



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



**Instituto de Estudios de Postgrado**  
**Máster en Tecnología del Agua en Ingeniería Civil**

**TRABAJO FIN DE MASTER**

**UTILIDADES Y LIMITACIONES DEL INDICADOR HUELLA  
DE AGUA DE RIEGO APLICADO AL CULTIVO DE FRESA  
EN EL ENTORNO DEL PARQUE NACIONAL DOÑANA**

**Autor:**

Diego Orlando Tola Aguilar

**Directores:**

Dra. María Fátima Moreno Pérez

Dr. David Lozano Pérez

**Córdoba, España**

**Junio 2016**



Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera  
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL



## **AGRADECIMIENTOS**

A Pedro Gavilán (investigador titular del IFAPA, responsable de los ensayos descritos en el trabajo), Fátima Moreno y David Lozano (Directores del trabajo), Francisco Molina (Director Técnico de la empresa Gat fertilíquidos), Natividad Ruiz (Técnico especialista del IFAPA), Surexport Compañía Agraria SL y Frutas Borja SL (empresas colaboradoras), José Roldán (jefe del grupo de investigación de riegos de la UCO).

Al grupo de profesores que son parte del Máster en Tecnología del Agua en Ingeniería Civil (MTAIC) de la Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior de Belmez por los conocimientos brindados.

Un agradecimiento especial a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), cuyo apoyo mediante la beca MAEC-AECID de Cooperación Universitaria y Científica para el Desarrollo, curso Académico 2015/2016, programa 1.2: Becas Institucionales de Máster Oficial para el Desarrollo. La cual se me ha concedido para realizar el MTAIC, y poder concluir el presente documento.

A Rebeca Ticona Titirico cuyo apoyo en el transcurso del presente trabajo fue muy importante.

A Javier Roldán compañero de clases del Máster y un gran amigo.

Al Ing. Ph.D René Chipana Rivera de la Universidad Mayor de San Andrés en La Paz – Bolivia, por haber despertado en mí la pasión por la temática del Riego y Drenaje.



# ***Utilidades y limitaciones del indicador Huella de Agua de Riego aplicado al cultivo de Fresa en el entorno del Parque Nacional de Doñana.***

## **Índice**

<b>1</b>	<b>Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Materiales y Métodos .....</b>	<b>9</b>
4.1	Breve descripción del sistema de cultivo de la fresa de Huelva. ....	9
4.2	Descripción de los ensayos de riego–producción realizados por IFAPA. ....	10
4.3	Cálculo de los componentes del Balance Hídrico .....	14
4.4	Monitorización del riego .....	17
4.5	Cálculo del Nitrógeno aportado y lixiviado. ....	18
4.6	Indicadores clásicos de la gestión del riego. ....	19
4.7	Huella de Agua de Riego. ....	20
<b>5</b>	<b>Resultados y Discusión .....</b>	<b>23</b>
5.1	Componentes del Balance Hídrico. ....	23
5.2	Nitrógeno aportado .....	25
5.3	Nitrógeno lixiviado .....	25
5.4	Indicadores clásicos de la gestión del riego.....	28
5.5	Huella de Agua de Riego .....	30
5.6	Relación entre la Huella de Agua de Riego y otros indicadores de gestión del riego.....	31
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>35</b>

## Listado de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema del ciclo del cultivo de Fresa en la provincia de Huelva .....	9
<b>Figura 2.</b> Imagen de un macrotúnel al inicio de campaña sin la instalación de los plásticos que lo recubren .....	10
<b>Figura 3.</b> Imagen de un macrotúnel a mediados de campaña con los plásticos instalados.....	10
<b>Figura 4.</b> Localización de los ensayos de producción de fresa en el entorno del P.N. de Doñana, Almonte, Huelva.....	11
<b>Figura 5.</b> Esquema del diseño experimental de bloques al azar con tres tratamientos más un control, manejado por el agricultor, y cuatro repeticiones .....	12
<b>Figura 6.</b> Contadores situados junto a las electroválvulas (uno por tratamiento) .....	15
<b>Figura 7.</b> Contadores situados en lomo (uno por tratamiento).....	15
<b>Figura 8.</b> Instalación de los lisímetros de drenaje .....	16
<b>Figura 9.</b> Instalación de sondas ECH2O.....	18
<b>Figura 10.</b> Instalación de sondas EasyAG .....	18
<b>Figura 11.</b> Valores reales y estimados de las concentraciones de Nitrógeno aportado y lixiviado en el ensayo realizado en la finca Antena en la campaña 2012/2013.....	19
<b>Figura 12.</b> Valores de a) riego y drenaje en base diaria y b) riego, drenaje y evapotranspiración de cultivo (estimada y real) en base quincenal del tratamiento T1 realizado en la finca Corralizas durante la campaña 2013/2014.....	23
<b>Figura 13.</b> Riego, drenaje, evapotranspiración real de cultivo ( $ET_c$ ) y rendimiento de los tres tratamientos realizados en dos ensayos de riego-producción durante la campaña 2012/2013 .....	24
<b>Figura 14.</b> Riego, drenaje, evapotranspiración real del cultivo ( $ET_c$ ) y rendimiento de los tres tratamientos realizados en tres ensayos de riego-producción durante la campaña 2013/2014 .....	24
<b>Figura 15.</b> Concentración de N aportado en base quincenal a través del fertirriego en los cinco ensayos de las campañas 2012/2013 y 2013/2014 .....	26

<b>Figura 16.</b> Concentración de N aportado y lixiviado medida, respectivamente, en los goteros y los lisímetros (Lis-1, Lis-2 y Lis-3) de los tratamientos de la campaña 2012/2013 en la finca Antena.....	26
<b>Figura 17.</b> Evolución temporal de la concentración de N lixiviado en los cinco ensayos de riego-producción de las campañas: a) 2012/2013 y b) 2013/2014 .....	27
<b>Figura 18.</b> Eficiencia de la fertilización ( $N_{\text{lixiviado}}/N_{\text{aportado}}$ ) de los cinco ensayos de riego producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014.....	28
<b>Figura 19.</b> Suministro Relativo de Riego y Productividad del Agua de Riego frente a Riego aplicado en los quince tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014 .....	29
<b>Figura 20.</b> Suministro Relativo de Riego vs Productividad del Agua de Riego en los quince tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014. La línea solo indica tendencia .....	29
<b>Figura 21.</b> Huella de Agua de Riego (Azul+Gris) vs Nitrógeno aplicado en los cinco ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014 en la variedad: a) <i>Sabrina</i> y b) <i>Antilla</i> .....	30
<b>Figura 22.</b> Suministro Relativo de Riego (a) y Productiva del Agua de Riego (b) vs Huella de Agua de Riego (Azul+Gris) y Huella de Agua Azul en los quince tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014.....	32

## Listado de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Textura de los suelos de las fincas donde se realizaron los ensayos.....	11
<b>Tabla 2.</b> Descripción de los ensayos realizados durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014 .....	12
<b>Tabla 3.</b> Calendario de toma de muestras de concentraciones de nutrientes en goteros y lisímetros de los tratamientos de los ensayos de riego-producción de la campaña 2012/2013 .....	13
<b>Tabla 4.</b> Calendario de toma de muestras de concentraciones de nutrientes en goteros y lisímetros de los tratamientos de los ensayos de riego-producción de la campaña 2013/2014 .....	14
<b>Tabla 5.</b> Dosis de N aportado en cobertera ( $N_{\text{cob}}$ ) y fertirriego ( $N_{\text{T1}}$ , $N_{\text{T2}}$ y $N_{\text{T3}}$ ) en los tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014 .....	25





## Listado de Símbolos

$\tau$  : transmisividad (adimensional)

$\Delta HS$  : incremento del contenido de humedad en el suelo ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

$Cap$  : aporte de agua por capilaridad ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

$c_{\max}$  : máxima concentración aceptable del elemento contaminante ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$c_{\text{nat}}$  : concentración natural del elemento contaminante ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$D$  : drenaje ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

$d$  : número de días del ciclo del cultivo al aire libre

DOY : día del año

$Esco$  : escorrentía ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

$ET_c$  : evapotranspiración del cultivo ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$ET_{c\text{ azul}}$  : evapotranspiración del agua azul ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$ET_{o_i}$  : evapotranspiración de referencia al aire libre para el día  $i$  ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$ET_{o_j\text{ green}}$  : evapotranspiración de referencia bajo plástico para el día  $j$  ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$ET_{c\text{ verde}}$  : evapotranspiración del agua verde ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$ET_{c\text{ green}}$  : evapotranspiración de referencia bajo plástico ( $\text{mm día}^{-1}$ )

IP: productividad del agua de riego ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$HA_R$  : huella de agua de riego ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

$HA_{\text{azul}}$  : huella de agua azul ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

$HA_{\text{gris}}$  : huella de agua gris ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

$HA_{\text{verde}}$  : huella de agua verde ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

$i$  : días al aire libre

$j$  : días bajo cubierta

$n$  : número de días del ciclo del cultivo bajo cubierta

$K_c$  : coeficiente de cultivo (adimensional)

$n$  : número de días totales

$P$  : Precipitación (mm)

$P_{ef}$  : precipitación efectiva (mm).

R : riego ( $m^3 ha^{-1}$ )

RIS : suministro relativo del riego (adimensional)

$R_s$  : radiación solar ( $mm d^{-1}$ )

$R_{s\ Green}$  : radiación solar dentro del invernadero ( $mm d^{-1}$ )

$X_{leaching}$  : cantidad de contaminante lixiviado ( $kg ha^{-1}$ )

Y : rendimiento del cultivo ( $kg ha^{-1}$ )

## 1 Resumen

La escasez y degradación de los recursos hídricos es un problema que está afectando de manera global a todas las regiones del planeta. Además, zonas con precipitaciones irregulares y periodos frecuentes de sequías, como ocurre en el sur de España, son especialmente vulnerables a estos efectos. La provincia de Huelva, una zona de producción intensiva de fresas, se ve afectada de manera particular, pues se encuentra situada en el entorno de un paraje natural de gran valor ambiental que hay que preservar, el Parque Nacional de Doñana. La situación de los acuíferos de la zona ha empeorado en los últimos años, tanto en términos de disminución de agua disponible como de contaminación de las masas de agua, fundamentalmente por nitratos. Por ello, desde las administraciones públicas se ha intentado regular la situación de extracción y de calidad del agua a través de planes hidrológicos y de normas restrictivas de aplicación de abonado, como es el caso de los reglamentos de producción integrada en la agricultura. Sin embargo, las herramientas de gestión global del fertirriego son escasas y, en ocasiones, desconocidas por los agricultores. La contaminación de las masas de agua por la actividad agraria ha sido un tema ampliamente abordado desde la perspectiva hidrológica, pero escasamente atendido en términos de gestión agronómica del fertirriego. Por tanto, es necesario encontrar herramientas que mitiguen este impacto ambiental y que permitan evaluar la gestión del binomio agua-fertilizante. Para ello, es indispensable el uso de indicadores de gestión que ayuden a mejorar la aplicación del fertirriego. En Huelva, encontrar este tipo de herramientas tiene un interés especial, pues es una zona donde la agricultura genera riqueza y empleo. Incluso en los años de crisis, entre 2009 y 2016, han aumentado las exportaciones de fresas y otros frutos rojos en más de un 40%, llegándose a generar unos 80.000 trabajos anuales. Por todo lo anteriormente comentado, el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) puso en marcha un plan de I+D+f que ha incluido, entre otras actividades, ensayos de riego-producción en fincas comerciales situadas en el término municipal de Almonte, junto al P. N. de Doñana. Estos ensayos se han realizado en varias campañas de riego. Durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014, el IFAPA ha realizado cinco ensayos de riego-producción con tres tratamientos, más un control, por ensayo, lo que hace un total de quince tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones. En estos ensayos se han medido el volumen de agua de riego y los fertilizantes aplicados, el drenaje producido y el N lixiviado. Igualmente se ha calculado la evapotranspiración del cultivo y se ha contabilizado la producción de fresas, ambas de forma diaria, a lo largo de la campaña. A partir de esta información, el presente trabajo aborda la evaluación del impacto ambiental provocado por la agricultura intensiva de la fresa de Huelva a través del indicador Huella de Agua de Riego.

La Huella de Agua se define a partir del concepto de Agua Virtual y ha sido ampliamente utilizada en los últimos años. En el presente trabajo se abordan las utilidades y limitaciones del indicador Huella de Agua, comparándolo con indicadores clásicos de la gestión del agua de riego, como el Suministro Relativo de Riego y la Productividad del Agua de Riego. Los resultados muestran que el componente de Huella de Agua Gris es el que más aporta al valor final de la Huella de Agua de Riego. Igualmente, los valores obtenidos para el componente de Huella de Agua Azul indican que este componente del indicador Huella de Agua de Riego no aporta información sobre la gestión del agua de riego, pues considera únicamente el uso consuntivo del agua por parte del cultivo (evapotranspiración). El indicador Huella de Agua de Riego se muestra útil para cuantificar el impacto ambiental del fertirriego y podría servir como herramienta de mejora para una unidad de gestión del fertirriego a lo largo del tiempo. Sin embargo, el uso del indicador Huella de Agua de Riego para comparar diferentes unidades de gestión, incluso de un mismo tipo de cultivo, tiene unas limitaciones que deben ser abordadas en los procedimientos estándar de cálculo para poder ser utilizado en procesos de evaluación de tipo benchmarking.



## 2 Introducción

La gestión del agua ha sido una preocupación para todas las civilizaciones desde hace unos 6.500 años. De hecho, el esplendor y decadencia de civilizaciones como la mesopotámica ha estado relacionado en gran medida con la gestión del agua. En la actualidad las 'crisis de agua' tienen una diferencia importante respecto al pasado, vivimos en un mundo global con crecimiento poblacional incontrolado y recursos naturales limitados. Por tanto, el problema ya no es local, sino global y las soluciones deben ser igualmente globales. Prueba de ello es que en 2030 las demandas de agua crecerán hasta los 6.900 millones de m<sup>3</sup>, un 40% por encima del pleno suministro de corrientes accesibles y confiables en el mundo (Water Resources Group, 2009). Con este panorama, muchos expertos pronostican conflictos a nivel mundial si no se actúa sobre la mejora en la gestión de este recurso limitado (Rosegrant *et al.*, 2002; Benoit y Comeau, 2005; Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007; Garrido y Dinar, 2010).

Los problemas de escasez y degradación de los recursos hídricos afectan principalmente a países y regiones con precipitaciones bajas o irregulares, como es el caso de España y, especialmente, de Andalucía. En este sentido, el aumento de la competencia por el uso del agua entre diferentes sectores (agricultura, turismo, industria y población), así como la mayor sensibilidad social a los temas medioambientales, hace que la sociedad exija un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos. Actualmente, la agricultura es el gran consumidor de agua en Andalucía, con aproximadamente un 86% del total de los recursos hídricos (INE, 2015). La agricultura andaluza, y en especial la intensiva bajo plástico, han contribuido a la degradación de las masas de agua subterráneas por el lixiviado de los nutrientes no absorbidos por el cultivo. En este sentido, ha sido notable el aumento de las zonas agrícolas andaluzas declaradas vulnerables de nitratos en los últimos años (BOJA, 2008; IGME, 2012). Por otro lado, la agricultura intensiva andaluza ha contribuido de manera notable a la generación de riqueza y empleo en la región, especialmente en un período de crisis económica y destrucción de empleo. En este sentido, durante el período de 2009 a 2016 las exportaciones hortofrutícolas han crecido más de un 40%, situándose por encima de los 4.000 millones de euros anuales (Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía, 2016). Dentro de los productos hortofrutícolas andaluces, la fresa ocupa un lugar destacado, con un valor de mercado en torno a los 400 millones de euros. Además, la fresa tiene un alto poder de generación de empleo, pues es capaz de crear entre 70.000 y 80.000 empleos anuales. Por tanto, la sostenibilidad económica y ambiental de esta agricultura intensiva es una prioridad de primer nivel para Andalucía.

La gestión del agua de riego ha sido abordada con una metodología científica desde hace décadas. Numerosos autores han definido indicadores de comportamiento que permiten evaluar la gestión del agua de riego y que han sido ampliamente utilizados (Keller y Keller, 1995; Clemmens y Burt, 1997; Molden *et al.*, 1998). Amparados por un marco conceptual proveniente de la hidrología, indicadores como el Suministro Relativo del Riego, la Productividad del Agua o el Índice de Drenaje han sido ampliamente utilizados (Mateos *et al.*, 2002; Lozano *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 2012). Sin embargo, desde hace un par de décadas, un nuevo enfoque proveniente de un marco conceptual relacionado con la "economía ambiental" se ha extendido, realizando numerosas aportaciones (Aldaya *et al.*, 2010; Salmoral *et al.*, 2011; Mekonnen y Hoekstra, 2013). El concepto clave que ha permitido el desarrollo de este marco ha sido el del Agua Virtual (Allan, 1997).

El concepto de Agua Virtual se generó para cuantificar el agua empleada en la generación de un producto. Posteriormente, Hoekstra y Hung (2002) utilizaron el concepto de Agua Virtual para definir el indicador Huella de Agua. La Huella de Agua incluye, además de lo contemplado por el Agua Virtual, el agua empleada en la producción del contenedor del producto, la requerida para generar la energía necesaria en el proceso de producción, más toda el agua necesaria en otros procesos relacionados con la producción o el marketing del producto. Igualmente, introduce un segundo aspecto relacionado con el balance

comercial de los productos, ya que la Huella de Agua entraría a formar parte de este balance. Este enfoque conceptual relaciona el concepto Huella de Agua con una 'eficiencia económica' de su uso.

El concepto Huella de Agua se empleó originariamente para cuantificar el agua utilizada en la generación de un producto o servicio para el mercado a escala global. Sin embargo, la Huella de Agua se ha empleado posteriormente para evaluar y comparar procesos de generación de productos y servicios a escala local. Una de estas aplicaciones locales ha tenido lugar en el sector agrícola, cuantificando la Huella de Agua de distintos cultivos en diferentes localizaciones (Salmoral *et al.*, 2011; Mekonnen y Hoekstra, 2013). El agua real y virtual incorporada a los productos agrícolas se divide en Agua Verde, Azul y Gris (Hoekstra *et al.*, 2009). El Agua Verde de un producto agrícola es el agua de lluvia utilizada por el cultivo en el proceso de evapotranspiración. El Agua Verde queda almacenada en la zona radicular del cultivo y no tiene un uso alternativo. El Agua Azul es el agua de riego utilizada por el cultivo en el proceso de evapotranspiración. El Agua Azul de un producto agrícola proviene del agua de lluvia almacenada en embalses superficiales o en acuíferos subterráneos y, por tanto, tiene un uso alternativo a la actividad agrícola, lo que aumenta su valor en términos de coste de oportunidad de uso. A diferencia del Agua Verde y el Agua Azul, que son aguas 'reales' consumidas por el cultivo en el proceso de evapotranspiración, el Agua Gris es un agua 'virtual' que mide el impacto ambiental generado, aunque no se trata de un agua usada o consumida realmente en el proceso productivo. El Agua Gris de un producto agrícola es el agua 'virtual' que sería necesaria para diluir la carga de contaminantes en los flujos de salida de agua hasta alcanzar las concentraciones establecidas en las normas ambientales de calidad del agua (Chapagain y Hoekstra, 2008; Hoekstra, 2009). Las Aguas Verde, Azul y Gris, generan unas Huellas de Agua Verde, Azul y Gris. A la suma de los tres colores del agua se le denomina Huella del Agua (ISO-14046, 2013). Por tanto, la Huella del Agua permite obtener información espaciotemporal de cómo se utilizó el agua, en función de su origen, en diversos propósitos humanos (Hoekstra *et al.*, 2011).

La Huella de Agua Gris de un producto agrícola cuantifica el impacto ambiental del uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la agricultura. La idea de poder cuantificar el impacto ambiental en términos de agua contaminada fue estudiada anteriormente por otros autores (Falkenmark y Lindh, 1974; Postel *et al.*, 1996). El concepto de Huella de Agua Gris fue introducido en el cálculo de la Huella de Agua por Chapagain *et al.* (2006). Estos autores fueron los primeros en utilizar el concepto de Huella de Agua Gris al evaluar el impacto ambiental de la producción de algodón a nivel mundial. Chapagain *et al.* (2006) propusieron un factor de dilución dependiente del tipo de contaminante y establecieron unos estándares de calidad ambiental del agua. Hoekstra y Chapagain (2008) definieron la Huella de Agua Gris como el ratio entre el nivel de carga de contaminante y la máxima concentración aceptable en las masas de agua. Hoekstra *et al.* (2009) redefinieron el concepto dividiendo la carga de contaminante entre la diferencia de la concentración máxima aceptable y la concentración natural de fondo. A partir de esta definición de Huella de Agua Gris, han sido numerosos los trabajos realizados. Dabrowski *et al.* (2009), Hoekstra *et al.* (2011), Mekonnen *et al.* (2010, 2011a, 2011b), Liu *et al.* (2012), Franke *et al.* (2013) y De Miguel *et al.* (2015) utilizaron el concepto asociándolo al Nitrógeno lixiviado. La Huella de Agua Gris se ha medido en muchos cultivos entre los que se encuentran el trigo (Mekonnen y Hoekstra, 2010), el arroz (Chapagain y Hoekstra, 2010) y el algodón (Chapagain *et al.*, 2006).

La agricultura intensiva de la zona de Huelva está relacionada con el cultivo de fresas y otros frutos rojos (frambuesa, arándano y mora). La mayor parte de esta producción, en torno al 75%, se desarrolla en el entorno del Parque Nacional Doñana (Aldaya *et al.*, 2010), declarado patrimonio mundial de la UNESCO y considerado la mayor reserva ecológica de Europa (Fundación Doñana 21, 2006). Utilizando el marco conceptual de los colores del agua, se han realizado algunos esfuerzos para evaluar el impacto

ambiental del manejo del fertirriego en la producción de fresa en la provincia de Huelva. Sin embargo, los cálculos en términos de Huella de Agua de la fresa o bien asumen valores teóricos de evapotranspiración y nitrógeno lixiviado (Aldaya *et al.*, 2010) o bien ignoran la Huella de Agua Gris en el cálculo de la Huella de Agua (García *et al.*, 2015). Por tanto, para conocer valores reales de la Huella de Agua de la fresa de Huelva, hacía falta un trabajo experimental donde se midiera el agua y el abono que entra y sale del sistema de cultivo, así como valores de producciones reales a nivel de finca comercial.





### **3 Objetivos**

El presente trabajo tiene como punto de partida los datos obtenidos en los ensayos realizados en fincas comerciales por el Sistema de Asistencia al Regante del IFAPA durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014. A partir de estos datos y contando con su colaboración en el desarrollo de este trabajo, nos hemos planteado dos objetivos principales:

1) Calcular la Huella de Agua de Riego a través de sus componentes Verde, Azul y Gris en variedades de fresa cultivada en la provincia de Huelva en ensayos realizados en fincas comerciales.

2) Evaluar las utilidades y limitaciones de la Huella del Agua de Riego como indicador de la gestión del binomio riego-fertilización.



## 4 Materiales y Métodos

Para el cálculo de la Huella de Agua de Riego en la fresa se han utilizado datos experimentales obtenidos por el IFAPA. Los datos corresponden a ensayos de riego-producción en fincas comerciales cercanas a Almonte durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014. Todos los datos de riego y abono aplicado que se muestran en este trabajo hacen referencia a los tratamientos de los ensayos realizados por IFAPA. En ningún caso se utilizaron datos de riego o abonado aportados por los productores. De las fincas comerciales sólo se utilizaron los datos de producción para compararlos con los tratamientos de riego, al considerar que son los potenciales de la zona.

### 4.1 Breve descripción del sistema de cultivo de la fresa de Huelva.

El cultivo intensivo de fresa en Huelva se desarrolla en un ciclo anual que ocupa la mayor parte del año (Figura 1). La plantación tiene lugar a principios o mediados de Octubre. Sin embargo, son varias las tareas agrícolas previas que suelen comenzar a las pocas semanas de haber finalizado la recolección. Entre estas tareas se encuentran el laboreo necesario para dejar la finca sin los lomos de la campaña anterior. A continuación comienza un nuevo alomado de las camas donde se cultiva la fresa. Simultáneamente al alomado, se realizan tareas de desinfección de suelo, de colocación de la cinta de riego y del plástico negro que recubre la cama. La construcción y el mantenimiento del lomo requieren un volumen de agua que no se contempla en este trabajo. Tras la plantación suele darse un riego por aspersión para facilitar el enraizamiento inicial y el establecimiento de la planta. Este volumen de agua aplicada también queda fuera del objeto de este trabajo. La primera fase del cultivo es a campo abierto (Figura 2). Esta fase suele durar alrededor de un mes, pues los macrotúneles quedan cubiertos con plásticos a mediados de noviembre. Los macrotúneles tienen diferentes dimensiones según la finca, pero normalmente cada uno alberga 5 o 6 camas de fresas (Figura 3). Los plásticos de los macrotúneles son de polietileno de baja densidad, de 0,15 mm de espesor, influyendo igualmente en la radiación que alcanza a las plantas el envejecimiento de los mismos. La radiación que llega al interior de los túneles de producción ha sido un aspecto estudiado por Gavilán *et al.* (2015), estableciendo un valor medio de transmisividad del plástico a lo largo de la campaña igual a 0,75.

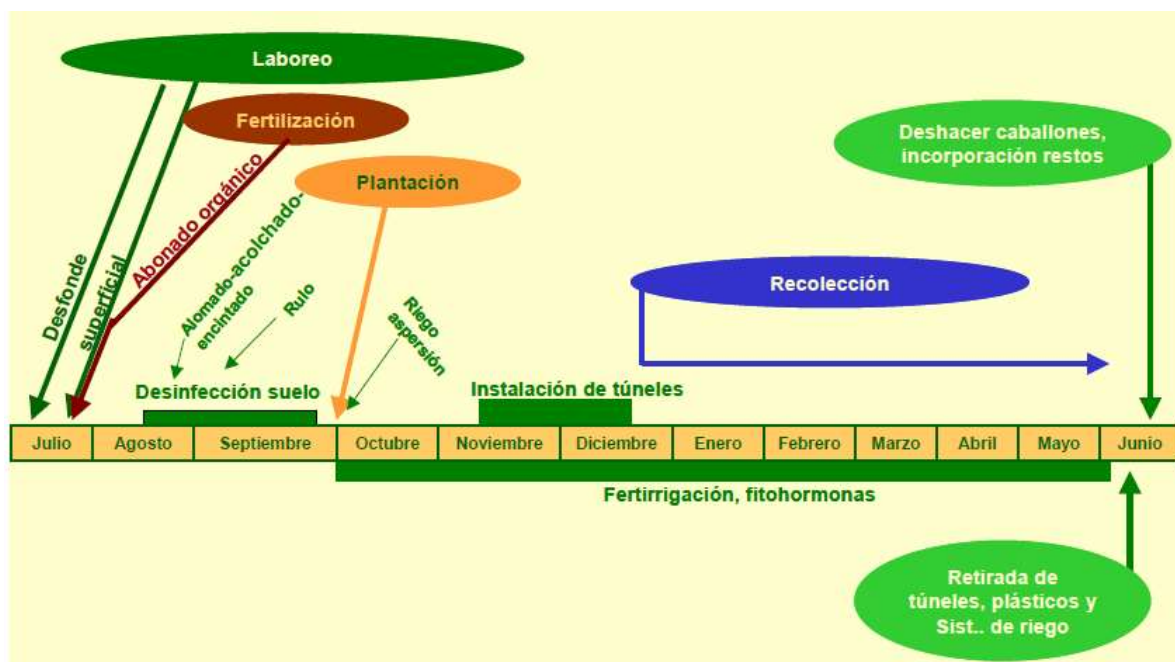


Figura 1. Esquema del ciclo del cultivo de Fresa en la provincia de Huelva



**Figura 2.** Imagen de un macrotúnel al inicio de campaña sin la instalación de los plásticos que lo recubren



**Figura 3.** Imagen de un macrotúnel a mediados de campaña con los plásticos instalados

#### **4.2 Descripción de los ensayos de riego–producción realizados por IFAPA**

Los ensayos se realizaron en tres fincas comerciales de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) de la provincia de Huelva: Corralizas, Antena y Álamo. Todas ellas están localizadas cerca de la Aldea de El Rocío (Almonte, Huelva) (longitud 6°29' Oeste, latitud 37°07' Norte y

75 m s.n.m.) (Figura 4). El clima de la zona es Csa (clasificación de Köppen-Geiger) con un valor medio de lluvia anual de 467 mm. Los valores medio, máximo y mínimo de temperatura anual son 17,8, 36,5 y 14,1°C, respectivamente. Los suelos de las tres fincas comerciales donde se realizaron los ensayos tienen un alto contenido en arena (Tabla 1).



**Figura 4.** Localización de los ensayos de producción de fresa en el entorno del P.N. de Doñana, Almonte, Huelva

**Tabla 1.** *Textura de los suelos de las fincas donde se realizaron los ensayos*

<b>Finca</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>Limo (%)</b>
Corralizas	90	10	0
Antena	92	4	4
Álamo	90	5	5

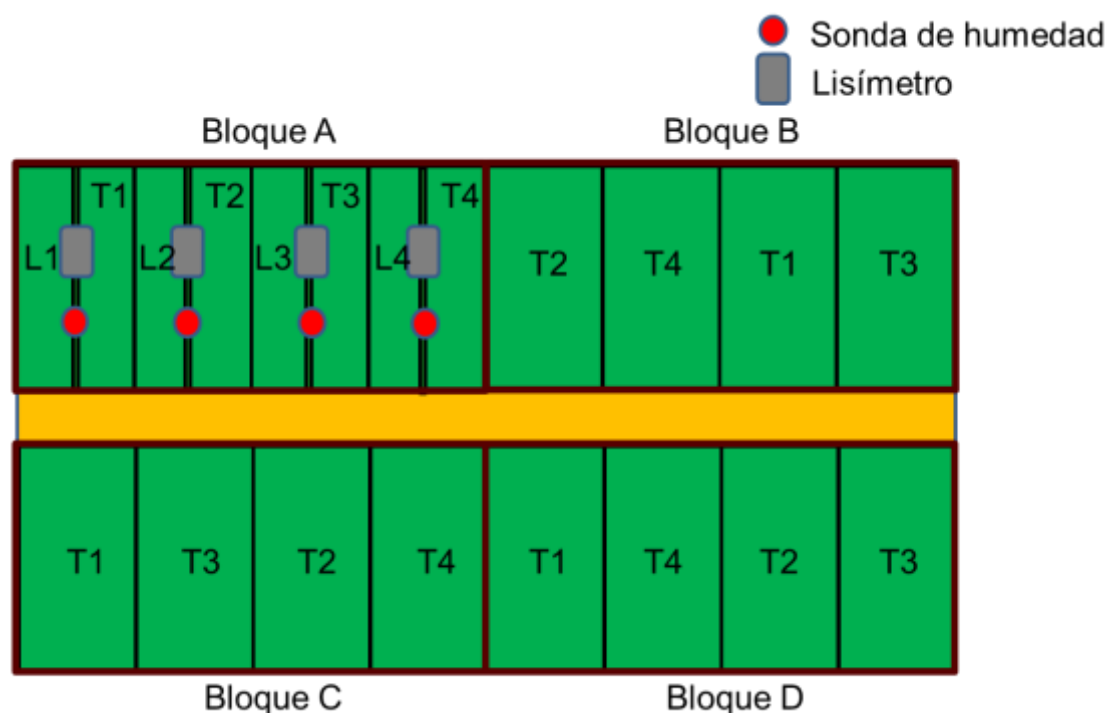
Toda la información referente a los años y las fincas donde se realizaron los ensayos, las variedades empleadas, las fechas de plantación, forzado del cultivo, inicio y fin de cosecha, así como la dimensión de los túneles invernadero, el número de lomos por túnel, la distancia entre lomos y entre plantas y los tratamientos, puede verse en la Tabla 2. Cada ensayo tuvo tres tratamientos, más un control, y cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones (Figura 5). Cada repetición se realizó en un túnel completo, lo que permitió comparar la producción del tratamiento con la producción de la finca. Todos los ensayos tuvieron dos filas de plantas por lomo y las camas sobre las que se plantó la fresa fueron de 0,6 m de base, 0,5 m en parte alta y 0,5 m de altura. Tres lisímetros, uno en cada uno de los tratamientos, fabricados en polietileno con fibra de vidrio y dimensiones 1,4 m x 0,62 m x 0,30 m (largo x ancho x profundidad) fueron instalados en todos los ensayos para medir el drenaje de agua y el nitrógeno lixiviado. Los lisímetros se colocaron a ras del suelo, reconstruyendo encima la parte correspondiente de cama de cultivo. En cada lisímetro se colocaron once plantas de fresa con siete goteros, lo que implica una relación planta/gotero equivalente al resto de la finca.

A excepción del ensayo de cintas de riego (realizado en la finca Álamo, durante la campaña 2013/14), el caudal de la cinta de riego empleada fue de 5 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. En todos los ensayos el agricultor decidió todas las tareas agronómicas a realizar a excepción del riego. Al igual que el riego de los cinco ensayos, el abonado del ensayo realizado en la finca Antena en 2012/2013 fue ordenado por los investigadores de IFAPA. El cabezal de

fertilización fue el mismo para todos los tratamientos de un mismo ensayo. El volumen recogido en las muestras de concentración de fertilizantes de los goteros fue el mismo. Por ello, decidimos tomar como valor de concentración de N aportado en un ensayo la media de los cuatro goteros analizados, uno por tratamiento.

**Tabla 2.** Descripción de los ensayos realizados durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014

Año	Variedad	Finca	Fechas de campaña		Sistema de cultivo			Tratamientos					
			Plantación	Forzado	Cosecha Inicio	Cosecha Final	Dimensión del túnel (m <sup>2</sup> )	Nº de Lomos /Túnel	Distancia Lomos (m)	Plantas (m)	T1	T2	T3
12/13	Sabrina	Corralizas	09/10	10/11	09/01	06/06	70x6,6	6	1,1	0,25	100 ET <sub>c</sub>	1,25 T1	1,5 T1
12/13	Antilla	Antena	15/10	19/11	20/01	12/06	51x7,2	6	1,2	0,25	100 ET <sub>c</sub>	1,25 T1	1,5 T1
13/14	Sabrina	Corralizas	11/10	11/11	08/01	14/05	70x6,6	6	1,1	0,25	5 min	10 min	15 min
13/14	Sabrina	Antena	12/10	09/11	16/01	15/05	51x7,2	6	1,2	0,27	5 min	10 min	15 min
13/14	Antilla	Álamo	22/10	17/11	02/02	12/05	51x6,6	5	1,2	0,25	2,5 l/h/m	3,8 l/h/m	5 l/h/m



**Figura 5.** Esquema del diseño experimental de bloques al azar con tres tratamientos más un control, manejado por el agricultor, y cuatro repeticiones

*Campaña 2012/2013*

En esta campaña se realizaron dos ensayos con el objetivo de obtener valores reales de evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) (Lozano *et al.*, 2016). La  $ET_c$  se obtuvo mediante un balance de agua en el suelo. El cálculo de la  $ET_c$  se realizó por diferencia entre el agua aplicada a través del riego y el agua drenada en los lisímetros. Los cálculos se hicieron con un balance quincenal. Uno de los ensayos se realizó en la finca Corralizas, con la variedad *Sabrina*, y el otro en la finca Antena, con la variedad *Antilla*. El primer tratamiento (T1\_100ET<sub>c</sub>) aplicó una dosis de riego suficiente para satisfacer teóricamente las

necesidades de agua del cultivo. La dosis de riego a aplicar se obtuvo a partir de datos de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) obtenidos de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (Gavilán *et al.*, 2008) y de coeficientes de cultivo tomados de la bibliografía existente (Hanson y Bendixen, 2004; Allen *et al.*, 1998). Los tratamientos T2\_1,25T1 y T3\_1,5T1 aplicaron, respectivamente, un 25% y un 50% más que T1. El tratamiento T4 fue el tratamiento control manejado por el agricultor. Este tratamiento permitió conocer el potencial productivo de la finca, pues los agricultores de fresa de la provincia de Huelva no manejan estrategias de riego deficitario.

A lo largo de la campaña se realizaron medidas de la concentración de nutrientes en el agua de riego y en los lisímetros de drenaje (Tabla 3). La empresa Gat fertilíquidos colaboró con los investigadores del IFAPA en los ensayos y realizó la toma de muestras y el análisis de nutrientes. De cada una de las muestras se obtuvieron datos de pH, conductividad eléctrica, nitratos, amonio, fosfatos, potasio, sulfatos, cloruros, bicarbonatos, sodio, calcio y magnesio. Se recogieron y analizaron los valores de las concentraciones de cuatro goteros (uno por repetición) y de los lisímetros de drenaje de cada uno de los tratamientos. En esta campaña la finca Antena realizó la fertilización siguiendo criterios de los investigadores de IFAPA, que ordenaron incrementos y decrementos en la concentración de los nutrientes aplicados para evaluar el movimiento del Nitrógeno en el suelo. El abonado aplicado a través del fertirriego de la finca Corralizas fue gestionado por la empresa Gat fertilíquidos.

**Tabla 3.** Calendario de toma de muestras de concentraciones de nutrientes en goteros y lisímetros de los tratamientos de los ensayos de riego-producción de la campaña 2012/2013

Recogida de muestras	Antena	Corralizas
09/11/2012	X	X
23/11/2012	X	X
13/12/2012	X	X
04/01/2013	X	X
25/01/2013	X	X
08/02/2013	X	X
26/02/2013	X	X
15/03/2013	X	X
05/04/2013	X	X
26/04/2013	X	X
28/05/2013	X	X

#### Campaña 2013/2014

En esta campaña los investigadores del IFAPA tuvieron como objetivo de los ensayos evaluar la influencia del sistema de riego en la programación del mismo y en la producción final de fresas (Lozano *et al.*, 2014).

Para conocer la influencia del caudal de la cinta de riego en la producción de fresas, se realizó un ensayo en la finca Álamo con la variedad *Antilla*. Cada uno de los tratamientos se regó con una cinta de riego de diferente caudal. El primer tratamiento (T1\_2,5lhm) se regó con una cinta de riego de  $2,5 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , mientras que el segundo (T2\_3,8lhm) y el tercer tratamiento (T3\_5lhm) se regaron con cintas de  $3,8$  y  $5 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , respectivamente.

Para conocer la influencia de la duración del pulso de riego sobre la producción, se plantearon, además, dos ensayos idénticos. El primero se realizó en la finca Corralizas y el segundo en la finca Antena. Se utilizó la variedad *Sabrina* en ambos ensayos. Los tratamientos T1\_5min, T2\_10min y T3\_15min se regaron con pulsos de riego de 5, 10 y 15 minutos, respectivamente. Todos los tratamientos aplicaron la misma dosis diaria de riego. La dosis de riego se calculó midiendo la cobertura del cultivo y utilizando la relación entre

cobertura y coeficiente de cultivo obtenida el año anterior (Lozano *et al.*, 2016). Las eficiencias de riego utilizadas en el cálculo de las necesidades de riego brutas garantizaron que el riego no fuera deficitario.

A lo largo de la campaña 2013/2014 se realizaron medidas de la concentración de nutrientes en el agua de riego y en los lisímetros de drenaje (Tabla 4). La empresa Gat fertilizantes realizó la toma de muestras y los análisis de nutrientes. De cada una de las muestras se obtuvieron datos de pH, conductividad eléctrica, nitratos, amonio, fosfatos, potasio, sulfatos, cloruros, bicarbonatos, sodio, calcio y magnesio. En cada toma de muestras se recogieron y analizaron concentraciones de nutrientes en cuatro goteros, uno por tratamiento más el control, y en tres lisímetros, uno por tratamiento. Gat fertilizantes se encargó del abonado aportado en el fertirriego de todos los ensayos.

**Tabla 4.** Calendario de toma de muestras de concentraciones de nutrientes en goteros y lisímetros de los tratamientos de los ensayos de riego-producción de la campaña 2013/2014

Recogida de muestras	Álamo	Corralizas	Antena
05/12/2012	X	X	X
06/01/2014	X	X	X
05/02/2014	X	X	X
05/03/2014	X	X	X
05/04/2014	X	X	X
05/05/2014	X	X	X

### 4.3 Cálculo de los componentes del Balance Hídrico

La ecuación del Balance Hídrico considera todas las entradas y salidas de agua en el suelo (Allen *et al.* 1998). Esta ecuación ha sido aplicada en el presente trabajo en un balance quincenal (ecuación 1):

$$R + P = ET_c + D + Esc_o + Cap + \Delta HS \quad (1)$$

donde:

*R*: riego

*P*: precipitación

*ET<sub>c</sub>*: evapotranspiración del cultivo

*D*: drenaje

*Esc<sub>o</sub>*: escorrentía

*Cap*: aporte de agua por capilaridad

$\Delta HS$ : incremento o decremento del contenido de humedad del suelo

Dadas las características del sistema de cultivo de la fresa de Huelva sólo hemos considerado tres variables: Riego, Evapotranspiración del cultivo y Drenaje. La precipitación puede considerarse nula, pues aunque los plásticos de los macrotúneles tardan tres o cuatro semanas en ser instalados a partir del trasplante, las camas de cultivo quedan recubiertas desde el inicio con un polietileno negro que impide la entrada de agua en las camas de riego. Además, las camas están elevadas 0,5 m respecto al ras del suelo, con lo que el agua que pudiera estar almacenada en suelo no es accesible para las plantas. La escorrentía se considera igualmente nula al tratarse de un sistema de riego localizado. El aporte por capilaridad se considera también nulo debido a que los suelos son altamente arenosos, el cultivo se sitúa en alto y la profundidad radicular es inferior a la altura de la



cama de cultivo. El incremento o decremento del contenido de agua en el suelo se consideró nulo en un balance quincenal al tratarse de riegos de muy alta frecuencia.

### *Riego*

El riego aplicado se midió con contadores de 2 pulgadas situados en la cabeza del sistema de riego empleado en los ensayos (Figura 6). Cada contador mide el volumen de agua aplicado en las cuatro repeticiones de cada tratamiento. Además, se utilizaron contadores de media pulgada en los lomos (uno por tratamiento) como medida de control del agua aplicada y para cuantificar el volumen de agua de entrada en los lisímetros (Figura 7). Los volúmenes de agua aplicada se midieron diariamente.



**Figura 6.** Contadores situados junto a las electroválvulas (uno por tratamiento)



**Figura 7.** Contadores situados en lomo (uno por tratamiento)

### *Percolación profunda (drenaje)*

Los lisímetros fueron instalados por personal técnico del IFAPA con la colaboración de los trabajadores de las fincas (Figura 8). Los lisímetros se mostraron como una buena herramienta para convencer a los técnicos y encargados de las fincas del exceso de agua aplicado. En este sentido, los lisímetros ayudaron a reducir de forma significativa las dosis de

riego de las campañas siguientes. Este exceso de aplicación de agua de riego ocurre en mayor medida a principio de la campaña de riego, donde las necesidades de agua del cultivo son bajas y existe una gran incertidumbre sobre el agua necesaria para el mantenimiento estructural de los lomos.

Las medidas de volumen de agua drenada se realizaron diariamente a primera hora de la mañana, antes del primer riego. Al tomar las medidas de drenaje a primera hora de la mañana el sistema llevaba unas doce horas sin regar, por lo que las medidas son tomadas en el momento de mayor estabilidad de movimiento de agua en el suelo. Posteriormente, estas medidas se han agregado en base quincenal para ser aplicadas en la ecuación de balance hídrico.



**Figura 8.** Instalación de los lisímetros de drenaje

### *Evapotranspiración del cultivo*

Para programar el riego es necesario conocer las necesidades de agua del cultivo. Para ello se calculó una evapotranspiración teórica del cultivo ( $ET_c$ ). El método para calcular la evapotranspiración del cultivo exige dos etapas: al aire libre y bajo plástico. La ecuación utilizada para el cálculo de la  $ET_c$  de la fresa es la definida por Allen *et al.* (1998) adaptada a las dos etapas de cultivo de la fresa (ecuación 2):

$$ET_c = \sum_{i=1\dots d} Kc_i * ET_{o_i} + \sum_{j=d+1\dots n} Kc_j * ET_{o_j \text{ green}} \quad (2)$$

donde:

d: número de días del ciclo del cultivo al aire libre

n: número de días totales

$K_c$ : coeficiente de cultivo

$ET_{o_i}$ : evapotranspiración de referencia al aire libre para el día i

$ET_{o_j \text{ green}}$ : evapotranspiración de referencia bajo el plástico del macrotúnel para el día j.

La evapotranspiración de referencia al aire libre se estimó utilizando la ecuación de Penman-Monteith FAO56 (Allen *et al.*, 1998) a escala diaria. Los datos climáticos diarios se extrajeron de los registrados por la estación meteorológica de Almonte, perteneciente a la Red SIAR en Andalucía ([www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria)). Las variables que se utilizaron fueron la radiación global, la temperatura, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento.

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia bajo plástico ( $ET_{o \text{ green}}$ ) se utilizó la ecuación propuesta por Fernández *et al.* (2010) que utiliza datos de radiación solar bajo plástico (ecuaciones 3 y 4). Los datos climáticos diarios se tomaron de los registrados

por la estación meteorológica de 'Almonte Bajo Plástico', instalada en la finca Antena, también perteneciente a la Red SIAR (ecuaciones 3 y 4).

$$\text{si } DOY < 220 \quad ET_{o_{green}} = (0.288 + 0.0019 * DOY) * R_{S_{green}} \quad (3)$$

$$\text{si } DOY > 220 \quad ET_{o_{green}} = (1.339 - 0.00288 * DOY) * R_{S_{green}} \quad (4)$$

donde:

$ET_{o_{green}}$ : evapotranspiración de referencia bajo plástico (mm d<sup>-1</sup>)

DOY: día del año

$R_{S_{green}}$ : radiación solar dentro del invernadero (mm d<sup>-1</sup>).

Para estimar la radiación solar dentro de los invernaderos se utilizó la relación existente entre la radiación solar a campo abierto ( $R_s$ ) y el valor de la transmisividad del plástico del macrotúnel ( $\tau$ ) (ecuación 5):

$$R_{S_{green}} = R_s * \tau \quad (5)$$

Gavilán *et al.* (2015) proponen un valor medio de la transmisividad a lo largo de la campaña igual a 0,75.

Los valores de  $K_c$  utilizados para el cálculo de la Evapotranspiración teórica del cultivo durante la campaña 2012/2013 fueron los propuestos por Hanson y Bendixen (2004) a excepción de los utilizados para *Sabrina* al final de la campaña. En este caso, los valores de  $K_c$  se subieron a 0,8 desde el 19 de abril hasta el 1 de mayo y a 0,9 desde el 1 de mayo hasta final de campaña (Lozano *et al.*, 2016). Durante la campaña 2013/2014 los valores de  $K_c$  utilizados para el cálculo de la Evapotranspiración teórica del cultivo fueron los derivados de la ecuación propuesta por Lozano *et al.* 2016 a partir de datos reales de cobertura de cultivo.

Los valores reales de  $ET_c$  obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación de balance hídrico con medidas reales de Riego y Drenaje se obtuvieron en base quincenal.

#### 4.4 Monitorización del riego

##### *Sondas de humedad*

La aplicación del agua de riego fue monitorizada utilizando sondas de humedad del suelo. Se usaron sondas capacitivas ECH2O (Decagon Devices) y EasyAG (Sentek Technologies). Se instalaron tres sensores de humedad ECH2O bajo la línea de plantas a profundidades de 0,15, 0,30 y 0,45 m, mientras que otros dos se situaron bajo la línea de goteros a profundidades de 0,15 y 0,30 m (Figura 9). Los datos de la sondas ECH2O fueron almacenados en un datalogger Em5b (Decagon Devices) y se descargaron con un PC semanalmente. Las sondas EasyAG se instalaron en aquellos tratamientos de los ensayos que recibieron menos agua de riego. Las sondas EasyAG se instalaron entre dos plantas de la misma línea (Figura 10). Los cinco sensores de la sonda EasyAG midieron la humedad del suelo cada 0,10 m hasta una profundidad de 0,50 m. Las sondas EasyAG se conectaron a un servidor de Internet, facilitando el acceso a los datos de humedad del suelo de forma remota y la toma de decisiones sobre el riego aplicado.

Las sondas de humedad no fueron utilizadas en ningún caso para la programación del riego. Sin embargo, la interpretación de la dinámica del agua en el suelo ayudó a ajustar las dosis de riego. Cuando se asumen eficiencias de aplicación del riego teóricas, las sondas de humedad del suelo se muestran como una buena herramienta para comprobar si existe un exceso o un déficit en la aplicación de las dosis de riego. Igualmente se pueden utilizar para identificar el umbral de humedad de Capacidad de Campo y las horas de extracción de agua por el cultivo.



**Figura 9.** Instalación de sondas ECH2O

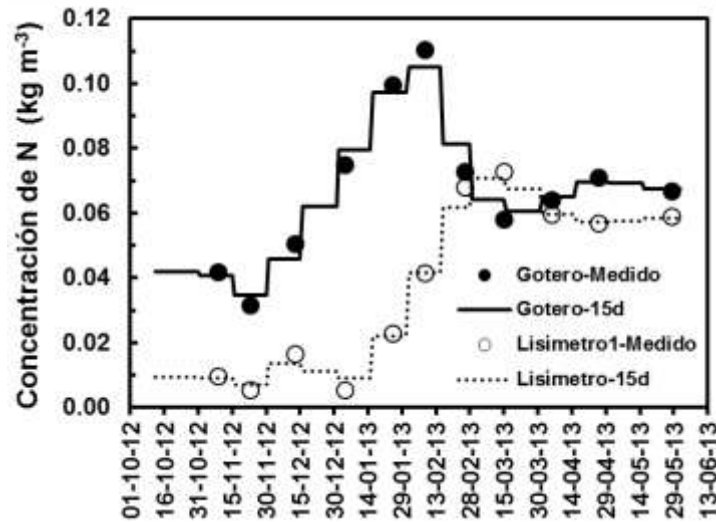


**Figura 10.** Instalación de sondas EasyAG

#### **4.5 Cálculo del Nitrógeno aportado y lixiviado.**

Al objeto de utilizar concentraciones de N aportado (riego) y de N lixiviado (drenaje) en base quincenal, se desarrolló la siguiente metodología a partir de las medidas en campo (Tablas 3 y 4). En primer lugar, se estimaron los valores diarios de concentración de N en agua de riego y drenaje interpolando en base diaria los valores medidos. A los días que van desde el trasplante hasta la primera muestra se le asigna el primer valor medido. Igual que a

los días que van desde la última muestra hasta el final de campaña. Una vez todos los días tienen asignado un valor de concentración de entrada y de salida, se calcularon las medias de estos valores estimados diarios en base quincenal. La Figura 11 muestra los valores de las concentraciones de N aportadas durante la campaña 2012/2013. Los valores medidos corresponden a la media de los cuatro goteros analizados, uno por tratamiento, mientras que los valores estimados están en base quincenal para poder aplicados en la escala temporal del balance hídrico. La Figura 11 muestra igualmente los valores medidos en el lisímetro del tratamiento 1 y los valores estimados en base quincenal del N lixiviado en la finca Antena en la campaña 2012/2013. Esta metodología se aplicó a los 15 tratamientos de los 5 ensayos.



**Figura 11.** Valores reales y estimados de las concentraciones de Nitrógeno aportado y lixiviado en el ensayo realizado en la finca Antena en la campaña 2012/2013

#### 4.6 Indicadores clásicos de la gestión del riego.

Los indicadores clásicos de gestión del agua del riego que se utilizan en este trabajo aportan información relacionada con la eficiencia del agua aplicada mediante el riego (Suministro Relativo del Riego) y con la productividad que tiene el agua de riego (Productividad del Agua de Riego).

##### Suministro Relativo del Riego

El Suministro Relativo del Riego (RIS en nomenclatura inglesa) queda definido a través de la ecuación 6 (Molden *et al.*, 1998):

$$RIS = \frac{R}{10(ET_c - P_{ef})} \quad (6)$$

donde:

RIS: Suministro Relativo del Riego (adimensional)

$ET_c$ : evapotranspiración del cultivo (mm)

$P_{ef}$ : precipitación efectiva (mm). En el caso de la fresa de Huelva es cero.

R: riego ( $m^3 ha^{-1}$ )

Valores de RIS cercanos a 1 indican un uso eficiente del agua. Valores inferiores a 1 indican riego deficitario en un balance estacional, aunque puede existir riego deficitario temporalmente con valores superiores a 1. Valores del indicador en torno a 1.2 son valores óptimos para la gestión de un riego localizado en suelos arenosos.

### Productividad del Agua de Riego

Sobre el concepto de productividad del agua hay generado un gran debate (Boelens y Vos, 2012; Lankford, 2012), pero entrar en la idoneidad de una u otra definición no es objeto de este trabajo. La productividad del agua riego (IP en la nomenclatura inglesa) se calculó usando la ecuación 7 (Pereira *et al.* 2012).

$$IP = \frac{Y}{R} \quad (7)$$

donde:

IP: productividad del agua de riego ( $\text{kg m}^{-3}$ )

Y: rendimiento del cultivo ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

R: riego ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

### 4.7 Huella de Agua de Riego.

El procedimiento de cálculo de la Huella de Agua utilizado en este trabajo es el propuesto por Hoekstra *et al.* (2011), 'The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard'. Siendo este procedimiento de cálculo el aceptado como estándar internacional de cálculo del indicador Huella de Agua. El objeto del presente trabajo es la evaluación del indicador Huella de Agua en la gestión del fertirriego. Por tanto, en el cálculo de la Huella de Agua, que de aquí en adelante llamaremos Huella de Agua de Riego, sólo va a ser contabilizada el agua real y virtual del proceso de producción. El agua consumida en procesos energéticos de bombeo, en la fabricación del contenedor, en marketing o en cualquier otro uso que no sea la producción del cultivo no están incluidos en este análisis.

De esta forma, la Huella de Agua de Riego ( $HA_R$ ) es calculada como la suma de tres componentes (ecuación 8):

$$HA_R = HA_{verde} + HA_{azul} + HA_{gris} \quad (8)$$

donde:

$HA_{verde}$  : Huella de Agua Verde ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

$HA_{azul}$  : Huella de Agua Azul ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

$HA_{gris}$  : Huella de Agua Gris ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )

La Huella de Agua Verde y la Huella de Agua Azul se expresan mediante las ecuaciones 9 y 10 a través de la relación entre el uso consuntivo de agua del cultivo y el rendimiento del mismo (Hoekstra *et al.*, 2011):

$$HA_{verde} = \frac{10 * \sum_{i=1}^d ET_{c\ verde}}{Y} \quad (9)$$

$$HA_{azul} = \frac{10 * \sum_{j=d+1}^n ET_{c\ azul}}{Y} \quad (10)$$

donde

d: número de días del ciclo del cultivo al aire libre

n: número de días totales

Y: rendimiento del cultivo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),

$ET_{c\ verde}$ : evapotranspiración del Agua Verde ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$ET_{c\ azul}$ : evapotranspiración del Agua Azul ( $\text{mm día}^{-1}$ )

Para el sistema de cultivo de la fresa de Huelva, la Huella de Agua Verde es despreciable. Por un lado, el plástico de los túneles se coloca al mes de trasplantar el cultivo (Tabla 2), lo que implica que la raíz apenas tiene unos pocos centímetros. Por otro lado, la cama de cultivo queda recubierta por un plástico negro de polietileno y la planta queda situada a 0.50 m de la superficie del suelo, por lo que el agua de lluvia, si la hubiera, no puede ser utilizada en ningún caso por la planta para la evapotranspiración, que es la condición necesaria para ser considerada Huella de Agua Verde. Por tanto, en el caso del sistema de cultivo de la fresa de Huelva toda el agua consumida por el cultivo en la transpiración puede ser considerada como Agua Azul.

La Huella de Agua Gris ( $HA_{gris}$ ) se calcula a través de la ecuación 11 (Hoekstra *et al.*, 2011).

$$HA_{gris} = \frac{(X_{leaching})}{(c_{max} - c_{nat}) \cdot Y} \quad (11)$$

donde:

$X_{leaching}$ : cantidad de contaminante lixiviado ( $kg\ ha^{-1}$ ). En el caso de la agricultura se utiliza habitualmente el valor de nitrógeno lixiviado, ya que es el elemento más móvil dentro del suelo.

$c_{max}$ : máxima concentración aceptable del elemento contaminante ( $kg\ m^{-3}$ ). La normas Europeas de calidad del Agua (European Nitrates, Groundwater and Drinking Water Directives) establecen una concentración máxima de nitrato lixiviado de  $50\ mg\ l^{-1}$ , unos  $11.3\ mg\ l^{-1}$  de N. La US Environmental Protection Agency establece  $10\ mg\ l^{-1}$  de N, lo que equivale a  $45\ mg\ l^{-1}$  de Nitrato, como concentración máxima. En el presente trabajo hemos utilizado la concentración más restrictiva,  $10\ mg\ N\ l^{-1}$ , tal y como recomienda Aldaya *et al.* (2010)

$c_{nat}$ : concentración natural del elemento contaminante ( $kg\ m^{-3}$ ). Aldaya *et al.* (2010) recomienda utilizar un valor de 0. En el presente trabajo hemos seguido esta recomendación.

Y: rendimiento del cultivo ( $kg\ ha^{-1}$ ).

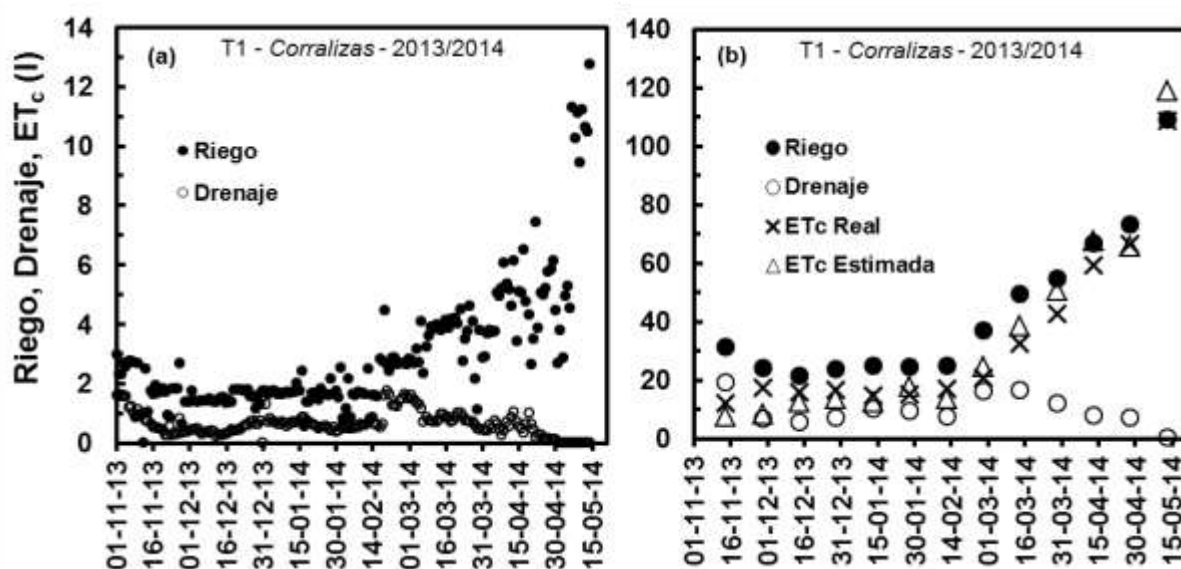




## 5 Resultados y Discusión

### 5.1 Componentes del Balance Hídrico.

Los componentes del Balance Hídrico medidos a diario en este trabajo fueron riego y drenaje. La evapotranspiración real del cultivo ( $ET_c$ ) fue calculada por diferencia entre el riego y el drenaje en un balance quincenal. La evapotranspiración teórica del cultivo, utilizada en la programación del riego, fue calculada en base diaria. A modo de ejemplo, la Figura 12 muestra los valores del tratamiento T1 del ensayo de Corralizas en la campaña 2013/2014. La Figura 12a muestra los valores de riego y drenaje medidos a la entrada y salida del lisímetro. La Figura 12b muestra los valores de riego, drenaje y evapotranspiración de cultivo (teórica y real) agrupados en base quincenal. Los resultados muestran que en el caso del balance hídrico, la agrupación temporal quincenal es adecuada, pues las magnitudes y dinámicas de los valores de la evapotranspiración real y teórica son similares.



**Figura 12.** Valores de a) riego y drenaje en base diaria y b) riego, drenaje y evapotranspiración de cultivo (estimada y real) en base quincenal del tratamiento T1 realizado en la finca Corralizas durante la campaña 2013/2014

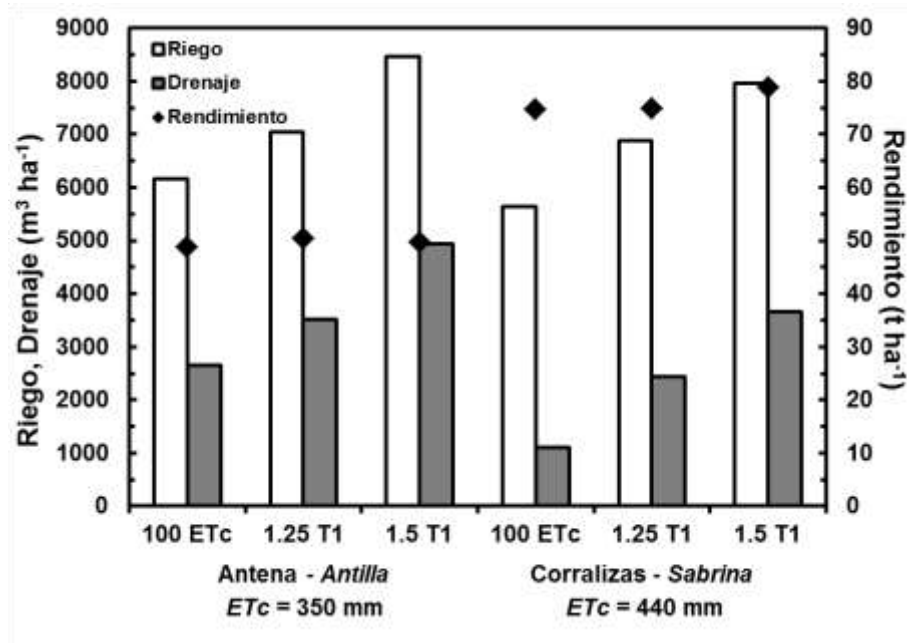
#### **Campaña 2012/2013**

La Figura 13 muestra una diferencia importante de  $ET_c$  en función de la variedad utilizada en los ensayos. Mientras la variedad *Antilla* se situó en un valor medio de evapotranspiración en torno a los 350 mm, la variedad *Sabrina* llegó hasta los 440 mm. Los valores de  $ET_c$  durante toda la campaña están condicionados en gran medida por la duración de la misma. La campaña 2012/2013 duró 240 días, en torno a 20 días más que la 2013/2014. *Sabrina* obtuvo mayores rendimientos, 75.000 kg ha<sup>-1</sup>, que *Antilla*, 50.000 kg ha<sup>-1</sup>. En ambos casos las producciones obtenidas para cada una de las variedades fueron similares a los valores de producción de la finca comercial.

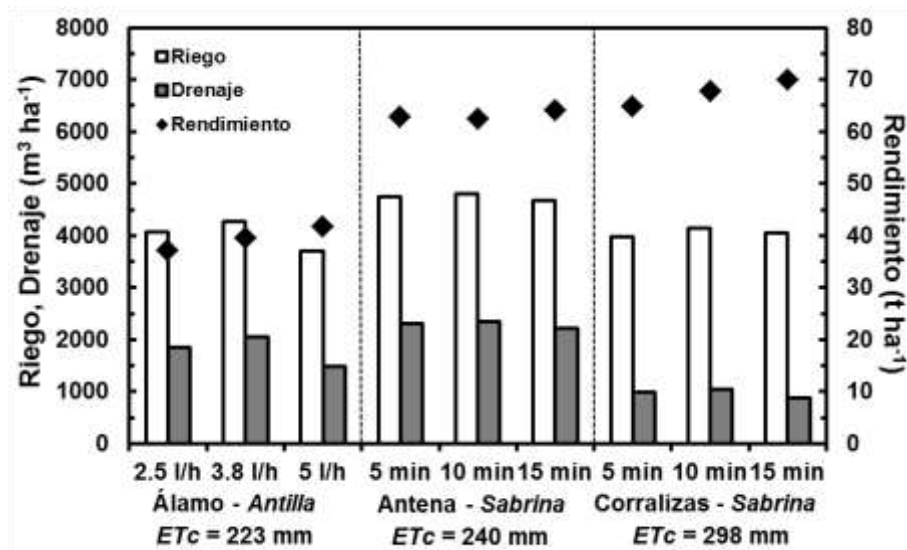
#### **Campaña 2013/2014**

En la Figura 14 se muestra el volumen de riego aplicado, el drenaje medido y el rendimiento de tres ensayos de riego durante la campaña 2013/2014. La Figura 14 vuelve a mostrar las diferencias de los valores de evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) en función de la variedad utilizada en el ensayo. Mientras *Antilla* se situó en un valor medio en torno a los 223 mm, *Sabrina* obtuvo un valor máximo de 298 mm en la finca Corralizas. Al igual que en

la campaña anterior, *Sabrina* obtuvo mayores rendimientos, en torno a  $65.000 \text{ kg ha}^{-1}$ , mientras que en *Antilla* se obtuvieron valores de  $40.000 \text{ kg ha}^{-1}$ . El menor rendimiento de la campaña 2013/2014 respecto a la campaña 2012/2013 está relacionado con la menor duración de la campaña de riego. El menor volumen de riego aplicado durante esta campaña respecto a la 2012/2013 (Figura 13) se debe a una distinta planificación de los ensayos de riego. En la campaña 2013/2014 el mejor conocimiento sobre el desarrollo del cultivo y la eficiencia de los sistemas de riego, permitió la aplicación de un menor volumen de agua de riego para alcanzar igualmente la producción máxima.



**Figura 13.** Riego, drenaje, evapotranspiración real de cultivo ( $ET_c$ ) y rendimiento de los tres tratamientos realizados en dos ensayos de riego-producción durante la campaña 2012/2013



**Figura 14.** Riego, drenaje, evapotranspiración real del cultivo ( $ET_c$ ) y rendimiento de los tres tratamientos realizados en tres ensayos de riego-producción durante la campaña 2013/2014

## 5.2 Nitrógeno aportado

En la Tabla 5 se muestran los datos del nitrógeno total aportado en las campañas de riego, separando la aplicación de cobertera (aplicación de nitrógeno durante las labores de preparación del suelo), en forma de estiércol, de la de fertirriego (aplicación de nitrógeno con el agua de riego).

**Tabla 5.** Dosis de N aportado en cobertera ( $N_{cob}$ ) y fertirriego ( $N_{T1}$ ,  $N_{T2}$  y  $N_{T3}$ ) en los tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014

Campaña	Finca	Cobertera		Fertirriego		
		Estiércol (kg ha <sup>-1</sup> )	$N_{cob}$ (kg ha <sup>-1</sup> )	$N_{T1}$ (kg ha <sup>-1</sup> )	$N_{T2}$ (kg ha <sup>-1</sup> )	$N_{T3}$ (kg ha <sup>-1</sup> )
2012/2013	Antena	15.000	75	421	482	576
2012/2013	Corralizas	15.000	75	161	197	227
2013/2014	Antena	15.000	75	133	136	137
2013/2014	Corralizas	15.000	75	122	126	129
2013/2014	Álamo	15.000	75	81	88	91

Los resultados obtenidos en relación con la aportación de N son exclusivamente de los tres tratamientos planificados en los ensayos (T1, T2, T3). Los resultados muestran una diferencia notable en el abonado aplicado a través del fertirriego en Antena en la campaña 2012/2013. Esto es debido a que los investigadores del IFAPA planificaron un incremento y decremento de la concentración de N a lo largo de la campaña para analizar el movimiento del N en el suelo. En el resto de ensayos se obtuvieron valores de N aplicado en torno a 200 kg ha<sup>-1</sup>, el valor límite que marca el Reglamento de Producción Integrada (BOJA, 2013). En cualquier caso, las concentraciones de N aplicado en los ensayos son responsabilidad exclusiva de los investigadores del IFAPA.

La Figura 15 muestra la evolución del N aportado a lo largo de las campañas de riego. En la campaña 2012/2013 la mayor aportación de N en fertirriego en la finca Corralizas respecto a la campaña 2013/2014 está relacionada con la mayor duración de la campaña, pues la concentración de nitrógeno aportado fue similar. La evolución de la concentración de N aportado mediante el fertirriego refleja patrones similares cuando la empresa Gat fertilizantes se encargó de la dosificación del abonado (Corralizas en 2012/2013 y 2013/2014 y Antena y Álamo en 2013/2014).

## 5.3 Nitrógeno lixiviado

La Figura 16 muestra la evolución temporal de las concentraciones de N aportado y lixiviado en los tres tratamientos de la campaña 2012/2013 en la finca Antena. El incremento de concentración de Nitrógeno en el agua de riego efectuado a partir de mitad de noviembre a petición de los investigadores del IFAPA, ha permitido evaluar la velocidad de desplazamiento del Nitrógeno en el suelo. Las curvas de nitrógeno lixiviado están desplazadas unos 40 días respecto al N aportado, lo que implica una distancia de desplazamiento del N desde el gotero hasta el fondo del lisímetro de 0,75 m. La velocidad de desplazamiento del Nitrógeno es, por tanto, 0,56 m mes<sup>-1</sup>, similar a la obtenida por Guimerá *et al.* (1995) para un cultivo de fresa en suelo arenoso del Maresme, en la que se midió 0,5 m mes<sup>-1</sup>. Esta velocidad de desplazamiento limita la posibilidad de realizar un balance de entradas y salidas de Nitrógeno en base quincenal, incluso mensual, que permita acercarse a un valor de consumo de nitrógeno por la planta.

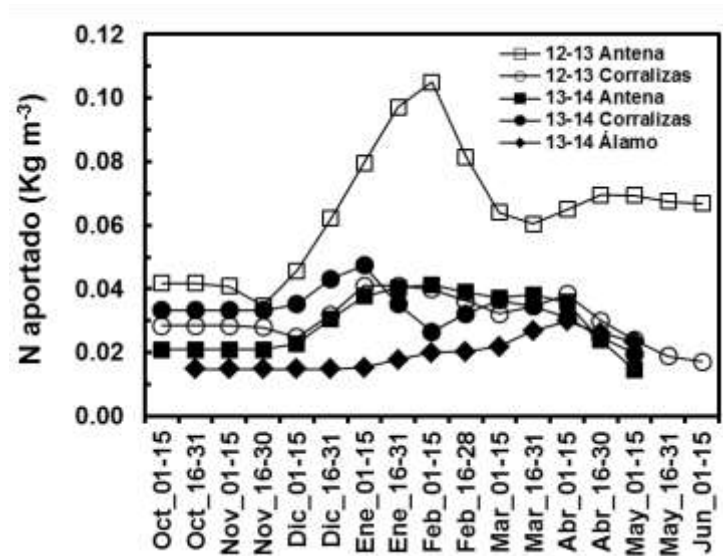


Figura 15. Concentración de N aportado en base quincenal a través del fertirriego en los cinco ensayos de las campañas 2012/2013 y 2013/2014

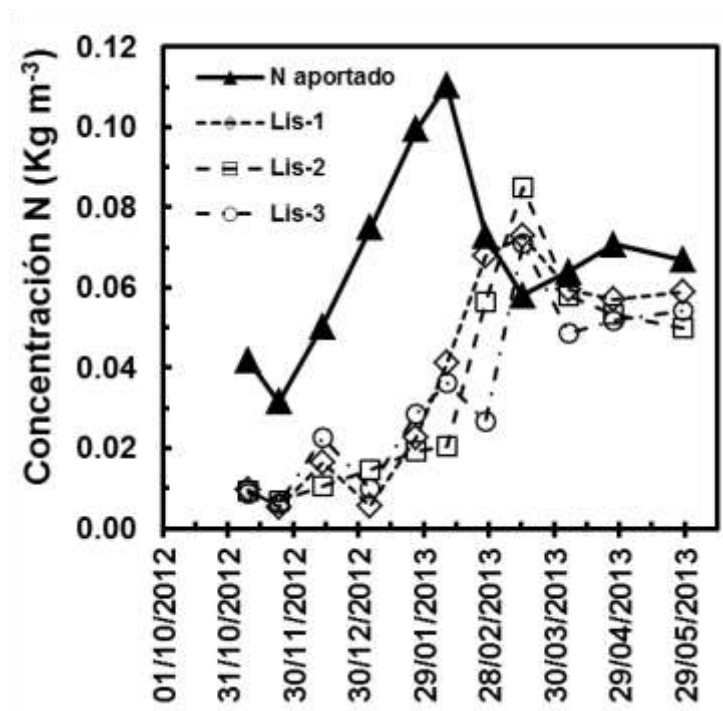


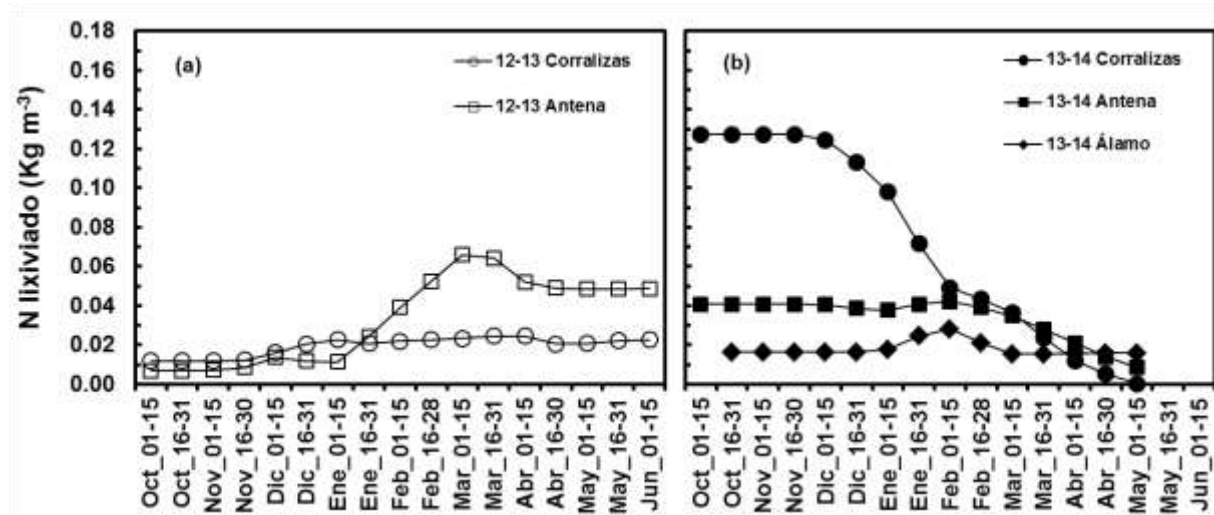
Figura 16. Concentración de N aportado y lixiviado medida, respectivamente, en los goteros y los lisímetros (Lis-1, Lis-2 y Lis-3) de los tratamientos de la campaña 2012/2013 en la finca Antena

El balance de entradas y salidas a lo largo del año presenta igualmente algunas limitaciones. En la Figura 17 vemos los datos, promedio de los tres tratamientos, de concentración de N lixiviado en los cinco ensayos. La campaña 2012/2013 fue la primera campaña de cultivo de la finca Antena. Hasta esa fecha la finca Antena tenía vegetación natural. Los valores de concentración de N lixiviado al inicio de campaña son los más bajos de todos los ensayos, a pesar de que en esta finca se aportó, por decisión de los investigadores del IFAPA, casi el triple de Nitrógeno que en el resto de los ensayos. El incremento a partir de enero está relacionado con el incremento de N aportado a partir de final de noviembre (Figura 15). Estos valores tan bajos al inicio de campaña hacen pensar

que el suelo almacenó una gran parte del N aportado. Si comparamos las concentraciones de N lixiviado en la finca Antena al final de la campaña 2012/2013 y al principio de la 2013/2014 vemos como los valores son muy similares. En ningún caso el valor de la concentración de N lixiviado volvió a los valores del inicio de la campaña 2012/2013.

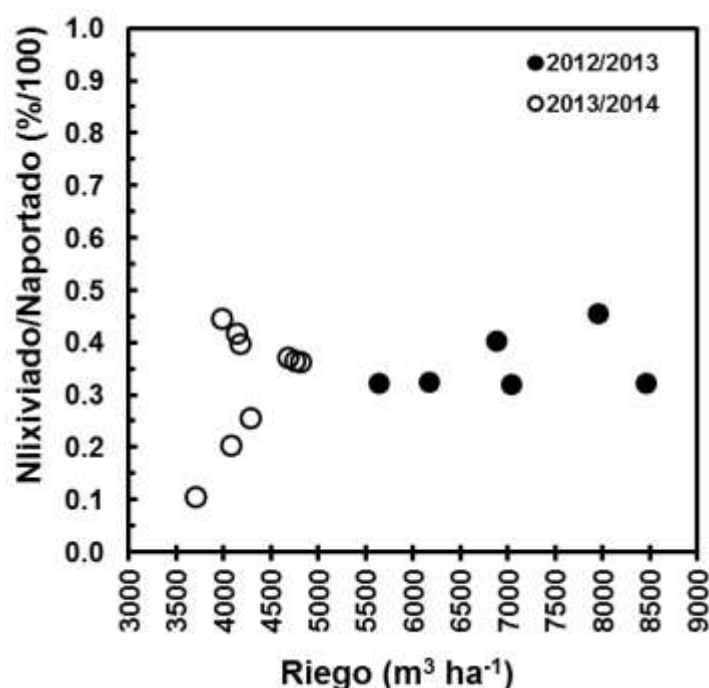
En el caso de la finca Corralizas en la campaña 2012/2013 vemos unas concentraciones de N lixiviado constantes en el tiempo, acorde con la curva de entrada de concentración de N aportado (Figura 15). Sin embargo, al inicio de la campaña 2013/2014 vemos unas concentraciones de N lixiviado muy altas, del orden de cinco veces superiores a las de final de la campaña anterior. La explicación podría estar en un mayor aporte de N de cobertera en la campaña 2013/2014 que el indicado por los responsables de la finca (Tabla 3), ya que, en teoría, las coberteras aplicadas al inicio de cada ensayo son similares. El incremento de las dosis de riego a partir del mes de diciembre facilita el lavado del N, llevando la concentración de N lixiviado a niveles similares a la campaña anterior a principios de marzo. El drenaje disminuye de forma notable en la finca Corralizas y Antena a final de campaña, llegando a anularse por completo al inicio de mayo en la finca Corralizas. Por tanto, es lógico que el N lixiviado a final de campaña en las fincas Corralizas y Antena sea bajo.

En el caso de la finca Álamo durante la campaña 2013/2014 los valores son similares a los que se mostraban en Corralizas al final de la campaña anterior. Esto tiene lógica porque ambas fincas pertenecen al mismo propietario y, en teoría, ya que en Corralizas 2013/2014 no ocurre así, deberían tener una gestión similar del abonado de cobertera.



**Figura 17.** Evolución temporal de la concentración de N lixiviado en los cinco ensayos de riego-producción de las campañas: a) 2012/2013 y b) 2013/2014

La Figura 18 muestra la eficiencia del abonado, calculada mediante la relación entre el N lixiviado medido en los lisímetros ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el N aportado por el riego ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). El valor medio de eficiencia del abonado se sitúa en torno a 0.3, superior al valor de 0.1 asumido por Aldaya *et al.* (2010) para el cálculo de la Huella de Agua Gris en el cultivo de fresa de Huelva. Llama la atención que riegos entre  $6.000$  y  $9.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  tengan valores similares de eficiencia de abonado que riegos en el entorno de los  $4.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Esto puede deberse a que un mayor volumen de riego incrementa la capacidad de almacenamiento de N en el suelo a través de un aumento de los flujos de agua horizontales, pero es sólo una hipótesis y harían falta otros estudios para confirmarla. En la finca Antena, que aportó en 2012/2013 más del doble de nitrógeno en fertirriego que la finca Corralizas (Tabla 5), influyó notablemente el efecto de ser su primer año de cultivo, donde el suelo sólo tenía el N orgánico aportado de manera natural.

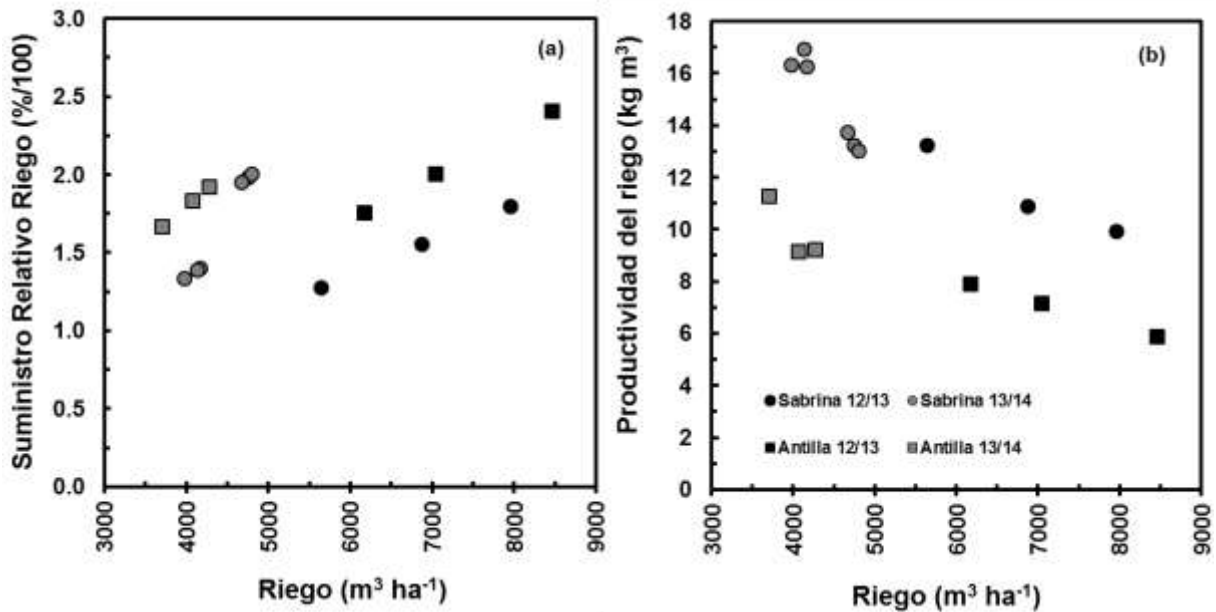


**Figura 18.** Eficiencia de la fertilización ( $N_{lixiviado}/N_{aportado}$ ) de los cinco ensayos de riego producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014

#### 5.4 Indicadores clásicos de la gestión del riego

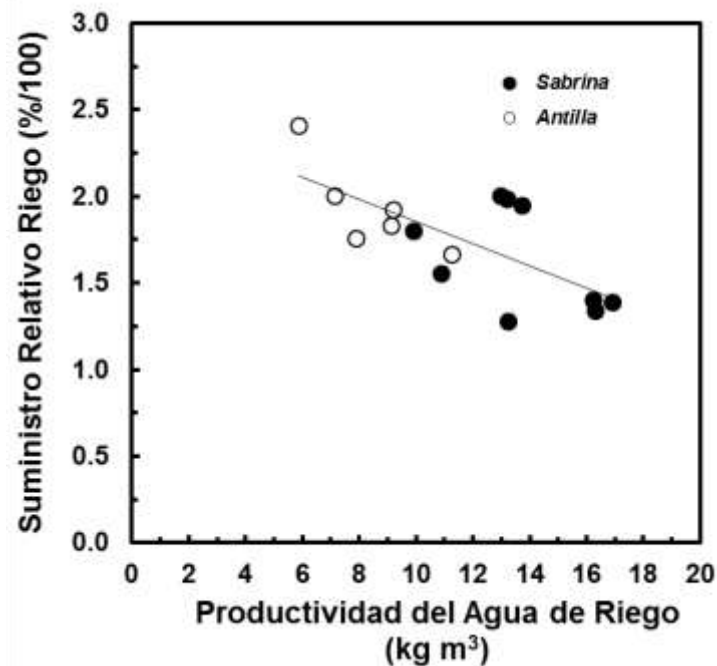
Todos los valores de Suministro Relativo de Riego (RIS) obtenidos en los quince tratamientos analizados están por encima de 1,25 (Figura 19a). Regar por debajo de este umbral en el sistema de cultivo de la fresa de Huelva, donde predominan los suelos muy arenosos (Tabla 1), entraña un riesgo alto de déficit hídrico en algún momento de la campaña de riego, situación no deseada por los agricultores. Un RIS de 1,25 en *Sabrina* durante la campaña 2012/2013 se obtuvo a pesar de la baja eficiencia de aplicación del agua en la primera parte de la campaña de riego. Este valor estuvo condicionado por el desconocimiento del coeficiente de cultivo real al inicio del ensayo. La programación del riego en esta primera campaña se realizó siguiendo las recomendaciones de coeficiente de cultivo encontradas en la bibliografía, con valores menores de 0,85, mientras que al final de la campaña el coeficiente de cultivo alcanzó valores cercanos a 1,1.

Los valores de Productividad del Agua de Riego obtenidos se encuentran en un rango entre 6 y 17 kg m<sup>-3</sup>, para riegos entre 3.700 y 8.500 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, en las variedades *Sabrina* y *Antilla*. La Figura 19b muestra claramente la diferencia entre ambas variedades de fresa. Los valores más bajos de productividad del agua de riego están asociados a los mayores volúmenes de riego aplicados en la variedad *Antilla*. La Figura 19b muestra igualmente la evolución ocurrida en términos de mejor aprovechamiento del recurso hídrico entre las campañas 2012/2013 y 2013/2014. En la campaña 2012/2013 se ensayaron valores de riego usuales en la zona (García *et al.*, 2015), mientras en la campaña 2013/2014 se ensayaron riegos entre 3.700 y 4.500 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, cercanos a los requerimientos contemplados en los planes hidrológicos de cuenca.



**Figura 19.** Suministro Relativo de Riego y Productividad del Agua de Riego frente a Riego aplicado en los quince tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014

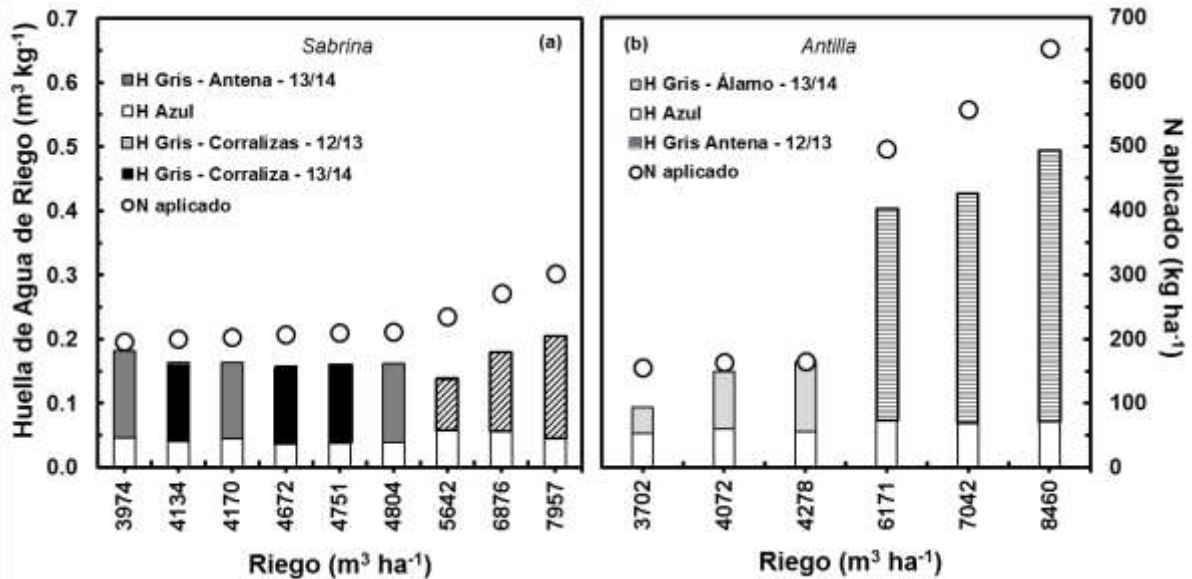
La Figura 20 muestra, en términos generales, el aumento de la Productividad del Agua de Riego cuando disminuye el Suministro Relativo de Riego. A pesar de que hay factores, como la densidad de plantación, que influyen en esta relación, la tendencia generalizada es que a mayor eficiencia en la aplicación del riego, mayor es la productividad obtenida con el agua de riego.



**Figura 20.** Suministro Relativo de Riego vs Productividad del Agua de Riego en los quince tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014. La línea solo indica tendencia

### 5.5 Huella de Agua de Riego

La Huella de Agua Gris condicionó el valor de la Huella de Agua de Riego en mayor medida que la Huella de Agua Azul. En la Figura 21 se ha representado el valor de la Huella de Riego (Azul+Gris) para *Sabrina* (Figura 21a) y *Antilla* (Figura 21b) en los cinco ensayos de riego-producción realizados durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014. El promedio de Huella de Agua Azul para la variedad *Sabrina* en nueve tratamientos fue de  $0,047 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , mientras que en el caso de *Antilla* el valor de la Huella de Agua Azul fue de  $0,064 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ . Este mayor valor de la Huella de Agua Azul no está relacionado con la mejor o peor gestión del riego, sino con la eficiencia en el uso del agua de las diferentes variedades de fresa (Martínez-Ferri *et al.*, 2016). En este sentido, a igualdad de evapotranspiración, *Sabrina* tiene una mayor producción que *Antilla*. En cualquier caso, los valores de Huella de Agua Azul son más parecidos entre sí que los de la Huella de Agua Gris. En términos de Huella de Agua Gris los valores de *Sabrina* se corresponden con la gestión del abono por parte de la empresa Gat fertilizadores, siendo similar en todos los tratamientos (Figura 21a). El valor medio de Huella de Agua Gris para *Sabrina* fue de  $0,121 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , más del doble que el valor medio de Huella de Agua Azul. En el caso de *Antilla* el valor de Huella de Agua Gris difiere según la gestión del abonado. La decisión de los investigadores del IFAPA de incrementar la concentración de N de manera notable a partir de Noviembre, ha sido muy útil a la hora de discutir sobre la idoneidad del indicador de Huella de Agua ante diferentes estrategias de gestión de la fertilización (Figura 21b). En la finca Álamo el valor medio de la Huella de Agua Gris en *Antilla* fue de  $0,079 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , más alto igualmente que el de Huella de Agua Azul. Para el caso de la finca Antena, donde el nitrógeno aplicado fue claramente excesivo, el valor medio de la Huella de Agua Gris en *Antilla* fue  $0,368 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , cinco veces superior al valor de Huella de Agua Azul en la finca (Figura 21b).



**Figura 21.** Huella de Agua de Riego (Azul+Gris) vs Nitrógeno aplicado en los cinco ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014 en la variedad: a) *Sabrina* y b) *Antilla*

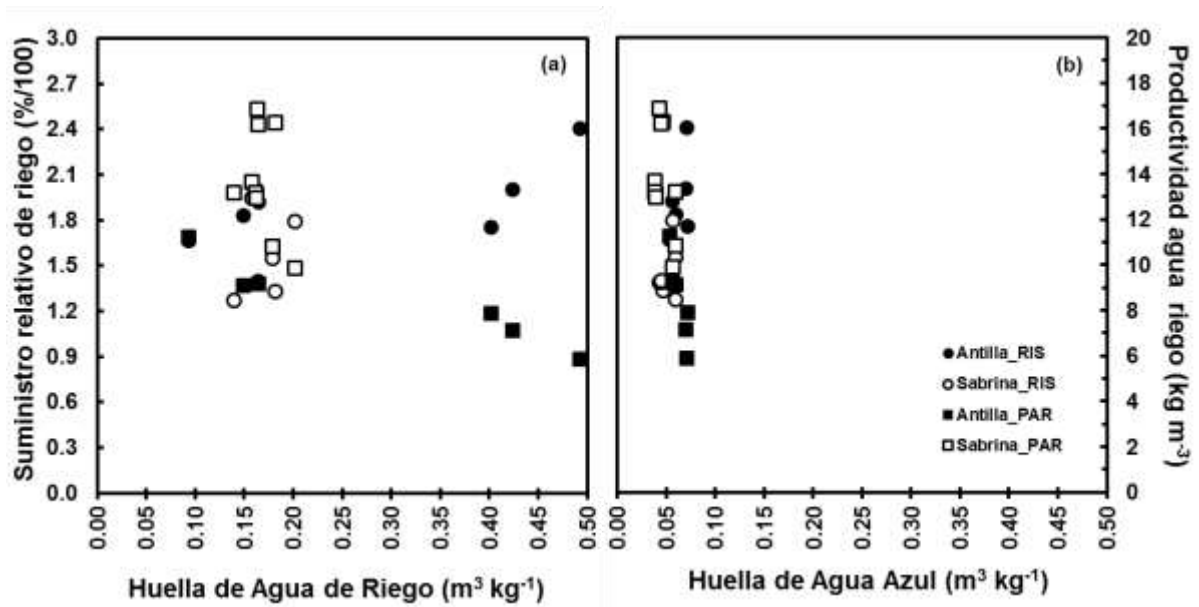


## 5.6 Relación entre la Huella de Agua de Riego y otros indicadores de gestión del riego.

La Figura 22 muestra la relación entre las Huellas de Agua (Azul+Gris y Azul) y los principales indicadores clásicos de la gestión del riego. En el ensayo de *Antilla* realizado durante la campaña 2012/2013. Se produjo un exceso de abonado respecto al resto de ensayos (Figura 19b). Sin embargo, en términos de eficiencia en la aplicación del agua de riego, el indicador Suministro Relativo de Riego no refleja grandes diferencias respecto a los valores de *Antilla* en la campaña 2013/2014 con dosis de riego notablemente inferiores (Figura 20b). Esto es debido a que la evapotranspiración de cultivo de la campaña 2012/2013 fue de 350 mm frente a los 222 mm de la campaña 2013/2014. En términos de Productividad del Agua de Riego se observan valores inferiores para la campaña 2012/2013 en *Antilla* (Figura 20a). Por tanto, el riego aplicado durante la campaña 2013/2014 fue más productivo. En términos del impacto ambiental provocado por un exceso de abonado ni siquiera el indicador de eficiencia en la fertilización ( $N_{\text{lixiviado}}/N_{\text{aportado}}$ ) nos da una idea clara de la magnitud del impacto, pues los valores de este indicador están influidos en parte por la profundidad de suelo a la que midamos el N lixiviado. Sin embargo, la Huella de Agua de Riego (Azul+Gris) sí cuantifica, al menos de forma relativa, la magnitud del impacto ambiental. En el caso de *Antilla* en la campaña 2012/2013 el indicador llega a valores de  $0,492 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , mientras que en el resto de ensayos, donde se realizó un abonado racional, el valor máximo fue de  $0,202 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  (Figura 22a)

Los valores de Huella de Agua Azul se movieron en un estrecho rango comparado con la amplia variación obtenida para el Suministro Relativo de Riego y la Productividad del Agua de Riego (Figura 22b). Esto ocurre porque el indicador de Huella de Agua Azul no refleja en ningún caso la bondad en la gestión del agua de riego. Este indicador sólo transmite información del rendimiento de la planta en diferentes condiciones de evapotranspiración real del cultivo. Por tanto, el cálculo de la Huella de Agua de Riego obviando la Huella de Agua Gris (García *et al.* 2015) o asumiendo valores teóricos de N lixiviado (Aldaya *et al.*, 2010) no presenta ninguna utilidad cuando el objetivo es la mejora de la gestión del fertirriego.

El indicador Huella de Agua de Riego (Azul+Gris) puede ser una herramienta muy útil para la mejora de la gestión del fertirriego de una finca a lo largo de varias campañas de riego. Sin embargo, con los estándares actuales de cálculo de la Huella de Agua de Riego, habría que tener precaución con el uso de este indicador para comparar su valor absoluto entre diferentes unidades de gestión del fertirriego. En primer lugar, son pocos los trabajos donde se aportan datos de nutrientes aportados y lixiviados, lo habitual es estimarlo. En segundo lugar, habría que considerar que la escala temporal que permite el cálculo de la Huella de Agua está condicionada por la profundidad de suelo a considerar a la hora de medir el N lixiviado, pues las velocidades de movimiento de las sales en el suelo son relativamente bajas y su desplazamiento hasta masas de agua subterráneas podría superar incluso a la escala anual de la campaña de riego. Por tanto, para hacer comparable la Huella de Agua Gris de distintas unidades de gestión del fertirriego, habría que estandarizar la profundidad de suelo a la que se mide el nitrógeno no tomado por la planta. Igualmente, el movimiento de los nutrientes en el suelo está altamente condicionado por el tipo de suelo. A escalas temporales insuficientes podría dar resultados que no reflejaran la buena o la mala gestión del fertirriego en una determinada campaña de riego.



**Figura 22.** Suministro Relativo de Riego (a) y Productiva del Agua de Riego (b) vs Huella de Agua de Riego (Azul+Gris) y Huella de Agua Azul en los quince tratamientos de los ensayos de riego-producción de las campañas 2012/2013 y 2013/2014

## 6 Conclusiones

El presente trabajo ha permitido calcular el indicador la Huella de Agua de Riego en ensayos experimentales de riego-producción de fresa realizados por el IFAPA. Estos ensayos se realizaron en fincas comerciales de la provincia de Huelva durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014 al objeto de reproducir las condiciones reales del cultivo.

Igualmente, en este trabajo se evaluó la utilidad de la Huella de Agua de Riego como indicador de la gestión del fertirriego a nivel de finca. La primera conclusión es que la Huella de Agua Gris contribuyó en mayor medida que la Huella de Agua Azul al valor total de la Huella de Agua de Riego, por lo que obviarla del cálculo de la Huella de Agua de Riego o asumir valores teóricos de lixiviación de Nitrógeno disminuye su utilidad como indicador de la calidad del fertirriego aplicado en una determinada unidad de gestión. En segundo lugar, podemos concluir que la Huella de Agua Azul fue similar en todos los ensayos de una misma variedad, independientemente de la gestión del fertirriego, por lo que la Huella de Agua Azul no explica ningún aspecto relacionado con la gestión del fertirriego.

La Huella de Agua de Riego no aportó información sobre la gestión del agua de riego en términos de eficiencia o productividad en su uso, lo que sí hacen indicadores clásicos de gestión como el Suministro Relativo de Riego o la Productividad del Agua de riego. Sin embargo, la Huella de Agua de Riego contribuyó a cuantificar el impacto ambiental del fertirriego, más allá de lo que lo hace el indicador clásico de eficiencia en la fertilización (N lixiviado/N aportado). La Huella de Agua de Riego cuantifica la cantidad de recursos hídricos necesarios para corregir el impacto ambiental que genera el fertirriego. Este aspecto es el más novedoso y útil, pues permite su uso como indicador de la gestión del binomio agua-fertilizante en una determinada unidad de gestión a lo largo del tiempo. Sin embargo, la posibilidad de utilizarlo como indicador en un análisis de tipo benchmarking entre diferentes unidades de gestión debe ser abordada con precaución. Sobre todo si detrás de este proceso de evaluación y comparación global está la idea de transmitir el valor del indicador Huella de Agua de Riego al consumidor de estos productos agrícolas. Factores como la profundidad de suelo a la que se toman las muestras de N lixiviado o la profundidad de las masas de agua subterráneas que pueden ser contaminadas potencialmente son claves a la hora de establecer procedimientos estándar que permitan comparar diferentes unidades de gestión.



## 7 Bibliografía

Aldaya, M.M., García-Novo, F., Llamas, M.R., 2010. Incorporating the water footprint and environmental water requirements into policy: reflections from the Doñana Region (Spain). In: *Papeles de Agua Virtual. Número 5. Fundación Marcelino Botín*. pp. 193 – 217.

Allan, J.A., 1997. Virtual water: a long term solution for water short Middle Eastern economies?. In: *Paper presented at the 1997 British Association Festival of Science*, University of Leeds, September.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.

Benoit, G., Coneau, A., 2005. A Sustainable Future for the Mediterranean: *The Blue Plan's Environments and Development Outlook*, UNEP-MAP-Blue-Plan, Earthscan, London.

Boelens, R., Vos, J. 2012. The danger of naturalizing water policy concepts: Water productivity and efficiency discourses from field irrigation to virtual water trade. *Agricultural Water Management*, 108, 16-26.

BOJA, 2008. Decreto 36/2008, de 5 de febrero, por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de de origen agrario. Boletín Oficial de la Comunidad Autónoma de Andalucía nº 36 de 20/02/2008: 5-15.

BOJA, 2013. Orden de 3 de julio de 2013, por la que se aprueba el Reglamento Específico de Producción Integrada de Fresa. Boletín Oficial de la Comunidad Autónoma de Andalucía nº 132 de 09/07/2013: 8-37.

Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije H.H.G., Gautam, R., 2006. The Water Footprint of cotton consumption: An assessment of impact of Worldwide consumption of cotton products on the water resource in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60 (1), 186 – 203.

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. 2008. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water International*, 33 (1), 19–32.

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., 2010. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective. *Value of Water Research Report Series No.40*, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands.

Clemmens, A.J., Burt, C.M., 1997. Accuracy of irrigation efficiency estimates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123, 443–453.

Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007. In: Molden, D. (Ed.), *Water for Food, Water for Life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. International Water Management Institute (IWMI). Earthscan, London, UK.

## Bibliografía

Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía, 2016. Observatorio de precios. <http://www.cap.junta-andalucia.es/agriculturaypesca/observatorio>.

Dabrowski, J.M., Murray, K., Ashton, P.J., Leaner, J.J., 2009. Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions. *Ecological Economics*, 68, 1074–1082.

De Miguel, A., Kallache, M., García-Calvo, E., 2015. The Water Footprint of Agriculture in Duero River Basin. *Sustainability*, 7, 6759 - 6780.

Falkenmark, M., Lindh, G., 1974. How can we cope with the water resources situation by the year 2015?. *Ambio*, 3 (3-4), 114-122.

Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E., 2010. Measurements and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 28(6), 497-509.

Franke, N.A., Boyacioglu, H. Hoekstra, A.Y., 2013. Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines. *Value of Water Research Report Series No. 65, UNESCO-IHE*, Delft, the Netherlands.

Fundación Doñana 21, 2006. Manual de Buenas Prácticas Agrarias Sostenibles. “De la Agricultura al desarrollo Rural Sostenible”. <http://www.donana.es/wp-content/uploads/2013/01/Manual-Buenas-practicas-agrarias-sostenibles.pdf>.

Falkenmark, M., Rockström, J. 2005. Neither water nor food security without a major shift in thinking. A water scarcity close up. In: Miranowski, J.A., Scanes, C.G. (Eds.), *Perspectives in World Food and Agriculture*. Wiley-Blackwell, London, 978-0-8138-2031-6.

García, J., Díaz, J. A. R., Camacho, E., Montesinos, P. 2015. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*, 87, 594-602.

Garrido, A., Dinar, A., 2010. Managing Water Resources in a Time of Global Change: Mountains, Valleys and Flood Plains, Routledge, London.

Gavilán, P., Estévez, J., Berengena, J., 2008. Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134 (1), 1–12.

Gavilán, P., Ruiz, N., Lozano, D. 2015. Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in greenhouses in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. *Agricultural Water Management*, 159, 307-317.

Guimerà, J., Marfà, O., Candela, L., Serrano, L. 1995. Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management. *Agriculture, ecosystems & environment*, 56 (2), 121-135.

Hanson, B., Bendixen, W., 2004. Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. *California Agriculture*, 58, 48–53.

Hoekstra, A. Y., 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68 (7), 1963–1974.

Hoekstra, A. Y., Hung, P. Q. 2002. Virtual water trade. *A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of water research report series*, 11, 166.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resource*, Blackwell Publishing, Oxford. United Kindom.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. and Mekonnen, M. M., 2009. *Water Footprint Manual: State of the Art 2009*, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., Mekonnen, M. M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan. London/Washington, DC. 203 pp.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2012. *Las aguas subterráneas en la planificación hidrogeológica*. Ministerio de Economía y Competitividad, Gobierno de España. 85 pp. Consultado en 22 de Febrero de 2016. Disponible en: [http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/AGUAS\\_SUBTERRANEAS\\_1de7\\_tcm7-213349.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/AGUAS_SUBTERRANEAS_1de7_tcm7-213349.pdf)

Instituto Nacional de Estadística, 2015. *Encuesta sobre el suministro y tratamiento de agua*. [www.ine.es](http://www.ine.es)

ISO 14046, 2013. *Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

Keller, A.A., Keller, J., 1995. Effective efficiency: a water use efficiency concept for allocating freshwater resources. Discussion Paper 22. Center for Economic Policy Studies, Winrock International.

Lankford, B. 2012. Fictions, fractions, factorials and fractures; on the framing of irrigation efficiency. *Agricultural Water Management*, 108, 27-38.

Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A., Gerbens-Leenes, W., 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological Indicators*. 18, 42-49. [doi:10.1016/j.ecolind.2011.10.005](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.005).

Lozano, D., Ruiz, N., Gavilán, P., 2014. Evaluación de la uniformidad de distribución de cintas de riego en condiciones de campo en una producción comercial de fresa en Almonte (Huelva). XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid, 10 al 12 de junio de 2014.

## Bibliografía

Lozano, D., Mateos, L. 2008. Usefulness and limitations of decision support systems for improving irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, 95(4), 409-418.

Lozano, D., Ruiz, N., Gavilán, P., 2016. Consumptive water use and irrigation performance of strawberries. *Agricultural Water Management*, 169, 44-51.

Martínez-Ferri, E., Soria, C., Ariza, M. T., Medina, J. J., Miranda, L., Domínguez, P., Muriel, J. L. 2016. Water relations, growth and physiological response of seven strawberry cultivars (*Fragaria x ananassa* Duch.) to different water availability. *Agricultural Water Management*, 164, 73-82.

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2010. A Global and high-resolution assessment of the Green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Science*, 14, 1259 – 1276. DOI: 10.5194/hess-14-1259-2010

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2011a. The Green, blue and grey Water Footprint of crops and derived crop production. *Hydrology and Earth System Science*, vol 15, pp 1577 – 1600. doi:10.5194/hess-15-1577-2011

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2011b. National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption, *Value of Water Research Report Series No. 50.*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2013. Water Footprint benchmarks for crop production. *Value of Water Research Report Series No. 64.*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., de Fraiture, C.J., 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research Report 20, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Postel, S. L., Hansen, E., Ehrlich, P. R., 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, 271, 785-788.

Pereira, L. S., Cordery, I., Iacovides, I. 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39-51.

Rosegrant, M., Cai, X., Cline, S., 2002. World Water and Food to 2025. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington D.C.

Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., Llamas M.R., 2011. Análisis de la Huella Hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. Fundación Botín, Observatorio del Agua. España.

Water Resources Group, 2009. Charting Our Water Future: Economic frameworks to inform decision-making. 2030 Water Resources Group. 198 pp.