacional de la Potasa, Suiza.

Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J., González-Ortega, M., Gallego-Elvira, B., Martín-Gorriz, B., (2019). Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. 11, 1233. <https://doi.org/10.3390/w11061233>

Martínez-Álvarez, V., y Martín-Gorriz, B., (2014). Antecedentes y problemática de la aplicación de agua marina desalinizada al riego agrícola. Universidad Politécnica de Cartagena, España

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2020). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos (ESYRCE): Informe sobre Regadíos en España. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación - Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística, España.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. UNESCO, París.

Organización de las Naciones Unidas (2020). Agenda 2030: Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020. DESA, EEUU.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013). Afrontar la escasez de agua - un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. FAO, Roma.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. Synthesis report. FAO, Roma.

Pérez-Castro A., Sánchez-Molina J.A., Castilla M., J. Sánchez-Moreno J., Moreno-Úbeda J.C., Magán J.J., (2017). cFertigUAL: A fertigation management app for greenhouse vegetable crops, Agricultural Water Management. 183, 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.013>.

Pomares García, F., (2004). Elaboración de programas de fertirrigación en cultivos hortícolas al aire libre. Resultados de experiencias, Issue 5, pp. 70-76. Valencia, España.

Pomares García, F. (2008). La fertilización y la fertirrigación, programas de nutrición, influencia sobre la programación. Actas de Horticultura, 50, 133-143. <http://hdl.handle.net/20.500.11939/7182>

PortalFrutícola (2019). ¿Qué es un cabezal de riego? Manejo del riego localizado y fertirrigación. Disponible en: <https://portalfruticola.com/>.

Quizhpe-Pineda, D.D., (2010). Instalación de un cabezal de riego para un sistema establecido que comprende un invernadero, umbráculo y patio de aclimatación, ubicados en el campus Juan Lunardi, Paute, de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Reca, J.; Trillo, C.; Sánchez, J.A.; Martínez, J.; Valera, D. (2018). Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources. 166, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.02.004>.

ANEXO I. Necesidades nutricionales de *Citrus x paradisi* según época del año.

Tabla 17. Necesidades nutricionales para un cultivo de *Citrus x paradisi*, variedad Rio Red en estado fenológico adulto.

<i>Cultivo</i>	<i>Rdto</i>	<i>Obsv.</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Días</i>	<i>N</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>K₂O</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>Zn</i>	<i>B</i>	<i>Fe</i>	<i>Fuente</i>	
<i>Pomelo - Citrus paradisi</i>	-	Star Ruby / Adulto (>12 años)	Enero	31	6,5	3,3	9,8	0,0	0,0						Nota personal de Cervera Muedra (2018).
			Febrero	28	15,8	6,5	22,3	0,0	0,0				0,6		
			Marzo	31	24,7	9,7	34,3	0,0	0,0				0,9		
			Abril	30	36,6	6,6	29,2	11,5	4,9						
			Mayo	31	42,0	7,4	35,8	12,9	5,5						
			Junio	30	72,6	13,0	58,1	22,8	9,8						
			Julio	31	121,9	21,8	97,5	38,2	16,4						
			Agosto	31	51,6	82,5	77,5	0,0	0,0						
			Septiembre	30	46,9	13,1	41,9	0,0	0,0				0,5		
			Octubre	31	25,8	12,9	38,7	0,0	0,0						
			Noviembre	30	12,8	6,4	19,2	0,0	0,0						
			Diciembre	31	8,9	4,5	13,4	0,0	0,0						
TOTAL	365	466,1	187,6	477,7	85,3	36,6						2,0			