

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**Efecto de la variedad vegetal
sobre las medidas de sensores
ópticos**

Mención: Hortofruticultura y jardinería

Curso 2017/2018

Alumno/a:

María Amparo Huesa Amat

Director/es:

Luisa Gallardo Pino
Francisco Manuel Padilla Ruiz



Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Índice:

1. Intereses y objetivos.....	5
2. Revisión bibliográfica.....	8
2.1. Importancia del cultivo de pepino en España.	8
2.2. Importancia del N en la producción agraria.	9
2.2.1. Avances en agricultura en relación a la aplicación de nutrientes.	9
2.2.2. El nitrógeno en la agricultura.	11
2.2.3. Problemática del nitrógeno en la agricultura y en los recursos hídricos. ..	12
2.2.4. Contaminación por nitratos en España.....	14
2.2.5. Contaminación por nitratos en Almería.....	16
2.2.6. Soluciones a la problemática del N en la agricultura.	17
2.3. Estimación del contenido de N en planta a partir de sensores ópticos proximales.	19
2.3.1. Contenido de clorofila en hoja y medidores de clorofila.....	20
2.3.2. Reflectancia de la cubierta vegetal.	24
3. Materiales y métodos.	28
3.1. Localización del ensayo.....	28
3.2. Cultivo de pepino y tratamientos experimentales de N.....	30
3.3. Medidas del contenido de clorofila con SPAD y Apogee.....	32
3.4. Medidas de reflectancia del cultivo de Crop Circle.	34
3.5. Estadística.....	35
4. Resultados.....	35
4.1. Medidas del contenido de clorofila con SPAD.	36
4.2. Medidas del contenido de clorofila con Apogee.	38
4.3. Medidas de reflectancia del cultivo con CropCircle.	40
4.3.1. NDVI.....	40

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

4.3.2. GNDVI.....	42
4.3.3. RVI.....	44
4.3.4. GRVI.....	46
5. Discusión.....	48
5.1. Discusión general de los resultados.....	48
5.2. Relación con la bibliografía.....	50
6. Conclusiones.....	52
Bibliografía.....	54

1. Intereses y objetivos.

El nitrógeno (N) es el elemento fundamental para el desarrollo de los cultivos y permite obtener producciones elevadas. La aportación de N a los cultivos se realiza mediante fertilizantes minerales, fundamentalmente nitrato, o a través de abonos orgánicos y estiércol. García *et al.* (2007) señalan que un exceso de nitrato en la fertilización conlleva múltiples inconvenientes agronómicos y que inciden en la salud. Igualmente, a nivel ambiental, una excesiva fertilización nitrogenada puede favorecer la liberación de óxido nitroso (N₂O), un conocido gas de efecto invernadero. Mediante la lixiviación o escorrentía de nitratos no utilizados por los cultivos se pueden contaminar las aguas subterráneas y/o superficiales.

Actualmente, las prácticas de manejo del riego y del nitrógeno de los productores de hortalizas del sureste español, se basan generalmente en la experiencia de "lo que funciona" en términos de producir de manera segura cosechas rentables y de alto beneficio (Thompson *et al.* 2017). Por lo general, solo una pequeña parte del N aplicado es recuperada por los cultivos, y el exceso de N es susceptible de perderse en el medio ambiente donde se asocia con diversos problemas ambientales (Padilla *et al.*, 2018). Los residuos agrarios generan grandes impactos económicos, ambientales y paisajísticos y su gestión es crucial para evitar prácticas indeseables y poco sostenibles como el vertido de residuos de productos fitosanitarios (García *et al.*, 2016) o abuso de fertilizantes.

Normalmente, el N y el riego suministrado a los cultivos de hortalizas son excesivos para los requerimientos de los cultivos. Para lograr una gestión intensiva y sostenible de la producción de hortalizas, será necesario ajustar con precisión tanto el N como el suministro de riego a los requisitos de los cultivos (Thompson *et al.* 2015).

La contaminación de acuíferos subyacentes a campos de cultivo es consecuencia directa de la lixiviación de nitratos utilizados en la agricultura. Debido a esto, la concentración de nitratos en las aguas subterráneas de algunos puntos acuíferos del Campo de Dalías supera los límites propuestos por la Unión Europea en la Directiva Nitratos (CEE, 1991), por lo que se han declarado zonas vulnerables a la contaminación por nitratos (Figura 1) (García *et al.*, 2007). En Andalucía esta designación se lleva a cabo mediante el Decreto 261/1998, del 15 de diciembre, por el que se designan las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Andalucía (BOJA, 2008). El reconocimiento de zonas vulnerables obliga a la implantación de prácticas de manejo que reduzcan su contaminación.

En consecuencia, existe la necesidad de desarrollar programas y herramientas de gestión de riego y nitrógeno con la flexibilidad para hacer frente a las variaciones de clima, tipo de suelo, variedades, etc (Thompson *et al.*, 2007).

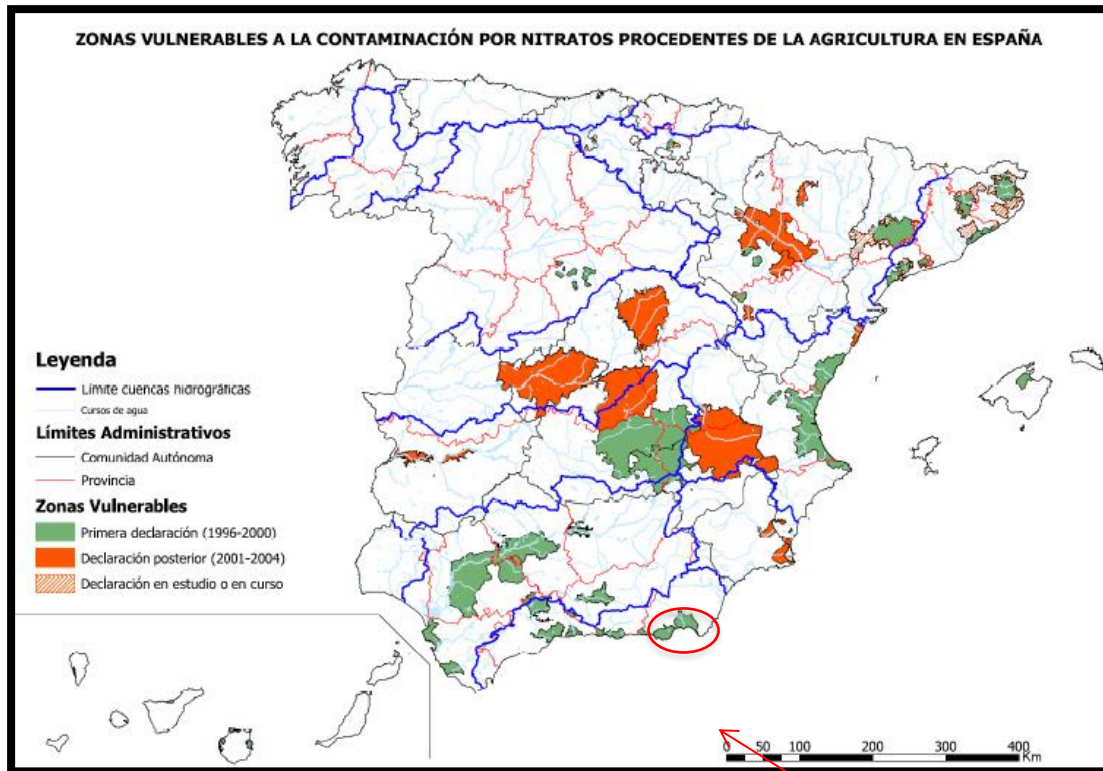


Figura 1. Zonas vulnerables a la contaminación de nitratos procedentes de la agricultura en España. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente. 2004. Con un círculo rojo se ha marcado la zona del Campo de Dalías, en el sureste de España.

García *et al.* (2007), recomiendan iniciar campañas de concienciación de las implicaciones medioambientales de la horticultura protegida, y señalan que los productos procedentes de la horticultura intensiva necesitan ganar credibilidad en cuanto a sostenibilidad.”

Las mejoras en la eficiencia del uso de nitrógeno (NUE) pueden lograrse mediante el uso de herramientas de detección o monitorización de planta para la determinación del estado nutricional de N (Samborski *et al.*, 2009). En este sentido, los sensores ópticos pueden jugar un papel fundamental. Estos sensores son dispositivos que miden propiedades ópticas de las plantas (son muy sensibles a la cantidad de N de las mismas) y que por tanto pueden emplearse como indicadores del estado nutricional de los cultivos (Samborski *et al.*, 2009). De hecho, hay estudios que demuestran que los sensores ópticos pueden indicar el estado nutricional de los cultivos y así hacer un uso eficiente del N.

Un manejo óptimo del nitrógeno supone también un notable ahorro económico en fertilizante, al disminuir las aportaciones de N y aprovechar mejor el N mineral disponible en el suelo.

Conocer y aplicar los parámetros de suficiencia de N en cultivos hortícolas no deberá traducirse en una disminución en la producción final, ya que esto conllevará a un mejor criterio de aportes de fertilizantes en función de las necesidades del cultivo. Este criterio, tal y como indica Camacho (2015), consiste en aportar en cada periodo del ciclo del cultivo la cantidad que se prevé que absorba éste de cada uno

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

de los elementos esenciales que necesita para su desarrollo. En este sentido la monitorización frecuente con sensores ópticos puede servir para determinar las necesidades del cultivo.

Si bien los sensores ópticos se pueden usar como herramientas de monitorización del estado nutricional en N de un cultivo, hasta la fecha se desconoce el papel que tiene la variedad vegetal sobre las medidas de estos sensores. Se han calculado valores de suficiencia de sensores ópticos para una variedad dada, pero se desconoce si las medidas de los sensores ópticos varían sustancialmente dependiendo de la variedad analizada.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado, es determinar el efecto de la variedad vegetal en un cultivo de pepino sobre las medidas absolutas de tres sensores ópticos proximales.

Si no hay diferencias notables en las medidas de los sensores ópticos entre variedades, entonces los valores de suficiencia disponibles en la metodología y calculados para una sola variedad, se podrían aplicar a otras variedades, lo que ampliaría el potencial de uso de estos sensores ópticos. Si por el contrario se encontraran diferencias sustanciales en las medidas de los sensores ópticos entre variedades, los valores de suficiencia calculados para una variedad dada no se podrían aplicar a cualquier variedad.

El trabajo experimental se ha realizado en un cultivo de pepino en invernadero. Tal y como indica Reche (2011), la mayoría de las provincias españolas cultivan pepino. Su producción en España es de 541.985 toneladas (producción media de los años 2004-2008), y la superficie total cultivada de pepino se mantiene constante entre las 7.000 y 8.000 ha, destacando las provincias de Almería y Granada por su mayor superficie cultivada (Figura 2) (Reche, 2011).

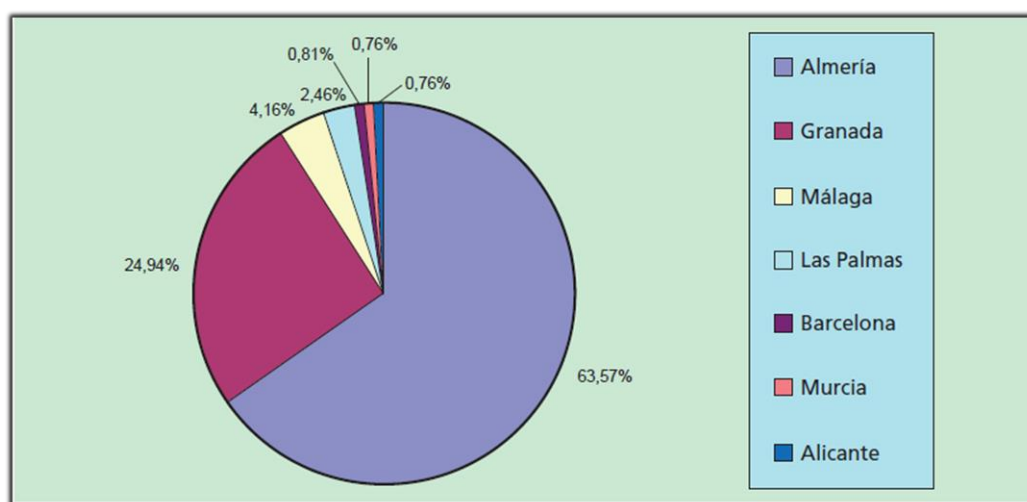


Figura 2. Provincias con mayor superficie de cultivo protegido de pepino. Porcentaje con respecto al total. Sup. Total = 6.481 ha (media quinquenio 04/08). Fuente: Anuarios de la Producción Agraria. MARM.

2. Revisión bibliográfica.

2.1. Importancia del cultivo de pepino en España.

En España, el cultivo de pepino en invernadero es de gran importancia, siendo Almería, Granada, Málaga, Las Palmas, Barcelona y Alicante las mayores provincias productoras. En cuanto a cultivo protegido, es Almería la provincia donde más se cultiva esta hortaliza, cerca del 63,5 % de la superficie total con 4.120 ha (media del quinquenio 2004/2008) (Reche, 2011).

La evolución de la superficie y de la producción por hectárea de pepino (Figura 3), ha presentado desde hace varios años una clara tendencia ascendente, especialmente significativa en el caso de los rendimientos, que pasaron de valores inferiores a los 7,1 kg m⁻² en 2005 a superar los 9,3 kg m⁻² en 2012 (García *et al.*, 2016).

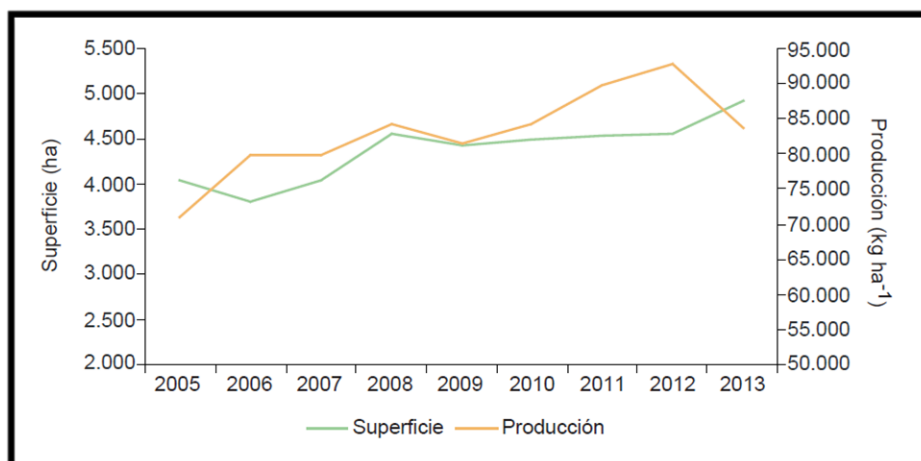


Figura 3. Evolución de la producción y superficie del cultivo de pepino (2005-2013). Fuente: Delegación Territorial de Almería, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural.

Entre 2005 y 2013 la superficie de pepino ha aumentado en un 21 %, mientras que la producción lo ha hecho en un 43 % y la evolución de los rendimientos ha crecido en un 18 % (García *et al.*, 2016).

El pepino es una fruta que se caracteriza por tener un precio percibido estable para los agricultores a través de los años y sostenible a lo largo de las campañas. Referente a las cotizaciones medias percibidas por los agricultores españoles durante los meses del año, y observando la Figura 4, se aprecia que las mayores cotizaciones se obtienen en los meses de invierno, principalmente por el fuerte tirón de las producciones hacia los mercados europeos, y las cotizaciones más bajas corresponden a los meses de final de primavera y verano (Reche, 2011).

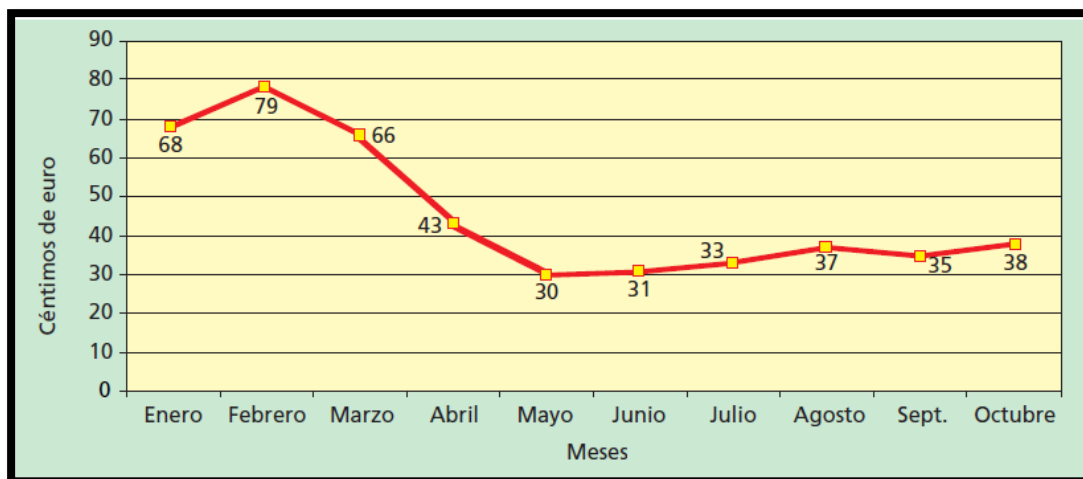


Figura 4. Precios medios mensuales del pepino percibidos por los agricultores. Media quinquenio 2006-2010 (céntimos de euro / Kg). Fuente: Anuarios de la Producción Agraria. MARM.

2.2. Importancia del N en la producción agraria.

2.2.1. Avances en agricultura en relación a la aplicación de nutrientes.

Camacho (2015), señala que desde mediados de los 60, la producción mundial de alimentos se ha incrementado en el 80%. El crecimiento agrícola, gracias a la ayuda de tecnologías modernas, ha favorecido el aumento de la seguridad alimentaria y ha contribuido a paliar la pobreza en el mundo (FAO, 1996).

En los últimos veinte años, los avances tecnológicos aplicados a la agricultura han generado un gran logro: aumentar la producción de los principales productos agrícolas a una tasa superior a las necesidades que conlleva el aumento de la población mundial durante este período (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

Las tecnologías agrarias desarrolladas gracias a la investigación científica son fundamentales para optimizar la productividad manteniendo e incluso mejorando la sostenibilidad de los recursos naturales y del medio ambiente. De hecho, estos rápidos progresos de la productividad han hecho descender los costos de los alimentos en general y han mejorado la seguridad alimentaria (Camacho, 2015).

La agricultura en el siglo XXI se enfrenta a múltiples retos: el incremento de la producción de alimentos y fibras para una población creciente con una mano de obra menor y por otro lado, la contribución al crecimiento global de los países en desarrollo dependientes de la agricultura, adoptando métodos de producción más eficaces y sostenibles adaptándose al cambio climático (FAO, 2009).

Camacho (2015) advierte que con una previsión de aumento de la población mundial en 88 millones anuales en los próximos diez años, el incremento de los alimentos necesarios tendrán que obtenerse mediante una mayor productividad de los recursos disponibles, promoviendo que la investigación agronómica deba

centrarse en tecnologías de producción que aprovechen al máximo los beneficios de estos recursos naturales disponibles, sin dejar de protegerlos.

El riego por goteo es una tecnología que se impuso de forma clara y rápida en la década de los 80. En la actualidad el 99,7% de la superficie bajo invernadero en la provincia Almería emplea este sistema (Pérez *et. al.*, 2002).

El riego por goteo consiste en la aplicación localizada del agua de riego al cultivo a través de unos emisores (goteros) desde unas tuberías de distribución por las que circula el agua a una cierta presión. Como ventaja permite aportar y localizar en las raíces de las plantas los fertilizantes que éstas necesitan para su desarrollo. Así, mediante un correcto manejo, es posible alcanzar un alto nivel de aprovechamiento de esos abonos y ahorrar en agua y fertilizantes y también en mano de obra. Del mismo modo permite fraccionar mejor el aporte de estos recursos, de acuerdo a las necesidades del cultivo en cada momento, minimizando las pérdidas que se producirían por lixiviación y evaporación, que se producirían si se manejaran sistemas no localizados. (Camacho, 2015).

En el cultivo enarenado en los últimos años también se han instalado sistemas informáticos de fertirrigación. La fertilización se realiza, casi en su totalidad, a través del sistema de riego, y consiste en la aplicación conjunta del agua de riego y fertilizantes (nutrición mineral y aportes de materia orgánica) junto con abonados de fondo. Los aportes necesarios se basan en los análisis previos del suelo y las recomendaciones efectuadas por laboratorios (Camacho, 2016).

Camacho (2015) sigue un criterio de aporte de fertilizantes en función de las necesidades del cultivo. Para ello estima en primer lugar la cosecha final que se espera obtener y, en función de ésta, calcula las necesidades totales de cada nutriente, que variarán en función de la especie de la que se trate. Posteriormente, se reparten las necesidades totales de cada nutriente entre los distintos periodos del ciclo del cultivo y finalmente adecuar esas necesidades a los fertilizantes comerciales a suministrar.

Las expectativas de rendimiento son difíciles de establecer porque cada tipo de suelo interactúa de modo diferente según el clima y sus distintas variables (Isik *et al.*, 2002) por lo que los rendimientos máximos son significativamente diferentes en distintos años. Esto limita la utilidad del método del objetivo de rendimiento para las recomendaciones de fertilizantes N (Varvel *et al.*, 2007).

El pepino en Almería es una especie muy exigente en nutrición tanto en calidad como en cantidad, de ahí la importancia de proporcionar un buen abonado al cultivo. Tras las primeras recolecciones, es un momento crucial para realizar un análisis de suelo y conocer su estado, qué es lo que la planta está necesitando y rectificar o no nuestro abonado. Se debe tener cuenta el estiércol aportado, que comenzará a liberar más nutrientes coincidiendo con un aumento de las necesidades de la planta, por lo que se debe comenzar también con los primeros aportes de microelementos, principalmente hierro y manganeso y más minoritariamente el magnesio (Camacho 2016).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Camacho (2016) establece unas soluciones nutritivas medias para el cultivo de pepino en Almería sobre suelo (Tablas 1 y 2), destacando el nitrógeno como el elemento más abundante.

Tabla 1. Aportes de microelementos a la solución nutritiva para cultivo de pepino propuestos por Camacho (2016).

Fe	Mn	Cu	Zn	B
2 ppm	1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm	0,5 ppm

Tabla 2. Aportes de macroelementos a la solución nutritiva para cultivo de pepino propuestos por Camacho (2016).

NO ₃ ⁻	H ₃ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
13 mmol/L	1,5 mmol/L	1,5 mmol/L	6 mmol/L	5 mmol/L	1,5 mmol/L

2.2.2. El nitrógeno en la agricultura.

En las últimas tres décadas, los fertilizantes nitrogenados han contribuido de manera significativa al aumento en la producción de alimentos (siendo este, en diversas ocasiones, superior al incremento de la población). El N aportado por estos fertilizantes es el principal elemento mineral absorbido por las plantas e interviene en procesos fisiológicos esenciales para su crecimiento y desarrollo (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

El N es el nutriente más limitante en la producción de cultivos. El uso actual de fertilizantes en el mundo es de alrededor de 83 millones de toneladas métricas de fertilizante nitrogenado (Samborski *et al.* 2009). Entre los diecisiete elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, el N es considerado el más importante por ser el que se encuentra en mayor proporción. Constituye más del 1 a 3 % de su materia seca, dependiendo de la especie, de la etapa fenológica, del órgano, etc. Las funciones del N son de tipo estructural y osmótico (Hopkins, 1995). El N forma parte de las proteínas y tiene un efecto fundamental en el crecimiento de la planta, aumentando el volumen de los órganos vegetativos. Es por esto, por lo que su exceso puede ocasionar un desarrollo demasiado exuberante del cultivo, haciendo a éste más sensible al ataque de enfermedades (Camacho, 2015).

El suministro óptimo de N es básico para asegurar una cosecha abundante de cultivos de campo y productos hortícolas de alta calidad. De hecho, hay cultivos más dependientes del N que otros, los cuales muestran un rendimiento reducido con insuficientes cantidades de N y rendimientos o calidad reducidos con N excesivo (Samborski *et al.* 2009).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Aunque el N₂ es el elemento más abundante entre los gases que constituyen la atmósfera, no puede ser utilizado de forma directa por todas las plantas, cuyas raíces lo absorben principalmente en forma de iones nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺) (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

Si bien algunas plantas pueden utilizar el N atmosférico, la gran mayoría de los cultivos dependen para su desarrollo del suministro externo de N que obtienen tanto de la mineralización de la materia orgánica como del aporte de fertilizantes. La aplicación de estos fertilizantes se ha venido ejecutando de forma masiva bajo la premisa de que un aumento en los aportes implicaba un aumento en la producción, con un alto coste ambiental y económico. Actualmente ha cambiado el enfoque centrándose en buscar nuevas estrategias que ajusten el aporte de N a las necesidades de cada cultivo con el fin de alcanzar su máximo potencial productivo y preservar el ambiente. (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

Los científicos agrícolas han considerado durante mucho tiempo como dogma central la “ley del mínimo”. Esta se fundamenta en que el rendimiento está limitado en un momento dado por un solo factor, y este factor puede ser superado mediante un insumo externo apropiado. Tras ser superada la barrera del primer factor limitante (deficiencia de nitrógeno, por ejemplo) los rendimientos pueden volver a elevarse hasta que otro factor se vuelve limitante. Este enfoque presenta muchos problemas (Rosset, 1998)

Sin embargo, Cadahía (2005) muestra un enfoque muy diferente, apuntando que a la hora de obtener elevadas producciones un buen balance es más importante que mantener cada nutriente individualmente en un nivel adecuado.

La tasa de fertilización nitrogenada económicamente óptima (EONR) para un momento determinado, Thompson *et al.* (2015), la define como la concentración mínima de fertilizante nitrogenado requerida para la producción máxima. Sin embargo, para una especie concreta en una región determinada, la concentración óptima de N varía según el lugar, las condiciones de crecimiento y el estado fenológico del cultivo.

Por otro lado, la relación C/N se utiliza tradicionalmente como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y de su estabilidad. Las plantas cultivadas en materiales orgánicos inmaduros muestran daños debido, por una parte, a una inmovilización del nitrógeno, ya que los microorganismos lo utilizan para la síntesis de sus proteínas celulares, y por otra parte, a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizosfera (Cadahía, 2005).

2.2.3. Problemática del nitrógeno en la agricultura y en los recursos hídricos.

Los sistemas de producción de hortalizas de invernadero requieren altas aportaciones de N y de riego. Debido a la lixiviación de nitratos estos sistemas están asociados con problemas ambientales y, en respuesta a la creciente presión social para reducir estos problemas, existe el requisito de utilizar de forma óptima las entradas de N y de agua (Thompson *et al.*, 2014). La protección del medio ambiente se ha convertido en un objetivo importante en la agricultura y la horticultura intensiva

(Padilla *et al.*, 2018). Es necesario realizar acciones para informar y concienciar de las repercusiones del problema de la contaminación por nitratos de origen agrario y de sus exigencias normativas (García *et al.*, 2007).

El incremento en el uso del N en la agricultura ha sido debido a la idea generalizada de relacionar el aumento de los aportes de este elemento con un mayor rendimiento. Esta suposición puede estar relacionada con los métodos utilizados para la determinación de las cantidades recomendadas de este elemento para un cultivo y una región determinadas (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004). De igual modo, la combinación de expectativas de alto rendimiento, variación de EONR (tasa de N económicamente óptima) entre temporadas y bajos costes de fertilizantes nitrogenados, ha llevado a los productores a aplicar demasiado N en vez de considerar las necesidades reales de N de los cultivos (Tremblay *et al.* 2011). Por lo que para ellos el desafío de utilizar un aporte mínimo para un rendimiento máximo en un contexto de condiciones climáticas estacionales en gran medida impredecibles es considerable (Tremblay *et al.*, 2007a).

Aparte del NO_3^- aportado en el agua de riego, hay otras fuentes de N que no se tienen en cuenta al formular las soluciones de los nutrientes (el N mineral existente en el suelo y el N mineralizado a partir de la materia orgánica), lo que contribuye a una excesiva aplicación de N (Thompson *et al.*, 2007a). Así mismo, Thompson *et al.*, (2014), recalca que el riego combinado por goteo y la fertirrigación se utilizan cada vez más, facilitando una administración precisa de N y de irrigación. Pese a esto, estos sistemas se asocian comúnmente con la aplicación excesiva de N y la consiguiente probabilidad de pérdida perjudicial de N en el medio ambiente (Thompson *et al.*, 2007a).

Como consecuencia de lo anterior, y según Schröder *et al.*, (2000), la sobrefertilización como práctica usual frente al desconocimiento del nivel de fertilidad del suelo es común, pero difícil de defender desde el punto de vista ambiental.

De este modo, cuando se usa la fertirrigación se debe optimizar por separado tanto el riego como el aporte de N. Aunque la concentración de N sea óptima, si el riego es muy abundante conlleva un aporte excesivo de N. Por el contrario, la aplicación de pequeños volúmenes de riego a una concentración de N fija puede dar como resultado un aporte insuficiente de N (Thompson *et al.*, 2015).

El nitrógeno contenido en el nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) utilizado en las actividades agrícolas se ha detectado como un contaminante de los ecosistemas acuáticos y las aguas subterráneas (Samborski *et al.*, 2009). También la contaminación por nitrógeno inorgánico podría inducir efectos perjudiciales sobre la salud humana (Camargo *et al.*, 2007). De hecho, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el agua potable no contenga más de 10 mg de $\text{NO}_3\text{-N L}^{-1}$ (50 mg $\text{NO}_3\text{-L}^{-1}$) (World Health Organization, 2004).

Los animales acuáticos están adaptados a niveles relativamente bajos de nitrógeno inorgánico. Por este motivo, concentraciones anormalmente elevadas de NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- pueden mermar la capacidad de esos animales para sobrevivir, crecer y reproducirse, debido a su toxicidad (Camargo & Alonso, 2007).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Los principales problemas medioambientales asociados a la contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos son: acidificación de ríos y lagos, eutrofización de las aguas dulces y marinas (con el problema adicional de las algas tóxicas) y toxicidad directa de los compuestos nitrogenados (Camargo *et al.*, 2007).

El óxido nitroso es un potente gas de efecto invernadero (GEI), que se libera después de la aplicación de fertilizante N. Según Cadahía (2005) éste procede principalmente de procesos microbianos en el suelo. El cómputo anual era de unos 10 millones de toneladas de N, que en este siglo ha aumentado en unos 5 millones de toneladas/año. Lo que produciría un aumento del calentamiento global del orden de un 5-10%. La mejora de la NUE ayudaría a paliar las emisiones de N₂O e indirectamente las de GEI.

La calidad del agua es una consideración importante ya que el aumento de la salinidad obliga a los productores a regar en exceso para eliminar las sales del suelo o sustrato (Thompson *et al.*, 2014). El porcentaje de drenaje debe ser mayor cuanto más salina resulte el agua de riego, con lo que el gasto de agua y de fertilizante es mayor, resultando contraproducente en zonas donde el agua es un bien escaso. Otro inconveniente importante es que, al ser eliminado el drenaje al medio, se puede producir una contaminación por nitratos de las aguas tanto superficiales como subterráneas. Como los drenajes suelen presentar altos niveles de este ion, muy fácilmente lixiviable, las aguas subterráneas pueden alcanzar concentraciones del mismo tales que no permitan el consumo humano (Camacho 2016).

Camacho (2015) remarca que el criterio de aporte de fertilizantes en función de las necesidades del cultivo tiene un problema y es que se disponen de pocos estudios de absorción de nutrientes en distintas zonas y además éstos se han hecho para unas condiciones ambientales, variedades y épocas del año determinadas, por lo que las necesidades nutricionales calculadas podrán variar en cada caso. Dada la falta de información acerca de la absorción de nutrientes por los cultivos, los técnicos han utilizado lo que se denominan equilibrios de absorción, que son las cantidades de nutrientes absorbidas referidas a la cantidad de nitrógeno requerida por el cultivo (Camacho, 2015).

En lugar de suministrar nutrientes durante periodos de tiempos largos, se deben realizar pruebas frecuentes para detectar con rapidez la necesidad de nutrientes y satisfacerlo en el momento (Thompson *et al.* 2014)

2.2.4. Contaminación por nitratos en España.

Actualmente, existe una gran preocupación por el contenido de nitrato en el agua potable, considerándose la ingesta de éste principal responsable de la metahemoglobinemia y algunos tipos de cáncer. La fuente principal de nitrato ingerido está en las verduras. Por término medio, en el mundo occidental, un adulto tiene una ingestión de nitrato de unos 70 mg de nitrato/día a través de verduras por término medio, además el cuerpo humano produce unos de 30-60 mg/día de nitrato como parte del metabolismo (Cadahía, 2005).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

En base a diferentes criterios de calidad del agua, se considera que niveles máximos de nitrógeno total dentro del rango 0,5-1,0 mg /L, pueden ser adecuados para prevenir los procesos de acidificación y eutrofización en los ecosistemas acuáticos. El incremento de las temperaturas ambientales y la disminución de las precipitaciones previsibles en ciertas regiones continentales como por ejemplo, el sur de España, pueden potenciar estos procesos de toxicidad en los animales acuáticos. Por un lado, debido a una mayor concentración de los compuestos nitrogenados en el medio acuático como resultado de una menor dilución por la disminución de los recursos hídricos y por otro lado, debido a una aceleración en el metabolismo de los animales ectotermos debido al aumento en la temperatura del medio en el que viven (Camargo et al., 2007).

En España, a pesar de que los niveles de contaminación de las aguas provocada por los nitratos de origen agrario son inferiores a los de países del norte europeo, el consumo medio de fertilizantes nitrogenados oculta disparidades regionales muy acusadas. Hay una clara correlación entre las regiones más afectadas por la nitrificación de las aguas y las zonas de agricultura intensiva (Izcara, 2000). Debido a sus efectos negativos, la contaminación por nitratos de origen agrario es un tema ampliamente legislado. García et al., (2007) señala que “la trasposición de la legislación comunitaria a nivel español, queda reflejada en el Real Decreto 261/1998, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos de origen agrícola”.

En España, hasta muy recientemente, el problema de los nitratos en el agua no era considerado de importancia. En 1982 se había aprobado la Reglamentación Técnico Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público. En esta normativa, los niveles especificados para los parámetros referidos a la contaminación de origen agrario eran idénticos a los de la Directiva europea 80/778/CEE, relativa a la calidad exigida al agua de consumo humano, que en 1990 sería traspuesta a la normativa nacional. Sin embargo, la directiva de la Unión Europea establecía una distinción precisa entre «aguas potables» y «aguas contaminadas», mientras que, en la normativa española de 1982 tal distinción quedaba indefinida estableciendo una figura intermedia «aguas sanitariamente permisibles» (Izcara, 2000).

Dicho esto, fue a partir de 1990, cuando la reglamentación de 1982 fue derogada en España tras ser sustituida por la Directiva europea 80/778/CEE, cuando el problema de la contaminación nítrica de las aguas de consumo humano salió a la luz. Aguas que según la legislación española de 1982 eran consideradas aptas para el consumo, ahora pasarían a ser consideradas como aguas contaminadas, quedando prohibida su distribución y consumo (Izcara, 2000).

Actualmente, a nivel internacional, destaca el Protocolo de Gotemburgo (1999), al que se adhirió la Unión Europea en 2004. Dicho Protocolo estableció un Código de Buenas Prácticas Agrarias para combatir las emisiones de amoníaco procedentes de la agricultura, con el fin de combatir la acidificación, la eutrofización y el ozono troposférico. A nivel europeo destacan la Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas frente a la contaminación por nitratos de origen agrícola, la Directiva 96/61/CE sobre prevención y control integrado de la contaminación para atmósfera, agua y suelo y la Directiva 2000/60/CE, conocida como Directiva Marco

de Aguas, cuyo objetivo final es conseguir el buen estado ecológico de las masas de agua para 2015 (García et al., 2007).

En la UE, se aprecia una mejora de la calidad del agua y una mayor eficacia de los programas de acción. La superficie del territorio europeo sujeto a la aplicación de programas de acción ha aumentado y, en particular, Bélgica, España, Italia y Portugal, han registrado un aumento del tamaño de sus zonas vulnerables desde 2004. No obstante, en varias regiones debe seguir ampliándose la superficie (CEE, 1991).

Debemos destacar igualmente las acciones llevadas a cabo en España que manifiestan la preocupación por el medio ambiente y que ha quedado reflejada en las políticas agrarias desde hace unos años. En definitiva, reconocen la estrecha relación entre la agricultura y el medio ambiente, y atribuyen al agricultor un papel fundamental en la conservación del entorno natural (Cadahía 2005).

2.2.5. Contaminación por nitratos en Almería.

Por regla general, los invernaderos se encuentran en regiones secas, como la cuenca mediterránea, con unos recursos de agua dulce muy limitados, donde el riego excesivo puede contribuir al agotamiento y la degradación de los mismos (Thompson *et al.* 2014).

A pesar del uso generalizado de sistemas combinados de irrigación y riego por goteo, en las principales regiones productoras en España de hortalizas, Almería y Murcia, las concentraciones de nitratos presentes en sus acuíferos se están incrementando paulatinamente (Thompson *et al.* 2015).

El Real Decreto 261/1998 designa las zonas vulnerables en la Comunidad de Andalucía, asumiendo como tales las que poseen aguas con un nivel de nitratos superior a 50 mg/L de agua o que pueden encontrarse en riesgo de alcanzarlo. Andalucía cuenta con 6 zonas designadas vulnerables: Valle del Guadalquivir (Sevilla), Valle del Guadalquivir (Córdoba y Jaén), Detrítico de Antequera, Vega de Granada, Litoral Atlántico y Litoral Mediterráneo (García *et al.* 2007).

La provincia de Almería se ubica en la zona Litoral Mediterráneo, contando con 12 Términos Municipales incluidos en zona vulnerable agrupando prácticamente el 75% de la superficie invernada provincial: Abla, Almería, Bernadux, Gádor, Huércal de Almería, Pechina, Rioja, Roquetas de Mar, Viator, Vícar, El Ejido y La Mojonera (García *et al.* 2007).

La comarca del Campo de Dalías, situada en la llanura costera que se extiende al oeste de la bahía de Almería, es una de las franjas agrarias más productivas e intensivas de la Unión Europea. Esta zona se caracteriza por unas condiciones edafoclimáticas pésimas, que no permitieron el enriquecimiento de esta comarca agraria hasta los años sesenta con la introducción de innovaciones tecnológicas vanguardistas dirigidas a paliar los factores limitantes, el suelo y el agua. Como consecuencia, ahora es una de las agriculturas más rentables y competitivas de España, no obstante, fundamentado en la explotación insostenible de sus recursos naturales.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

El uso intensivo de fertilizantes ha tenido un profundo impacto en la calidad del agua de los acuíferos de esta zona, además de su sobreexplotación, problema que fue detectado a comienzos de los años ochenta. Por otro lado, la característica de este sistema agrario, desarrollado en suelos semiestériles, hace necesario el uso intensivo de fertilizantes (Izcarra, 2000).

La Orden de 27 de junio de 2001, conjunta de las Consejerías de Medio Ambiente y de Agricultura y Pesca, de la Junta de Andalucía, aprobó para las seis zonas vulnerables existentes en Andalucía un Programa de Actuación que deberá ser revisado, al menos, cada cuatro años (García *et al.* 2007). En la zona vulnerable "Litoral Mediterráneo" el cumplimiento de dicho Programa afecta a: cultivos Hortícolas, Olivar, Cítricos y Frutales Subtropicales.

En las explotaciones agrícolas ubicadas en zonas vulnerables (Decreto 36/2008, de 5 de febrero) de acuerdo con el Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, deberán llevar obligatoriamente un registro de los fertilizantes utilizados. En Almería las zonas vulnerables coinciden con las zonas de cultivo protegido. Dichas zonas son el Campo de Dalías-Albufera de Adra, Bajo Andarax, Campo de Níjar, Cubeta de Ballabona y río Antas, Valle del Almanzora, Rambla de Mojácar (García *et al.*, 2016).

Las prácticas de manejo de N y riego para los invernaderos en Almería se basan principalmente en la experiencia de productores y asesores técnicos. Este colectivo de técnicos debería, además, de tener un mayor conocimiento e implicación en la problemática de la contaminación por NO₃⁻ de origen agrario (García *et al.* 2007). La gestión de N se basa en el uso de soluciones o programas de nutrientes estándar y el riego se realiza generalmente con programas fijos; ambos se ajustan en función de la apariencia del cultivo y las condiciones de crecimiento. Se supone que las prácticas de manejo son similares en toda la cuenca del Mediterráneo. (Thompson *et al.* 2014).

2.2.6. Soluciones a la problemática del N en la agricultura.

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados lleva asociados problemas cada vez más graves de incremento en los costes de producción y de contaminación ambiental, por lo que se hace necesario contar con tecnologías que permitan aportar las cantidades mínimas para alcanzar los máximos rendimientos (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

Existe una creciente presión social para reducir la contaminación por nitratos debida a las actividades agrícolas de las aguas, lo que requerirá la adopción de prácticas mejoradas de gestión del N y del riego (Thompson *et al.*, 2014).

Un modo de lograr un mejor ajuste entre la tasa de aplicación de N y las necesidades de fertilización con N de cultivo es fraccionar las aplicaciones. (Tremblay *et al.*, 2011) realizando pequeñas aportaciones de manera frecuente, lo que reduce sustancialmente el riesgo de pérdida de N que se produce con aplicaciones mayores de N y menos frecuentes (Figura 5). Para garantizar que el

suministro frecuente de N e irrigación coincide con los requisitos del cultivo se requieren herramientas de gestión (Thompson *et al.*, 2015).

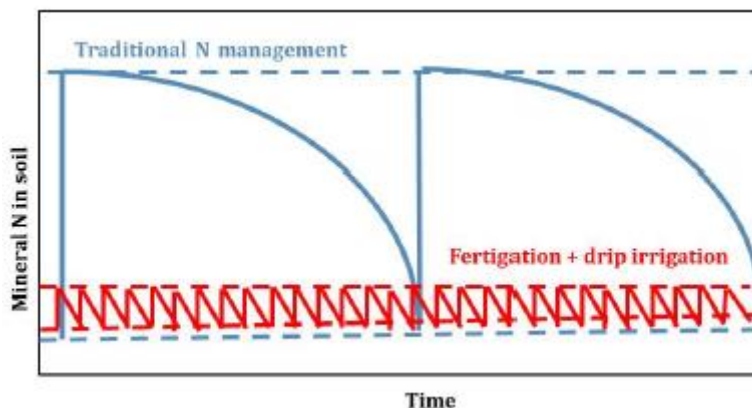


Figura 5. Representación esquemática de las fluctuaciones con el tiempo del N mineral del suelo en la zona de la raíz asociada con la gestión tradicional de N y con la aplicación frecuente de N a través de la fertirrigación combinada y el riego por goteo (Fuente: Thompson *et al.*, 2015).

La intensificación sostenible requiere un manejo óptimo de la fertilización e irrigación con N para asegurar cultivos hortícolas rentables y de alto rendimiento con pérdidas mínimas de N al medio ambiente y un uso claramente eficiente del agua de riego (Thompson *et al.*, 2015).

Para optimizar el riego de cultivos hortícolas se utilizan básicamente dos enfoques: estimación de los requerimientos de agua del cultivo en base a la evapotranspiración del cultivo (ETc), y el uso de sensores de humedad del suelo para ayudar a determinar el tiempo y los volúmenes de riego. (Thompson *et al.*, 2015). Los autores García *et al.*, (2007), hacen una reflexión sobre la optimización del riego en la que considera si se debe recompensar el uso de recirculación y reutilización de drenajes, en cultivos sin suelo.

En la agricultura moderna, además de corregir las deficiencias de nutrientes, es aconsejable restituir al suelo aquellos nutrientes perdidos en cada cosecha. Con estas medidas, se puede aumentar la producción inmediata y de largo plazo (Satorre, 2005). Sería de gran utilidad el desarrollo de una herramienta informática adaptable a las distintas posibilidades de cálculo y aplicación del abonado en fertirrigación (García *et al.*, 2007).

Es aconsejable llevar a cabo campañas de concienciación de las implicaciones medioambientales de la horticultura protegida ya que los productos procedentes de la horticultura intensiva necesitan ganar credibilidad en cuanto a sostenibilidad (García *et al.*, 2007).

A largo plazo, el problema de tierras explotadas mediante métodos convencionales es a un suelo estéril contaminado por productos químicos y con poca materia orgánica. Un suelo así conduce a la rápida pérdida de fuentes de nitrógeno de origen químico provenientes del exterior. En contraste con esto, un suelo saludable, biológicamente rico, con abundante materia orgánica y una

diversidad de microorganismos, incluye en su biota bacterias que proporcionan y fijan nitrógeno, al tiempo que viven libremente y mineralizan este elemento a partir de la misma materia orgánica. Así pues, el agricultor debería iniciar un programa diseñado para reconstruir la estructura del suelo y la materia orgánica (Rosset, 1998).

El objetivo es desarrollar estrategias de gestión que permitan a los cultivos recuperar el N de abonados orgánicos anteriores y evitar estrategias que aplican exceso de N, producen bajas recuperaciones, aumentan las posibilidades de degradación de N. Lograr altas recuperaciones de N requiere un conocimiento práctico de las principales entradas de N y de los principales procesos de ciclo del N del suelo. Por lo tanto, el balance de masa de N es un principio fundamental para todos los sistemas de recomendación de fertilizantes N (Meisinger *et al.*, 2008). La gestión óptima de N requiere suplir la carencia de esta falta de conocimiento, que se puede lograr mediante el acceso a la información disponible (Thompson *et al.*, 2015).

Los programas de actuación incluyen una serie de medidas establecidas en la Directiva de Nitratos y el Real Decreto 261/1996. Especifican los periodos en los que está prohibida la aplicación de fertilizantes y estiércoles a cultivos reseñados en los planes, el establecimiento de dosis máximas a aplicar de N, en función de los rendimientos medios, las extracciones de los cultivos y el resto de componentes de balance de nitrógeno. Estas dosis máximas no se podrán sobrepasar en las zonas vulnerables. La dosis de N a aplicar a cada cultivo dependerá de la dosis máxima establecida y los aportes de N de distintas fuentes: N mineral del suelo antes de la siembra, N mineralizado de la materia orgánica del suelo, N mineralizado de las enmiendas orgánicas y N aportado por el agua de riego. Esta dosis deberá fraccionarse y distribuirse a lo largo del ciclo de cultivo (Cadahía, 2005).

Cada vez hay más estudios prácticos y publicaciones sobre el uso y la aplicabilidad de diferentes sensores ópticos proximales para la gestión de N de cultivos hortícolas (Padilla *et al.*, 2018). Este enfoque se aborda en el apartado 2.3.

2.3. Estimación del contenido de N en planta a partir de sensores ópticos proximales.

Un objetivo muy perseguido por los científicos ha sido lograr medir de forma indirecta el contenido de N de la planta. El verdor de la hoja se reconoce intuitivamente como un signo del estado de N, es decir, la apariencia verde pálida de las hojas se asocia con bajo contenido de clorofila y N (Meisinger *et al.*, 2008).

El uso de sensores ópticos para evaluar el estado de N del cultivo ha sido objeto de una investigación importante en los últimos años (Padilla *et al.*, 2014). A pesar de que el análisis del N total a partir del tejido foliar es un método ya establecido, no es una rutina habitual en el manejo del N de los cultivos de hortalizas (Thompson *et al.*, 2014). La investigación en las últimas décadas ha demostrado la relación entre las mediciones de los sensores ópticos y la cantidad real de N del cultivo. No obstante, la disponibilidad de valores de suficiencia de estos sensores ópticos para evaluar el estado N del cultivo y de algoritmos para traducir las

mediciones del sensor en recomendaciones de fertilizantes N, son limitados para los cultivos en general y para cultivos hortícolas en particular. En general, se piensa que los sensores ópticos tienen potencial para la gestión de la fertilización de N de cultivos hortícolas (Padilla *et al.*, 2018). Pese a esto, Thompson *et al.*, (2015), señalan que tras más de 20 años de investigación, parece haber poca evidencia de su uso para la gestión de N con cultivos comerciales.

Las ventajas de estos sensores ópticos para el manejo de cultivos son, principalmente, que los resultados están rápidamente disponibles y las mediciones se pueden realizar de manera fácil, rápida y periódicamente a lo largo de un cultivo. Para evaluar cuales son los sensores idóneos para la aplicación práctica, es esencial establecer cómo interactúan los valores ópticos, los índices medidos y el estado N del cultivo (Padilla *et al.*, 2014).

Por otro lado, a la hora de seleccionar un sensor óptico proximal para uso de los agricultores, es importante tener en cuenta el coste y la facilidad de uso (Padilla *et al.*, 2018).

Los medidores de clorofila y sensores de reflectancia sirven para monitorear el estado del N en cultivos de hortícolas (Padilla *et al.*, 2018). Dada su facilidad de uso, su coste relativamente bajo, su idoneidad para mediciones frecuentes, y su sensibilidad general al estado de N de los cultivos de hortalizas (Padilla *et al.*, 2014), estos sensores parecen tener un gran potencial para su uso práctico (Thompson *et al.*, 2015).

2.3.1. Contenido de clorofila en hoja y medidores de clorofila.

Los medidores de clorofila (CM) son sensores ópticos pequeños, de mano, que miden de forma indirecta la clorofila de la hoja (Thompson *et al.*, 2015). Estos sensores se utilizan en mediciones puntuales individuales (Padilla *et al.*, 2018). El contenido de clorofila de la hoja se correlaciona con el contenido de N de la hoja (Thompson *et al.*, 2015). Estos sensores han sido ampliamente utilizados en investigación en diversos lugares desde su comercialización en 1990, pero las aplicaciones de campo han sido limitadas debido a que las mediciones son manuales (Meisinger *et al.*, 2008).

La clorofila es un compuesto que está íntimamente relacionado con el contenido de N en la hoja (Samborski *et al.*, 2009) ya que la mayor parte del N de la hoja está contenida en el aparato fotosintético y las enzimas involucradas en la fotosíntesis (Padilla *et al.*, 2018).

La mayoría de los medidores de clorofila estiman de forma indirecta el contenido relativo de clorofila por unidad de superficie de la hoja midiendo la absorbancia y la transmitancia de la radiación a través de la hoja. Esta medición comprende la radiación roja, que absorbe la clorofila y la radiación infrarroja cercana (NIR), que transmite la clorofila (Figura 6) (Padilla *et al.*, 2018).

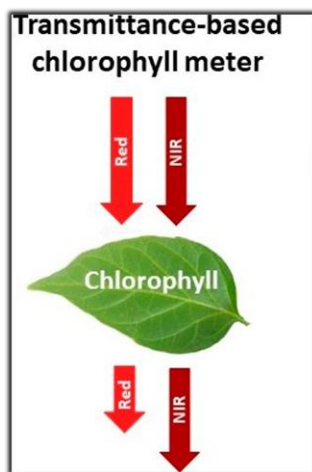


Figura 6. Funcionamiento de medidores de clorofila utilizados para estimar el contenido de clorofila foliar (Padilla *et al.*, 2018).

La absorbancia de la radiación roja aumenta con el contenido de clorofila, lo que resulta en valores más altos de medidor de clorofila (Schepers *et al.*, 1996). Estos sensores se conocen como medidores de clorofila basados en la transmitancia.

Actualmente hay varios medidores de clorofila basados en la transmitancia disponibles comercialmente, como el SPAD-502 (Konica-Minolta, Tokio, Japón) (Figura 7), el CCM-200 (Opti-Sciences, EE.UU.) y el MC-100 (Apogee Instruments, Utah, EE.UU.) (Figura 8). Ambos están actualmente disponibles en el mercado y difieren en ciertos aspectos, como muestra Padilla *et al.*, (2018) (Tabla 3). El sensor CCM-200 (Figura 9) es un sensor análogo al Apogee MC-100 y, debido a que apenas hay estudios de este último, las referencias al medidor CCM-200 son similares a las del Apogee MC-100 aunque no se utilice en este caso concreto.

Tabla 3. Características de los sensores ópticos proximales con potencial de uso para el manejo de nitrógeno (N) de cultivos de hortalizas. Fuente: Padilla *et al.*, (2018).

Tipo de dispositivo	Fabricante	Longitudes de onda utilizadas (nm)
SPAD-502	Konica Minolta (Tokio, Japón)	650, 940
CCM-200 Medidor de contenido de clorofila Plus	Opti-Sciences Inc. (Hudson, NH, EE. UU.)	653, 931

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos



Figura 7. Medidor de clorofila SPAD-502.



Figura 8. Medidor de clorofila Apogee MC-100.



Figura 9. Medidor de clorofila CCM-200 Plus. Fuente: Opti-Sciences.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

En los tres sensores, las mediciones se toman presionando el dispositivo contra la hoja, lo que cuantifica la transmitancia de la hoja a la luz roja y cercana al infrarrojo, tomando así una medida de "verdor" de la hoja. El medidor básicamente cuantifica el potencial de la fotosíntesis de una pequeña porción de la hoja con los nutrientes de que dispone porque se le aporta un exceso de luz para estimular la fotosíntesis (Meisinger *et al.*, 2008).

Las medidas de estos sensores son adimensionales. El sensor SPAD-502, mide en unidades SPAD y el sensor Apogee MC-100 mide CCI (índice de Contenido de Clorofila). Padilla *et al.*, (2018) recoge información de cómo se recomienda realizar mediciones en la hoja más reciente, completamente expandida y bien iluminada, entre el peciolo y el ápice de la hoja, a medio camino entre el margen y el nervio principal, en el haz de la hoja y en plantas seleccionadas al azar del centro de campos o parcelas.

Puesto que el área de muestreo es relativamente pequeña (SPAD $\approx 6 \text{ mm}^2$) es necesario realizar reiteradamente la toma de muestras y llevar a cabo protocolos de muestreo estrictos para que la medición sea representativa. Los valores medidos deben ser el promedio de varias lecturas individuales por parcela. Para poder comparar las secuencias de mediciones se debe estandarizar la hora del día y las condiciones de irradiación (Padilla *et al.*, 2018). Este protocolo de medición es aplicado de igual modo para el sensor Apogee MC-100.

Varios estudios han reportado relaciones lineales entre los valores del medidor de clorofila versus el contenido de N de la planta/hoja para las mediciones hechas en un momento particular o en diversas etapas de crecimiento en tomate (Padilla *et al.*, 2015) (Padilla *et al.*, 2018). Padilla *et al.*, (2018) concluye que las relaciones del medidor de clorofila y el contenido de N del cultivo para varias especies diferentes suelen ser bastante fuertes, por lo que pueden ser empelados como indicadores del N del cultivo (Figura 10).

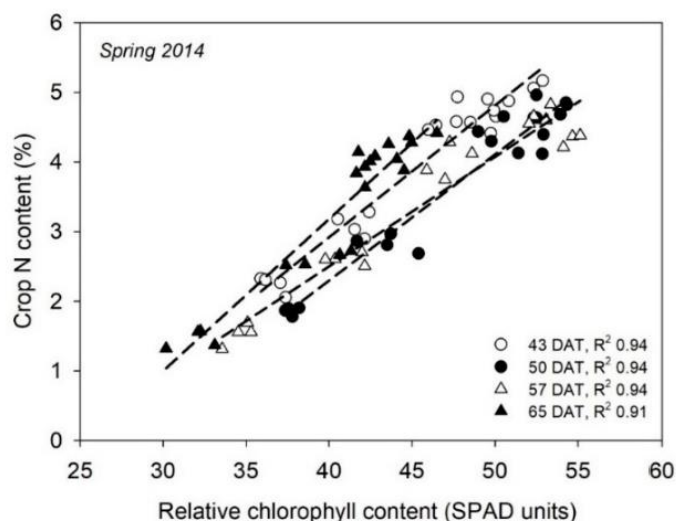


Figura 10. Relaciones entre las unidades SPAD y el contenido de N de un cultivo de pepino cultivado en invernadero llevado a cabo en el sureste de España. DAT es días después del trasplante y R^2 es el coeficiente de determinación (Padilla *et al.*, 2018).

2.3.2. Reflectancia de la cubierta vegetal.

Las medidas de reflectancia de la cubierta vegetal se basan en la interacción de diferentes longitudes de onda visible e infrarrojo cercano (NIR) con la cubierta del cultivo (Samborski *et al.*, 2009). El grado de absorción y reflectancia en las bandas visible y NIR del espectro varía según el contenido de N del cultivo, proporcionando así información sobre el estado de N del cultivo (Figura 11). Los cultivos con deficiencia de N, suelen reflejar más visible y menos NIR que los cultivos con N óptimo (Padilla *et al.*, 2018).

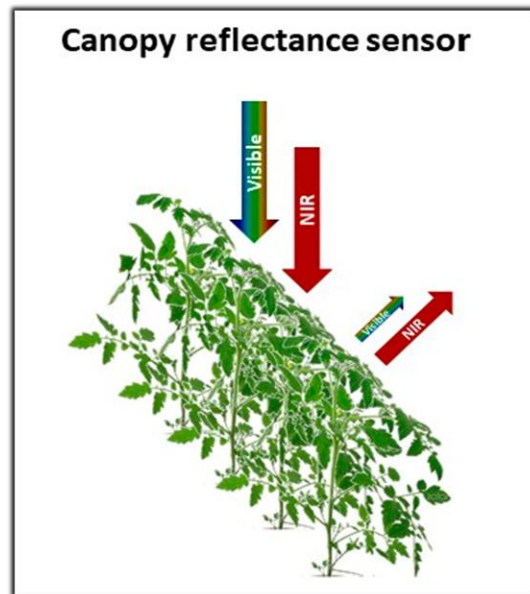


Figura 11. Representación esquemática del funcionamiento de los sensores de reflectancia de la cubierta vegetal (Padilla *et al.*, 2018).

En la reflectancia de la cubierta vegetal, los sensores se colocan cerca del cultivo (Padilla *et al.*, 2018), en posición vertical y paralelo a las hileras de cultivos. En cuanto a la altura, la parte superior del campo de visión está nivelada con la última hoja completamente expandida, de manera que el sensor tiene una vista lateral de la parte superior de la cubierta vegetal desde la última hoja totalmente expandida hacia abajo (Padilla *et al.*, 2017). El tejido vegetal generalmente absorbe el 90% de la radiación visible (390 a 750 nm) y refleja aproximadamente el 50% del NIR (750 a 1300 nm) (Knipling, 1970). Las longitudes de onda seleccionadas para la evaluación de N se eligen según su sensibilidad a los cambios en el estado de la clorofila, la densidad del follaje y la biomasa que acompaña a la deficiencia de N (Padilla *et al.*, 2018).

A partir de los datos de reflectancia de la radiación visible e infrarroja cercana (NIR) (Padilla *et al.*, 2017) se pueden calcular varios índices matemáticos de vegetación (Thompson *et al.*, 2015). De entre todos los índices de vegetación existentes, destacan el NDVI, GNDVI, RVI y GVI (Tabla 4), por estar fuertemente relacionados con el N del cultivo y el rendimiento (Padilla *et al.*, 2018). No obstante, el índice NDVI, medido con el sensor Crop Circle ACS 470 u otro tipo de sensor, es el más utilizado (Thompson *et al.*, 2015; Padilla *et al.*, 2018).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

En pepinos cultivados en suelo bajo invernadero y con el mismo sensor, Padilla *et al.*, (2017) corroboró que de los nueve índices de vegetación, NDVI, GNDVI, RVI y GVI, eran los más relacionados con el estado nutricional en N del cultivo y el rendimiento. Estas relaciones se observaron tanto en un ciclo de otoño como en un ciclo de primavera, y cuando se usan conjuntos de datos combinados de los dos cultivos. La mayoría de los nueve índices de vegetación examinados fueron buenos estimadores del estado N del cultivo y del rendimiento en pepino.

Tabla 4. Índices de vegetación de reflectancia de la cubierta vegetal más utilizados para monitorizar el estado de N de los cultivos. NIR: infrarrojo cercano; (Padilla *et al.*, 2018).

Índice	Acrónimo	Ecuación	Autor
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	NDVI	$\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$	(Sellers, 1985)
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde	GNDVI	$\frac{NIR - Verde}{NIR + Verde}$	(Ma <i>et al.</i> , 1996)
Índice de Relación Roja de Vegetación	RVI	$\frac{NIR}{Rojo}$	(Birth & McVey, 1968)
Índice de Relación Verde de la Vegetación	GVI	$\frac{NIR}{Verde}$	(Birth & McVey, 1968)

En pepino cultivados bajo invernadero en suelo, Padilla *et al.* (sin publicar) informaron que el NDVI, medido con el sensor Crop Circle ACS 470, estaba más fuertemente relacionado con el contenido de N del cultivo (Figura 12).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

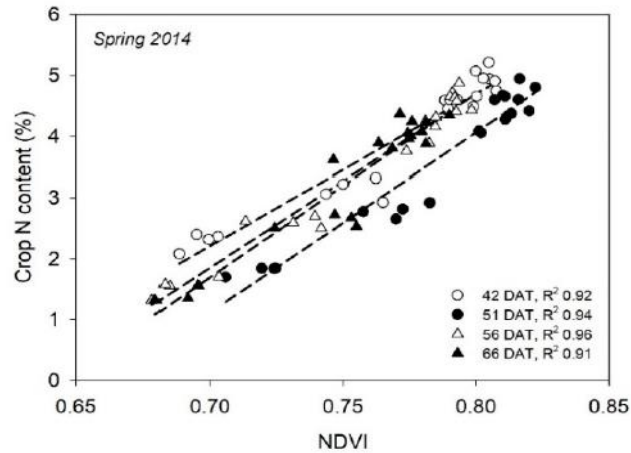


Figura 12. Relaciones lineales del NDVI, medido en la parte superior de la cubierta vegetal del cultivo con un sensor Crop Circle ACS 470, y el contenido de N en un cultivo de pepino cultivado en invernadero en primavera de 2014 llevado a cabo en sureste de España. DAT es días después del trasplante y R² es el coeficiente de la determinación de regresión lineal (Padilla *et al.*, 2017).

La gran ventaja de los sensores de reflectancia proximales es que miden grandes áreas representativas del cultivo, debido a la gran ventana de medición y su capacidad de medición continua (Thompson *et al.*, 2015). Así permiten medir grandes superficies representativas del follaje (Padilla *et al.*, 2018).

Uno de los sensores que se utilizan actualmente es Crop Circle ACS 470 (Thompson *et al.*, 2015) (Figura 13; Tabla 4). Este es un sensor de reflectancia de la cubierta vegetal activo equipado con su propia fuente de luz, que emite simultáneamente radiación visible y NIR desde una única matriz LED policromática modulada (Padilla *et al.*, 2017). Esto quiere decir que estos sensores son capaces de distinguir la radiación reflejada de su propia fuente de luz de la derivada de la radiación ambiental (Padilla *et al.*, 2018).



Figura 13. Monitorización de un cultivo de pepino con el sensor de reflectancia Crop Circle ACS-470.

Tabla 5. Característica del sensor de reflectancia Crop Circle ACS-470. Fuente: Padilla *et al.*, (2018).

Tipo de dispositivo	Fabricante	Principio de medición	Longitudes de onda utilizadas (nm)	Escala
Crop Circle ACS 470	Holland Scientific (Lincoln, NE, USA)	Reflectancia (activa)	450, 550, 650, 670, 730, 760	Cubierta vegetal

Trabajando con tomate cultivados en invernadero y el sensor Crop Circle ACS 470, Padilla *et al.*, (2015) encontraron que los índices NDVI y RVI fueron los índices de vegetación más efectivos para evaluar el estado N del cultivo, y que estos dos índices fueron ligeramente más sensibles que el GNDVI y el GVI. Sin embargo, datos tomados de otros estudios, en conjunto sugieren que NDVI, RVI, GNDVI y GVI son índices sensibles del estado N del tomate en los cultivos (Padilla *et al.*, 2018).

Los sensores de reflectancia se clasifican como sensores pasivos o activos dependiendo de si tienen su propia fuente de luz. Los sensores activos son insensibles a las condiciones de irradiación, lo que es una ventaja práctica apreciable. Los sensores pasivos normalmente tienen dos conjuntos de fotodetectores, un conjunto mide la radiación incidente sobre la cubierta vegetal del cultivo y el otro mide la radiación reflejada desde la cubierta vegetal; la medición de la radiación incidente es utilizada por el sensor para considerar diferentes condiciones de irradiación durante el funcionamiento (Padilla *et al.*, 2018).

Una característica única incorporada en el Crop Circle modelo ACS-470 es que permite al usuario cambiar los filtros que determinan qué longitudes de onda se miden y de esta manera el instrumento se personaliza para aplicaciones concretas de detección espectral.

Así pues, existen varios modelos de los sensores Crop Circle más simples, más baratos y manuales adecuados para uso manual con cultivos de hortalizas (Thompson *et al.*, 2017). Los modelos más caros se usan para el registro continuo de datos, para lo cual, generalmente, se montan en tractores y se conectan a los sistemas de GPS para el mapeo de campo. Principalmente se usan en esta configuración para la aplicación de tasa variable y automática de fertilizante mineral (Padilla *et al.*, 2018).

3. Materiales y métodos.

3.1. Localización del ensayo.

Se realizó un ensayo experimental de cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) con un ciclo de primavera corta en la Estación Experimental Fundación UAL-ANECOOP, localizada en el paraje Los Goterones de Retamar, Almería, en el sudeste de España, con coordenadas geográficas 36° 51'N, 2° 16'O, y altitud de 92 m.

El trabajo experimental se desarrolló en un invernadero multitúnel tipo multicapilla (Figura 14) con una estructura de acero galvanizado con paredes de policarbonato y el techo de polietileno de baja densidad (PEBD) de capa trilaminada (200 μ m de espesor) con una transmisividad de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) del 60% aproximadamente. Está formado por cuatro capillas de 8 m de ancho con una altura al canalón de 4,5 m y al centro de cada capilla de 5,7 m.

Aunque carecía de sistema de calefacción, contaba con ventilación natural pasiva que se realizaba mediante el control automático de apertura y cierre de dos paneles laterales y ventanas cenitales a barlovento y sotavento, sustituyendo el aire más caliente que se encontraba en el interior por otra masa de aire más frío procedente del exterior. De esta manera se evacuaba gran parte de la sobrecarga de calor, disminuyendo la temperatura y, a su vez, modificando la concentración de gases y la humedad.

El invernadero de 1327 m² de superficie cultivada presentaba orientación este-oeste, con un cultivo de pepino en suelo enarenado en líneas pareadas.



Figura 14. Invernadero multitúnel tipo multicapilla. Estación Experimental Fundación UAL-ANECOOP, Retamar, Almería.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

El material de cerramiento de un invernadero condiciona el microclima que se genera en su interior y por consiguiente, la respuesta de los cultivos, modificando la cantidad y calidad de la radiación que influye directamente sobre el balance de energía de un invernadero (Camacho, 2015).

El invernadero estaba dividido en un total de 12 parcelas, midiendo cada una 6x12 m. Se aplicaron 3 tratamientos con dosis crecientes de N, con cuatro parcelas para cada tratamiento (hubo 4 repeticiones por tratamiento). Cada parcela disponía de entre 6 y 8 líneas pareadas orientadas norte-sur, con 12 plantas por línea. En dos líneas pareadas por parcela se plantaron cada una de las tres variedades de pepino evaluadas en este ensayo: 'Strategos' (Syngenta), 'Pradera' (Rijk Zwaan) y 'Mitre' (Semillas Fitó). La distribución de las variedades dentro de cada parcela se realizó al azar. La distancia entre las líneas más juntas fue de 0,8 m, mientras que la separación entre las líneas más separadas fue de 1,2 m. Las plantas se encuentran separadas 0,5 m entre sí y 0,6 m del ramal portagoteros con un gotero por planta de 3 L h^{-1} a la presión nominal de trabajo. Así obtenemos una densidad de plantación de 2 plantas por metro cuadrado. Se descartaron las primeras y las últimas líneas por efecto borde. Un pasillo de longitud 2 m y orientación este-oeste, divide el invernadero en cara norte y cara sur. La Figura 15 muestra la planificación del trabajo a realizar en el invernadero.

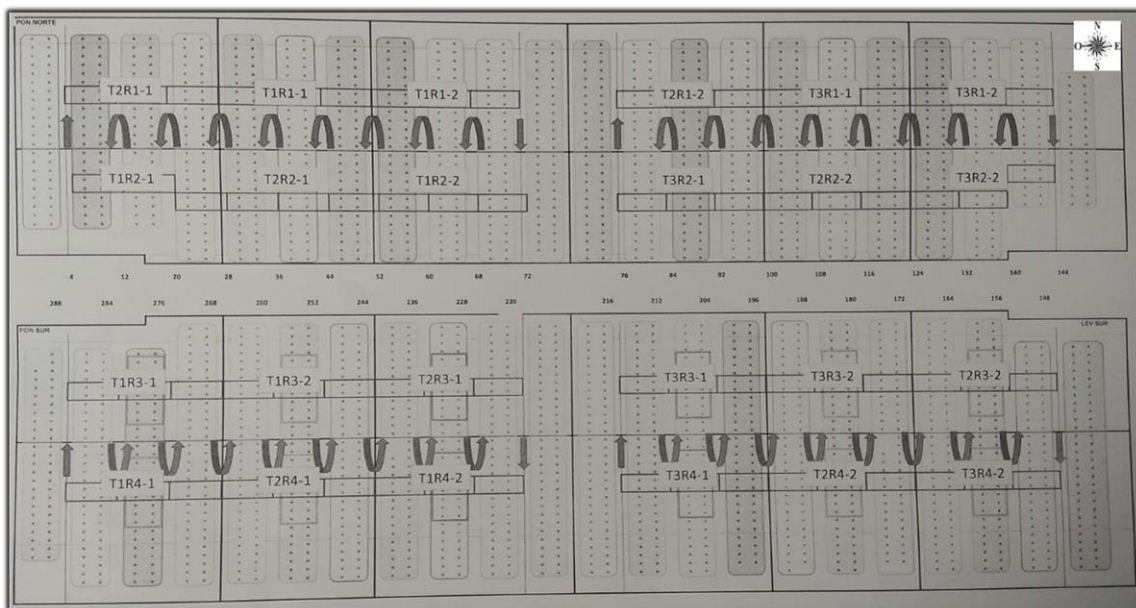


Figura 15. Zonificación del invernadero y el orden de seguimiento de monitoreo de las plantas.

El suelo estaba estratificado artificialmente en el denominado "enarenado" típico de la zona, que consistió en 20 cm de una capa aportada de textura franco-limosa situada sobre el suelo original y una capa de 10 cm de grava fina (mayoritariamente de 2 a 5 mm de diámetro) situada sobre la capa de suelo aportado. En la construcción del invernadero, se colocaron 5 cm de arena sobre la superficie del suelo original para mejorar la infiltración y posteriormente, se aportaron $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de estiércol de oveja (63% materia seca, 1,7% de contenido total de N y $0,7 \text{ t m}^{-3}$ de densidad) que se mezclaron en la parte superior de la capa de suelo

aportado; Se realizaron un laboreo de 15 cm del suelo, una labor cruzada con ripper a 15 cm y finalmente pase de rotovator en junio de 2016. Queda finalmente la labor más delicada en la preparación del arenado: la del aporte de la capa de arena sobre el suelo ya preparado (Camacho, 2015). Se hizo un reparto homogéneo de la arena con una capa de 8 cm de espesor.

Previo a la formación del suelo enarenado, se realizó un muestreo de suelo en varios puntos del invernadero y a tres profundidades distintas (veinte, cuarenta y sesenta centímetros). Como instrumentos de ayuda para mejorar el control de nuestro cultivo instalamos tensiómetros, para medir las tensiones superficiales y sondas de succión de cápsula cerámica, para extraer el agua con la solución de la tierra de las plantas.

La explotación cuenta con un equipo de programación automática de fertirriego compuesto por ocho tanques desde los que se inyecta al agua de riego un porcentaje dado del fertilizante que contienen (fertirriego). La aplicación de los riegos se realiza mediante sistema localizado de polietileno con goteros autocompensantes con 3 L h^{-1} de caudal. Se realizaron riegos independientes de duración variable según las lecturas de los tensiómetros.

3.2. Cultivo de pepino y tratamientos experimentales de N.

En el experimento se evaluaron tres variedades diferentes de pepino: Strategos (Syngenta International AG, Basilea, Suiza), Pradera, (Rijk Zwaan Zaadteelt en Zaadhandel B.V., De Lier, Países Bajos) y Mitre (Semillas Fitó, Barcelona, España). Los cultivos de pepino se cultivaron con una temporada de crecimiento de primavera. Los cultivos se trasplantaron como plántulas de 3 semanas de edad el 24 de abril de 2018 y se cultivaron hasta el 3 de julio de 2018 (71 días después del trasplante). Antes del trasplante, se aplicaron una serie de grandes riegos para lixiviar el NO_3 residual del suelo y homogeneizar el perfil del suelo entre sectores. Durante los primeros 4 días después del trasplante (DDT), todas las plántulas fueron irrigadas con agua ($0.1 \text{ mmol N L}^{-1}$).

Los tres tratamientos experimentales consistieron en tres concentraciones diferentes de N en la solución nutritiva aplicada por fertirrigación desde 5 DDT hasta el final del cultivo. Los tratamientos con N variaron de deficientes a excesivos. Las concentraciones promedio de N aplicado ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) durante el período de tratamiento (24-71 DDT) fueron de 2, 8 y 14 mmol de N para, un aporte claramente deficitario de N (T1), aporte ligeramente deficitario de N (T2) y tratamiento óptimo (T3), respectivamente (Figura 16). Las tres variedades diferentes de pepino fueron sometidas de manera aleatoria a estos tres tratamientos experimentales de N. La mayor parte del N aplicado fue como NO_3^- (91%), el resto como amonio (NH_4^+). Además de N, se aplicaron soluciones completas de nutrientes para garantizar que ninguno de los demás nutrientes fueran limitantes. El contenido de N mineral en el suelo a 40 cm de profundidad en el trasplante fue, en promedio, 15 kgNha^{-1} en parcelas con T1 y T2, y 66 kgNha^{-1} en parcelas T3.



Figura 16. Imagen que muestra las diferencias visuales entre los distintos tratamientos. De izquierda a derecha, T2, T1 y T3. Fecha 6 de junio, 43 DDT.

Se llevaron a cabo prácticas locales de manejo de cultivos; el cultivo fue periódicamente podado y sostenido verticalmente por guías de nylon para mantener una estructura abierta. En el 100 % de los casos las plantas de pepino se entutoran (García *et al.*, 2016). El riego fue programado para mantener el potencial matricial del suelo (SMP) en la zona de la raíz, a 15 cm de profundidad, dentro de -10 a -30 kPa; Se colocaron cuatro tensiómetros por tratamiento, uno en cada replicación, como ayuda para medir y controlar el SMP. Los tensiómetros se rellenaron con alguicida para evitar su obturación por algas y se fijaron al suelo con arcilla (Figura 17). El riego se aplicó cada 1-2 días, ajustando el tamaño del cultivo y el clima.



Figura 17. Preparación de tensiómetros.

El despunte, es decir, la eliminación del tallo apical con el objetivo de detener el alargamiento del tallo, se realizó por planta a 45 DDT. Para suavizar las elevadas temperaturas en el interior del invernadero, además de la ventilación pasiva, se aplicó blanqueo (CaCO_3 sobre el techo de plástico del invernadero) antes de iniciar el cultivo y no se retiró hasta el final del mismo, permitiendo un 40% de transmisividad de la cubierta hasta finales de mayo y un 45 % en el mes de junio. El invernadero también contaba con un sensor de temperatura que mide temperatura seca y temperatura húmeda, y un aspirómetro, que mide también temperatura y humedad relativa. Por otro lado, se colocaron placas amarillas con pegamento en varias zonas del invernadero, a una altura media baja al comienzo de algunas

hileras de plantas, para controlar la población de dípteros, aunque principalmente capturó trips, los principales insectos plaga que aparecieron en este cultivo.

3.3. Medidas del contenido de clorofila con SPAD y Apogee.

Las mediciones ópticas del contenido relativo de clorofila foliar se realizaron con los sensores manuales de clips en hojas SPAD-502 (Minolta Camera Co. Ltd., Tokio, Japón) y Apogee MC-100 (Apogee Instruments, Utah, EE.UU.). Para mediciones individuales, el SPAD y Apogee miden un área de superficie foliar muy pequeña de aproximadamente 6 mm².

La primera toma de datos con estos dispositivos comenzó después de unos días de tratamientos experimentales (19 DDT) y luego se repitieron las mediciones semanalmente hasta el final del cultivo. Las mediciones se realizaron siempre a la misma hora todos los días alrededor del mediodía (10: 00-12: 00 hora solar), antes del riego en todas las fechas de medición. Se realizaron 288 medidas con cada uno de los aparatos. Con el sensor SPAD, que mide en unidades SPAD y se repitió el mismo número de mediciones con el sensor Apogee que mide en unidades CCI (índice de Contenido de Clorofila).

Estas tomas de datos fueron tomadas en ocho plantas marcadas en cada parcela replicada, de cuatro plantas ubicadas centralmente en cada una de las líneas pareadas en cada parcela, descartándose las líneas externas (Figura 18). El valor para cada parcela fue el promedio de las ocho mediciones.



Figura 18. Fotografía que muestra 4 plantas marcadas en cada línea pareada. Están marcadas por un cuadrado casi a la mitad de cada línea de cada tratamiento y repetición.

Para cada planta, la medición se realizó en la hoja más reciente, completamente expandida y bien iluminada, entre el peciolo y el ápice de la hoja, entre el margen y el nervio principal, en el haz de la hoja (Padilla *et al.*, 2018), como muestra la Figura 19. Una vez realizado el despunte, las mediciones se tomaron en hojas escogidas al azar, a la misma altura.



Figura 19. Medición realizada con el sensor SPAD-502, a la izquierda, y con el sensor Apogee MC-100, a la derecha.

En el lado levante del invernadero se observó que las plantas habían crecido más, a pesar de que pertenecieran al mismo tratamiento. Esto pudo ser debido a factores abióticos tales como el ángulo de incidencia de la radiación en esa cara, puesto que el sol sale por el este, o una menor temperatura.

Las hojas con daño físico o con agua condensada no se midieron. De hecho, esta condición fue determinante para dejar de realizar las medidas un par de semanas antes de lo previsto debido a un fuerte ataque de hongos que se reactivó por segunda vez a pesar de haber sido tratado (Figura 20). Mildiu veloso es una enfermedad causada por el patógeno *Pseudoperonospora cubensis*.



Figura 20. Síntomas foliares avanzados de Mildiu en cultivo de pepino.

Se observó que esta enfermedad afectó con mayor intensidad a las plantas con T3 y en un orden descendente a T2 y T1 apenas manifestó síntomas.

3.4. Medidas de reflectancia del cultivo de Crop Circle.

Las mediciones de reflectancia proximal de la cubierta vegetal para determinar la cantidad de N del cultivo, se realizaron con el medidor Crop Circle ACS-470 (Holland Scientific Inc., Lincoln, NE, EE. UU.), un sensor de reflectancia activo, es decir, equipado con su propia fuente de radiación, lo que le permite emitir simultáneamente longitud de onda visible y NIR desde una única matriz LED. Para medir la reflectancia en este ensayo se combinaron tres filtros distintos a 550 nm (verde), 670 nm (rojo) y 760 nm (NIR, radiación infrarroja cercana). La radiación roja absorbe la clorofila y la radiación infrarroja cercana mide la transmitancia de la clorofila. Las mediciones se realizaron en una pasada, siguiendo el mismo orden que se llevó a cabo con los sensores manuales de clips de hojas, tal y como indican las flechas de la figura 15 en el apartado 3.1. Se realizaron 10 mediciones por segundo. La diferencia entre los sensores de transmitancia y el sensor de reflectancia es que el primero permitió tomar medidas puntuales sobre las hojas mientras que con el segundo se realizaron ráfagas sobre la cubierta vegetal a velocidad de marcha de aproximadamente a 1,5 km h⁻¹.

El sensor se alineó verticalmente paralelo a la parte superior de las hileras del cultivo a 45 cm de distancia horizontal, consiguiendo un campo de medida de la cubierta vegetal de aproximadamente 26 cm de altura x 5 cm de anchura (Figura 21). El sensor se colocó de manera que la parte más alta del campo de visión estuviera nivelada con la última hoja completamente expandida. Las mediciones se realizaron semanalmente siempre a la misma hora del mediodía (10:00 -12:00 hora solar) y antes del riego. La toma de medidas con este sensor comenzó 19 DDT, una vez que el cultivo había alcanzado altura suficiente para permitir la toma de datos teniendo en cuenta los 26 cm de altura del campo de visión, y siguió realizándose semanalmente hasta el final del cultivo. Se hacían cuatro pases por tratamiento y por repetición. El número total de datos tomados fueron 144 (3 variedades por 3 tratamientos = 9 por 4 repeticiones = 36 por 4 pases = 144 datos recopilados).



Figura 21. Pases de medida con el sensor Crop Circle ACS-470, a la izquierda 29 DDT con un ángulo recto hacia abajo y a la derecha 43 DDT, con el mismo ángulo

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

recto hacia arriba. De esta manera el campo de visión siempre está nivelado con la última hoja completamente expandida.

Los datos de reflectancia de cada longitud de onda se almacenaron en un registrador de datos portátil GeoScout GLS-400 (Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE, EE. UU.) y posteriormente fueron procesados en la oficina. De cada lectura individual, se calcularon cuatro índices de reflectancia basados en los valores de reflectancia de longitudes de onda individuales, y luego se promediaron los valores de índice para cada lectura individual obteniendo un valor promedio para cada repetición.

Los índices que fueron calculados son NDVI, GNDVI, RVI y GRVI. La fórmula de los mismos se muestra en la Tabla 6. GNDVI es una variación de NDVI usando la longitud de onda verde. RVI y GVI son Índices de Vegetación de Relación Simple. Estos índices se encuentran entre los índices de reflectancia de la cubierta vegetal más comúnmente utilizados para evaluar el estado del N del cultivo (Hatfield *et al.*, 2008; Padilla *et al.*, 2018).

3.5. Estadística.

Independientemente para cada tratamiento de N, las diferencias en las mediciones de sensores ópticos sobre las tres variedades de pepino a lo largo del tiempo se evaluaron mediante análisis de varianza de medidas repetidas en el tiempo (RM-ANOVA), siendo las fechas de muestreo las variables dependientes y la variedad el factor independiente. Cuando un factor o la interacción entre los factores variedad y tiempo resultaron significativos al nivel de significación de $p < 0.05$, se realizaron comparaciones por pares usando el test LSD. Previa a la ANOVA, se comprobó que los requisitos de normalidad y homogeneidad de varianzas se cumplieron. Se empleó el programa estadístico STATISTICA v10 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, EE.UU.).

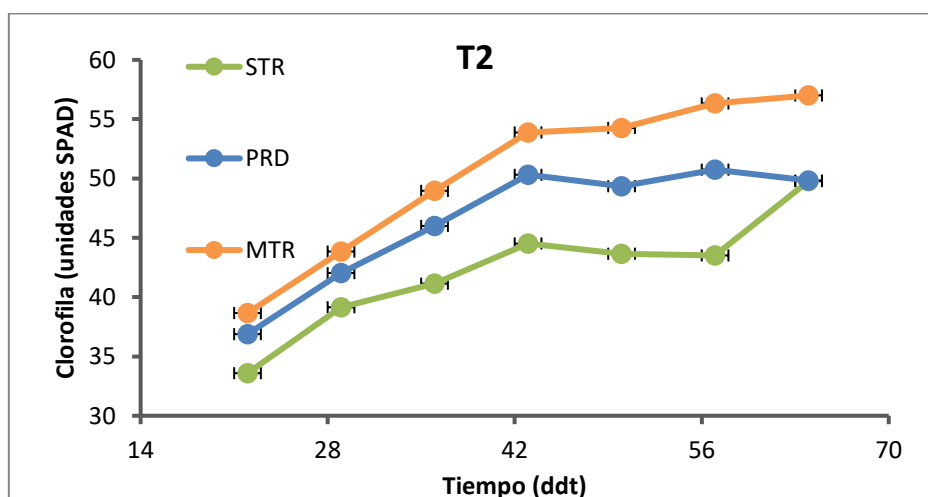
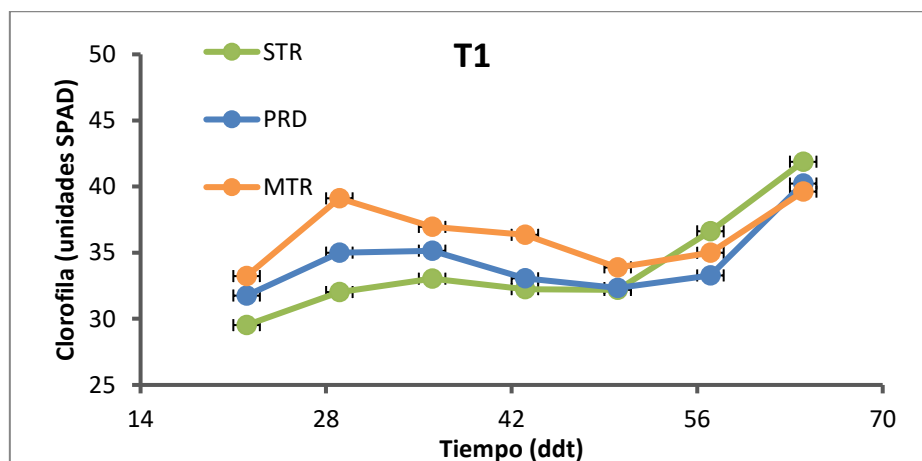
4. Resultados.

Los resultados se describen en forma de gráficas que se componen de una serie de datos representados por puntos, unidos por segmentos lineales. El eje horizontal muestra una media del tiempo continuo transcurrido, en días después del trasplante (DDT), desde la primera hasta la última toma de datos. El eje vertical indica la medida del sensor óptico. A cada período de tiempo le corresponde un punto en el valor de su frecuencia. T1, T2 y T3 corresponden a los tratamientos de N aplicados, es decir, tratamiento 1 (con un claro déficit de N), tratamiento 2 (con una baja dosis de N) y tratamiento 3 (contenido óptimo de N).

4.1. Medidas del contenido de clorofila con SPAD.

Analizando las medidas realizadas con el sensor SPAD para los tres tratamientos, los valores de clorofila frente al tiempo transcurrido en el desarrollo del cultivo fueron crecientes con tendencias similares entre tratamientos. La figura 22 muestra tres gráficas con cada uno de los tres tratamientos de N aplicados a cada una de las tres variedades de pepino cultivadas. Todas las variedades sufrieron un cambio a partir del día 42 DDT en cada tratamiento. En general, el contenido de clorofila medido con el sensor SPAD en la planta aumentó a lo largo del tiempo con cierta tendencia a estabilizar los valores al final de ciclo en los tratamientos T2 y T3 sobre todo.

En cuanto a las diferencias entre tratamientos, T1 presentó una tendencia a alcanzar su valor máximo hacia el día 28 DDT y al final de ciclo. A pesar de que sufrió una ligera fase de descenso moderadamente estable, finalmente las tres variedades aumentaron su cantidad de clorofila. Los valores de la gráfica T2 siguieron una trayectoria ascendente hasta 42 DDT, fecha en la que alcanzó valores más estables. En la gráfica del tratamiento T3, para las tres variedades, la cantidad de clorofila ascendió hasta su valor máximo, en 42 DDT, fecha a partir de la cual descendió ligeramente mostrando un mínimo en la etapa final del cultivo, 56 DDT, tras el cual vuelve a subir ligeramente, siendo este último ascenso más significativo en la variedad Pradera.



Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

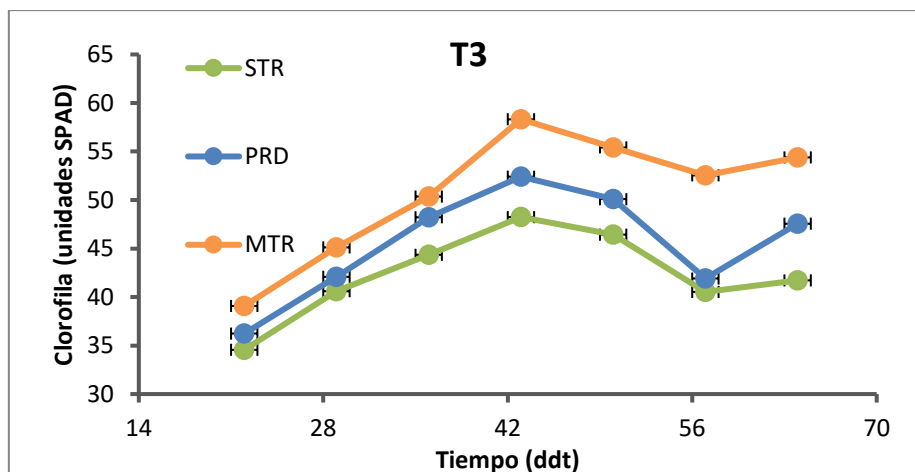


Figura 22. Evolución temporal de las medidas del contenido de clorofila con SPAD para los distintos tratamientos de N en cada una de las variedades de pepino. Se muestran valores medios. STR, Strategos; PRD, Pradera; MTR, Mitre.

El análisis estadístico de varianza de las medidas realizadas con el sensor SPAD (Tabla 7), prueba que existieron efectos significativos de la interacción variedad*tiempo en los tratamientos T1 y T2. Por otro lado, no hubo un efecto significativo de la interacción variedad*tiempo en el tratamiento T3, pero sí fue significativo el efecto de la variedad como efecto principal, lo que indica que este tratamiento las diferencias entre variedades a lo largo del tiempo fueron las mismas.

Tabla 7. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo para las medidas de SPAD.

		T1		T2		T3	
		F	p	F	p	F	p
Efecto	Grados de libertad						
Variedad	2	1.933	0.200	12.160	0.0027	14.209	0.001
Tiempo	5	21.401	p<0.001	34.845	p<0.001	16.586	p<0.001
Variedad*Tiempo	10	3.489	0.001	2.432	0.020	1.491	0.174

En los resultados de los análisis post hoc (o comparaciones por pares), concluimos que a lo largo del ciclo de cultivo, en el T1, en las variedades Strategos y Pradera, no hubo diferencias significativas pero sí las hubo con la variedad Mitre, teniendo esta última una cantidad de clorofila superior a las anteriores, presentando en el 29 DDT un máximo de 40 unidades SPAD, tras el cual comienza a estabilizar

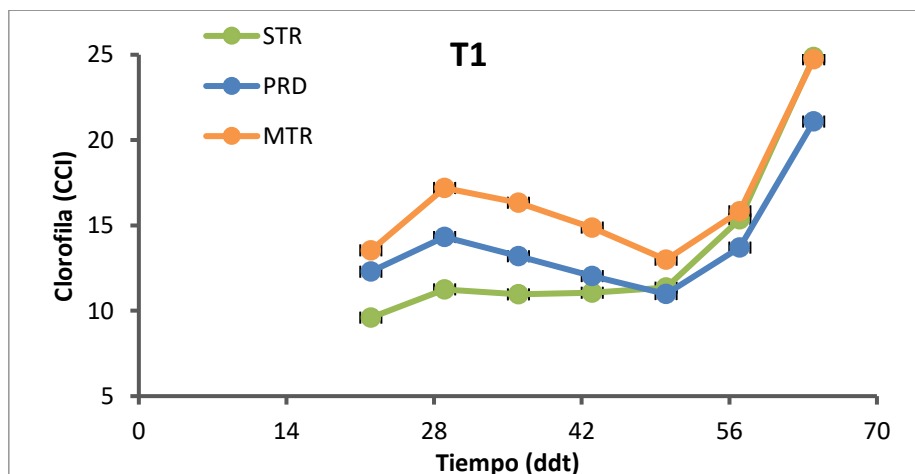
sus valores con los de Pradera (36-43 DDT) hasta que finalmente a partir de 50 DDT las tres variedades no presentaron diferencias significativas hasta el final del cultivo. Las variedades en el tratamiento T2 comenzaron sin diferencias notables entre ellas, prosiguieron con diferencias en la variedad Strategos que presentaba una cantidad de clorofila ligeramente inferior hasta que 57 DDT las tres variedades presentaron diferencias significativas entre sí. Finalmente, en el 64 DDT Strategos y Pradera no presentaron diferencias importantes entre ellas pero sí lo hicieron con la variedad Mitre que acabó alcanzando una cantidad de clorofila superior a las anteriores, en torno a 57 unidades SPAD frente a las 50 unidades SPAD de las variedades Strategos y Pradera. Por último, en el tratamiento T3, no se apreciaron diferencias significativas entre las variedades Strategos y Pradera, pero sí entre estas con respecto a la variedad Mitre, que volvió a tener una cantidad de clorofila superior a las otras dos.

4.2. Medidas del contenido de clorofila con Apogee.

Las medidas tomadas con el sensor Apogee mostraron una mayor diferencia entre tratamientos y entre las variedades dentro de cada tratamiento, en relación con los datos obtenidos con el sensor SPAD. No obstante, siguieron una tendencia análoga a las gráficas mostradas en el punto 4.1.

En general, los tres tratamientos presentaron una trayectoria similar que se inició con un aumento de cantidad de clorofila, un posterior descenso más o menos acusado según el tratamiento y finalizó con un incremento. El descenso fue más prematuro en el tratamiento T1 que en el resto (Figura 23).

Con respecto a las diferencias entre tratamientos, T1 presentó un breve incremento hasta 28 DDT, seguido de unos valores descendentes más o menos estables hasta 50 DDT fecha en la cual incrementó hasta final del cultivo. T2 y T3 mostraron pendientes ascendentes similares y un descenso en torno a 42 DDT que fue más intenso en T3 y apenas apreciable en T2 que alcanzó una estabilidad con tendencia ascendente. T3 sufrió un incremento inicial más acusado, al igual que su posterior descenso y finalmente un ligero aumento. Destacar que T2 mantuvo unos valores más estables que T1 y T3.



Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

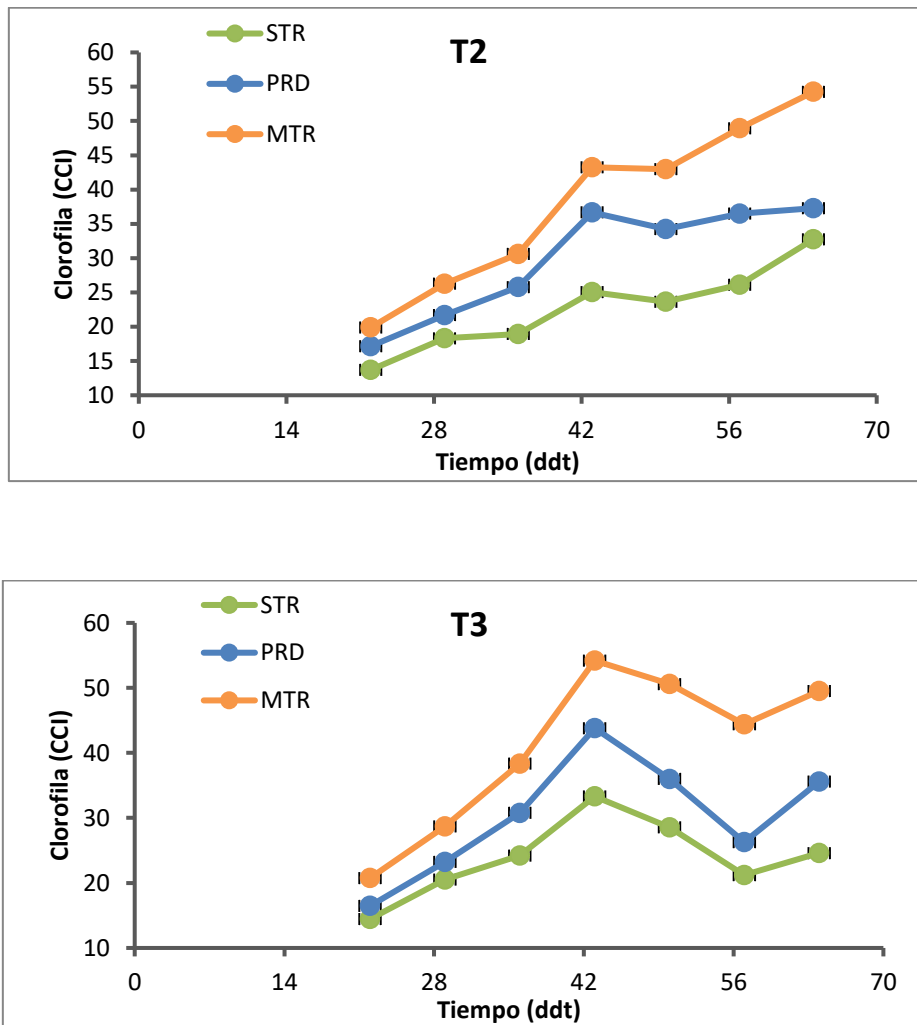


Figura 23. Evolución temporal de las medidas del contenido de clorofila con Apogee para los distintos tratamientos de N en cada una de las variedades de pepino. Se muestran valores medios. _STR, Strategos; PRD, Pradera; MTR, Mitre.

En los resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las mediciones realizadas con el sensor Apogee, estadísticamente hubo efectos significativos en las interacciones variedad*tiempo en cada uno de los tres tratamientos (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo para las medidas de clorofila con Apogee.

		T1		T2		T3	
Efecto	Grados de libertad	F	p	F	p	F	p
Variedad	2	3.514	0.074	26.507	p<0.001	28.485	p<0.001
Tiempo	5	65.648	p<0.001	37.381	p<0.001	34.157	p<0.001
Variedad* Tiempo	10	2.665	0.011	2.667	0.011	2.945	0.006

Los resultados de los análisis post hoc (o comparaciones por pares), concluyeron que, en T1, en las primeras fases de toma de datos, hubo diferencias significativas entre las variedades Mitre y Strategos hasta 57 DDT, fecha en la cual las tres variedades adquirieron valores similares hasta el final del cultivo. En el tratamiento T2, las medidas de las variedades fueron similares al inicio del cultivo hasta 43 DDT, día en el que se apreciaron diferencias significativas en la variedad Strategos con respecto a Pradera y Mitre. Seguidamente, las tres variedades mostraron diferencias importantes entre sí y finalmente Strategos y Pradera no tuvieron diferencias significativas entre ellas pero sí lo hicieron con la variedad Mitre, que alcanzó valores de CCI muy superiores. El tratamiento T3 comenzó con diferencias significativas entre las variedades Strategos y Mitre. En 43 DDT las tres variedades presentaban diferencias significativas entre sí hasta el final del cultivo, haciendo un paréntesis en las fechas 50-57 DDT donde Strategos y Pradera no tuvieron diferencias significativas entre ellas.

4.3. Medidas de reflectancia del cultivo con CropCircle.

4.3.1. NDVI.

Los valores del índice de vegetación NDVI calculado a partir de las mediciones realizadas con el sensor Crop Circle ACS-470, no mostraron una dominancia para una variedad en particular como sí había ocurrido para la variedad Mitre en los apartados anteriores de medidas de clorofila con los sensores SPAD y Apogee (apartados 4.1. y 4.2). Las variedades presentaron datos muy similares entre sí dentro de cada tratamiento, solapándose en varias ocasiones a lo largo del tiempo (Figura 24).

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

En cuanto a diferencias entre tratamientos, T2 y T3 presentaron en líneas generales una fuerte tendencia descendente desde mediados del cultivo (42 DDT), alcanzando valores finales entre 0,60 y 0,70 NDVI, destacando la variedad Pradera como dominante en ambos casos. El tratamiento T1 también sufrió un cambio en esa fecha, pero su tendencia fue ascendente y con valores más estables, alcanzando finalmente entre 0,65 y 0,70 NDVI. A pesar de que los valores obtenidos al final del cultivo fueron similares, cabe destacar que la primera medida en T1 rondó el valor de 0,55 NDVI mientras que T2 y T3 rondaron valores superiores a 0,73.

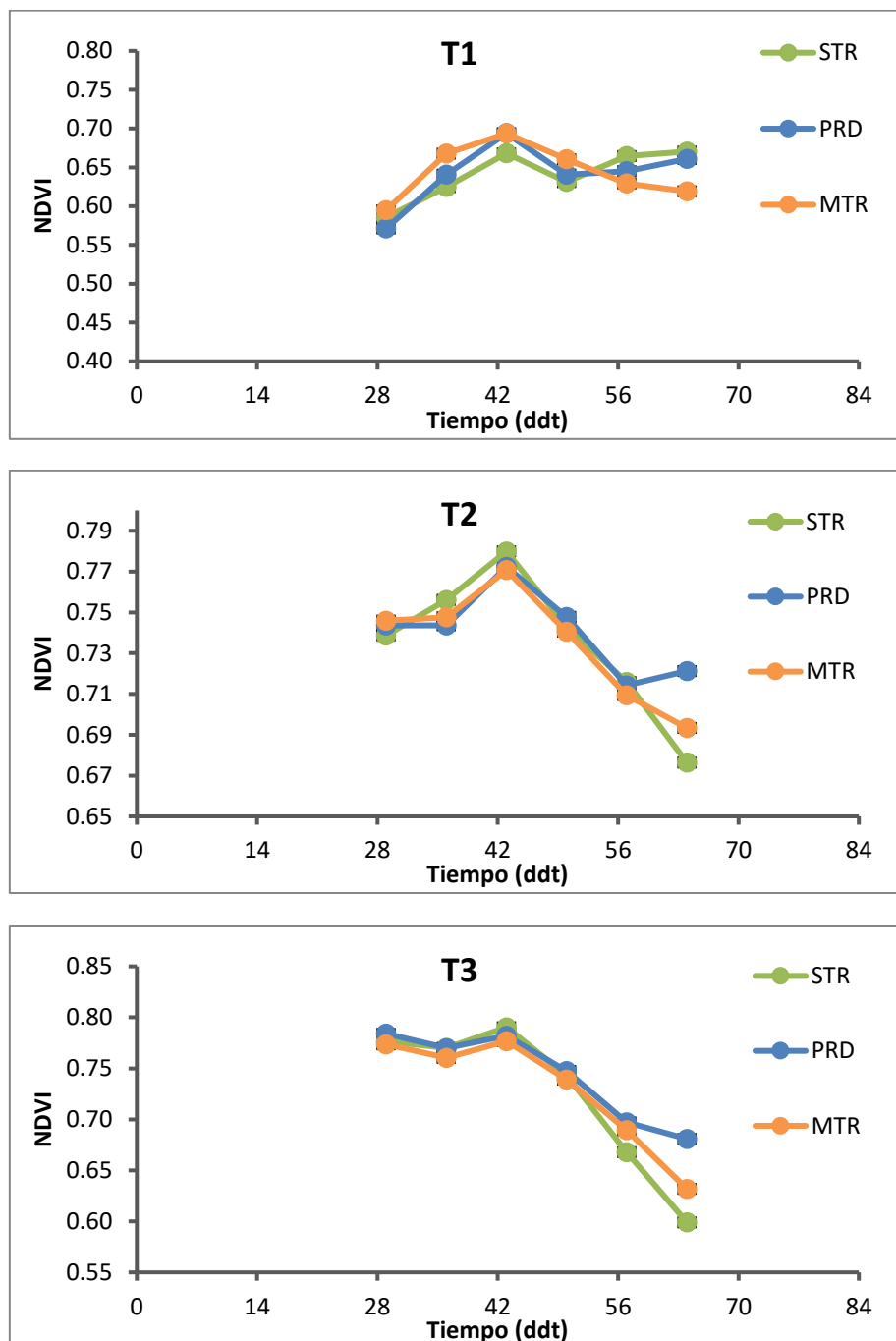


Figura 24. Evolución temporal del índice de vegetación NDVI para los distintos tratamientos de N aplicados a cada una de las tres variedades diferentes de pepino cultivadas. Se muestran valores medios. _STR, Strategos; PRD, Pradera; MTR, Mitre.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

El análisis de varianza en el índice NDVI realizado con el sensor Crop Circle ACS-470 solo mostró diferencias significativas en la interacción variedad*tiempo en los tratamientos T1 y T3, mientras que en T2 no hubo un efecto significativo de la variedad (Tabla 9) para los distintos tratamientos.

Tabla 9. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo para el índice NDVI medido con el sensor CropCircle.

Efecto	Grados de libertad	T1		T2		T3	
		F	p	F	p	F	P
Variedad	2	0.04	0.961	0.14	0.871	1.52	0.269
Tiempo	5	17.00	p<0.001	33.07	p<0.001	177.47	p<0.001
Variedad*Tiempo	10	2.22	0.034	1.61	0.136	4.94	p<0.001

En los resultados de los análisis post hoc, se concluyó que para el tratamiento T1 no hubo diferencias significativas entre variedades a lo largo del cultivo con la excepción de la fecha 64 DDT donde los valores de las variedades Strategos y Mitre fueron significativamente diferentes, presentando esta última valores de 0,60 mientras que Strategos y Pradera, valores de 0,65. En el tratamiento T2 las tres variedades no presentaron diferencias significativas a lo largo del tiempo. En el tratamiento T3, al igual que en T1, se repitió la similitud de los valores a lo largo del tiempo, a excepción de 64 DDT donde sí hubo diferencias significativas entre las tres variedades, siendo finalmente Pradera la que presentó mayor índice NDVI, seguida de Mitre y con algo más de diferencia, Strategos.

4.3.2. GNDVI.

Las tendencias presentadas en la figura 25 mostraron trayectorias muy diferentes entre tratamientos, aunque en todas ellas se produjo un cambio en la fecha 50 DDT. Por otro lado, los valores del índice GNDVI entre las variedades dentro de cada tratamiento mostraron las mismas tendencias (Figura 25).

En cuanto a las diferencias entre tratamientos, T1 presentó un decrecimiento del índice GNDVI más o menos continuo hasta 50 DDT, fecha en la cual alcanzó su mínimo absoluto y comenzó a ascender fuertemente hasta el final del cultivo. T2 mantuvo unos valores estables hasta mediados del cultivo (42 DDT) y posteriormente sufrió un brusco descenso alcanzando un mínimo absoluto 50 DDT

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

con unos valores entre 0,50 y 0,55 GNDVI, tras el cual comenzó una fase de ascenso, siendo la variedad Strategos la que tuvo menor valor de índice GNDVI. T3 manifestó en general una tendencia descendente más o menos pronunciada a lo largo del desarrollo del cultivo, siendo la variedad Strategos la que finalmente alcanzó valores inferiores a las otras dos variedades (Figura 25).

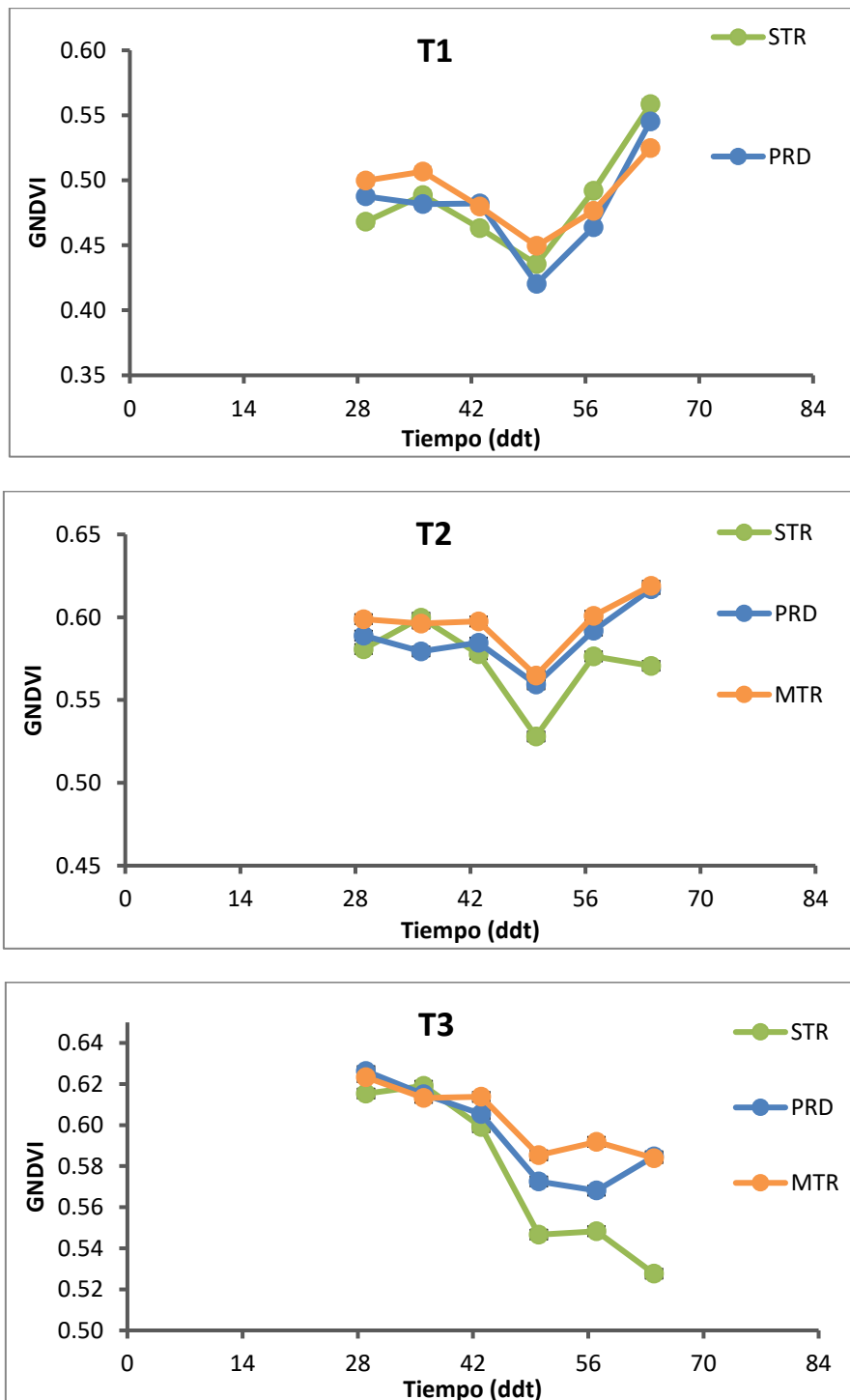


Figura 25. Evolución temporal del índice de vegetación GNDVI para los distintos tratamientos de N aplicados a cada una de las tres variedades diferentes de pepino cultivadas. Se muestran valores medios. STR, Strategos; PRD, Pradera; MTR, Mitre.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Los resultados del ANOVA para el índice de vegetación GNDVI medido con el sensor Crop Circle ACS-470, mostró efectos significativos de la interacción variedad*tiempo para los tres tratamientos (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo del índice GNDVI medido con el sensor CropCircle.

Efecto	Grados de libertad	T1		T2		T3	
		F	p	F	p	F	p
Variedad	2	0.76	0.494	3.49	0.075	4.86	0.037
Tiempo	5	35.37	p<0.001	22.78	p<0.001	53.76	p<0.001
Variedad*Tiempo	10	2.14	0.040	3.50	0.001	4.94	p<0.001

Con los resultados de las comparaciones por pares, se comprobó que los resultados fueron muy similares en los tres tratamientos. En el tratamiento T1 inicialmente hubo diferencias significativas entre las variedades Strategos y Mitre, presentando Strategos niveles inferiores. 43 DDT, las diferencias entre variedades no fueron significativas hasta 64 DDT cuando las desigualdades entre Strategos y Mitre se acentuaron de nuevo, aunque de manera contraria, es decir, siendo Mitre inferior. En el tratamiento T2 las diferencias entre variedades no fueron significativas excepto 50 DDT y 64 DDT donde Strategos mostró diferencias con respecto a Pradera y Mitre. En el tratamiento T3 tampoco hubo diferencias significativas entre variedades hasta 50 DDT, fecha en la que ocurrieron efectos similares a los encontrados en T2.

4.3.3. RVI.

La Figura 26 muestra la evolución del índice RVI calculado a partir de las medidas obtenidas con el sensor Crop Circle ACS-470. En términos generales, la trayectoria de los valores de las tres gráficas aumentaron al inicio y, a partir de 42 DDT los valores del índice RVI mostraron un decrecimiento no muy pronunciado en el tiempo para el tratamiento T1 y algo más pronunciado para los tratamientos T2 y T3.

En cuanto a diferencias entre variedades para cada tratamiento, en la primera medida realizada, T1 osciló entre 4,0 y 4,5 RVI mientras que T2 comenzó con valores de 7,0 y T3 entre 8,0 y 9,0 RVI. Al finalizar el cultivo los tres tratamientos

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

acabaron mostrando valores similares entre 5,5 y 6,0. Los tratamientos T2 y T3 alcanzaron su máximo absoluto 42 DDT, fecha tras la cual iniciaron un fuerte descenso hasta el final del cultivo. T1 siguió una trayectoria creciente hasta la misma fecha manteniendo valores más estables con ligeros descensos (Figura 26).

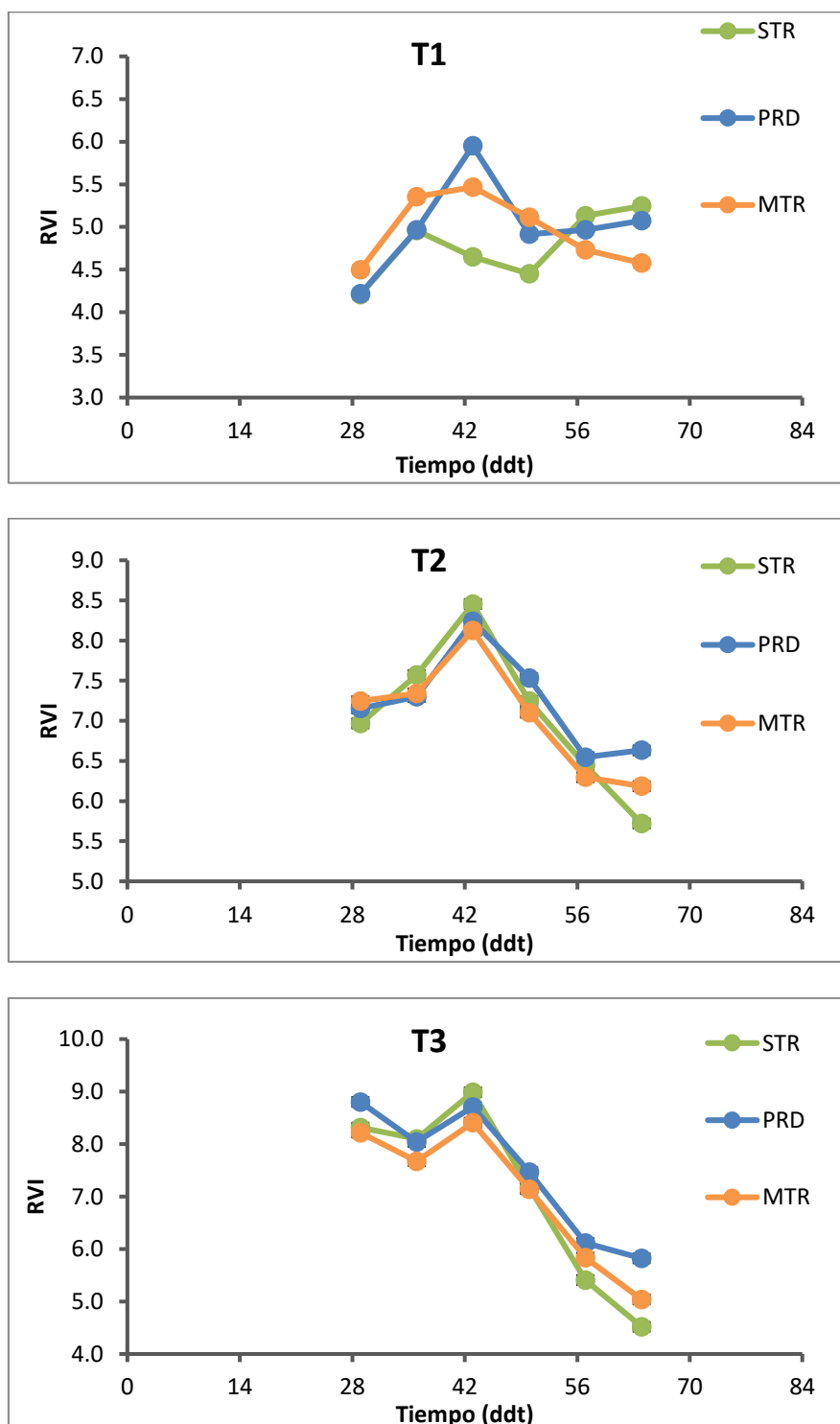


Figura 26. Evolución temporal del índice de vegetación RVI para los distintos tratamientos de N aplicados a cada una de las tres variedades diferentes de pepino cultivadas. Se muestran valores medios. STR, Strategos; PRD, Pradera; MTR, Mitre.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

El índice de vegetación RVI medido con el sensor Crop Circle y analizado estadísticamente, no presentó diferencias significativas entre variedades en el tratamiento T2, pero sí se apreciaron efectos significativos en la interacción variedad*tiempo en los tratamientos T1 y T3 (Tabla 11).

Tabla 11. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo para el índice RVI medido con el sensor CropCircle.

Efecto	Grados de libertad	T1		T2		T3	
		F	p	F	p	F	p
Variedad	2	0.713	0.516	0.113	0.894	1.045	0.390
Tiempo	5	11.081	p<0.001	37.135	p<0.001	185.044	p<0.001
Variedad*Tiempo	10	4.209	p<0.001	1.234	0.295	2.695	0.011

En los resultados de los análisis post hoc, se encontró que para el tratamiento T1 no hubo diferencias significativas entre variedades a lo largo del cultivo excepto en la fecha 43 DDT donde se apreciaron diferencias entre Strategos y el resto de variedades, siendo Strategos inferior a las variedades Mitre y Pradera, las cuales no mostraron diferencias entre ellas. Finalmente, Mitre tuvo diferencias significativas con Strategos, pero no con la variedad. El tratamiento T3 mostró valores similares entre variedades sin diferencias importantes con la excepción de 64 DDT, fecha en la que Strategos y Pradera manifestaron diferencias entre ellas, siendo mayor RVI en Pradera.

4.3.4. GRVI.

La figura 27 expone tres gráficas que representan la evolución temporal del índice de vegetación GRVI para los distintos tratamientos de N aplicados a cada una de las tres variedades diferentes de pepino cultivadas. Su trayectoria general comenzó ascendiendo con pendientes variables según el tratamiento, seguida de un fuerte descenso y por último un incremento en los valores GRVI.

Observando los tratamientos individualmente, podemos decir que en el tratamiento T1, las tres variedades descendieron hasta alcanzar un mínimo 50 DDT y posteriormente su trayectoria lineal se incrementó hasta el final del cultivo. En el tratamiento T2 las trayectorias fueron similares a T1, descendiendo hasta alcanzar su mínimo en la misma fecha e incrementando hasta el final del cultivo. El tratamiento T3 presentó en sus inicios un descenso moderado hasta el 50 DDT

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

donde las variedades Pradera y Mitre se estabilizaron, pero la variedad Strategos continuó en descenso.

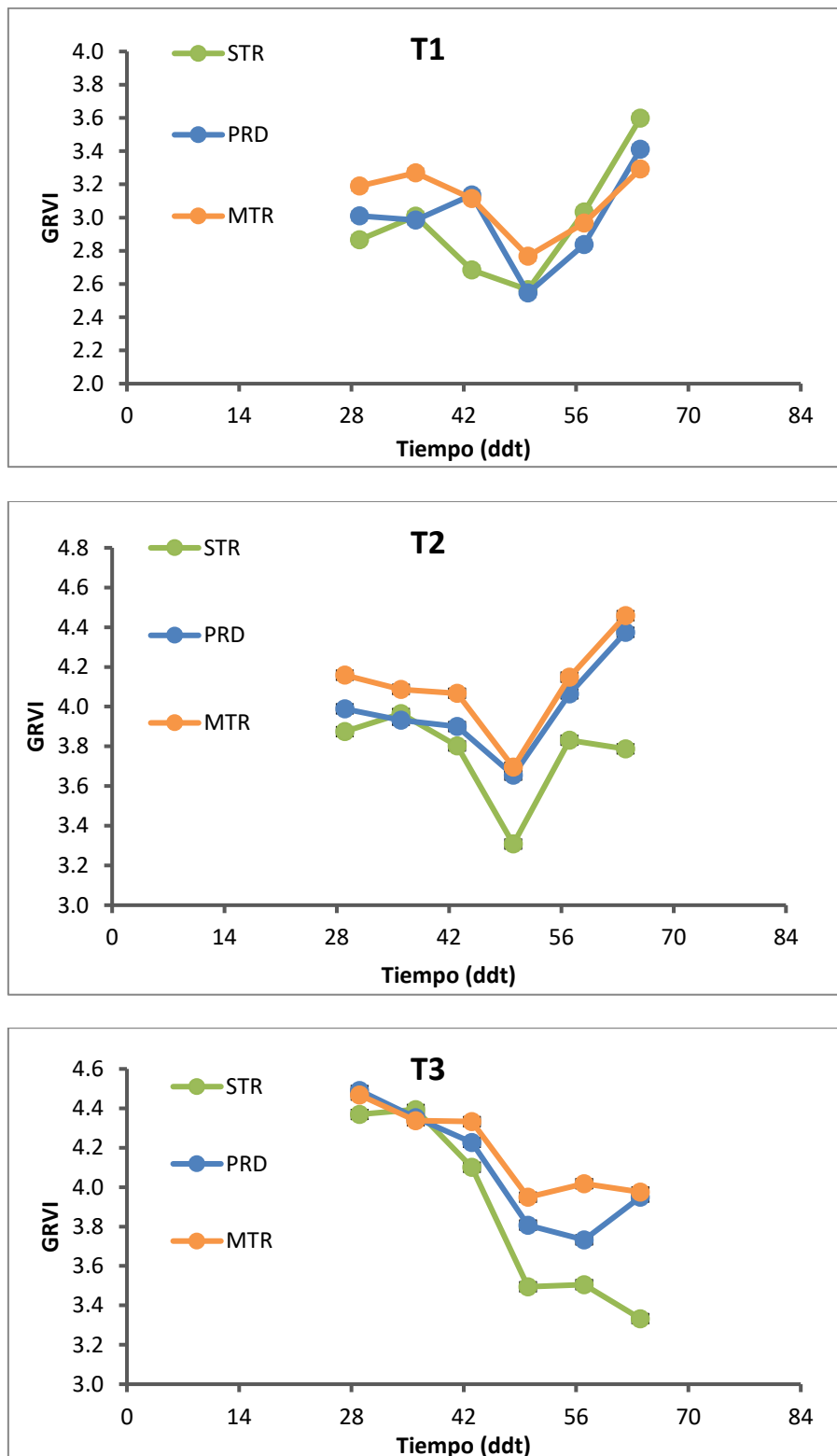


Figura 27. Evolución temporal del índice de vegetación GRVI para los distintos tratamientos de N aplicados a cada una de las tres variedades diferentes de pepino cultivadas. Se muestran valores medios. STR, Strategos; PRD, Pradera; MTR, Mitre.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

El índice de vegetación GRVI realizado con el sensor Crop Circle ACS-470 y analizado estadísticamente, mostró efectos significativos de la interacción variedad*tiempo de los tres tratamientos (Tabla 12).

Tabla 12. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo para el índice GRVI medido con el sensor CropCircle.

		T1		T2		T3	
Efecto	Grados de libertad	F	p	F	P	F	p
Variedad	2	3.56	0.0728	4.399	0.047	4.722	0.040
Tiempo	5	31.89	p<0.001	20.992	p<0.001	56.858	p<0.001
Variedad*Tiempo	10	4.13	p<0.001	2.113	0.043	3.924	p<0.001

Con los resultados de las comparaciones por pares, se concluyó que generalmente no había apenas diferencias significativas entre las variedades a lo largo del tiempo. En el tratamiento T1 se mostraron diferencias significativas al inicio de la toma de medidas entre Strategos y Mitre, siendo esta última superior por 0,4 GVRI de diferencia. Posteriormente, Pradera se mantuvo intermedia teniendo diferencias significativas con una y luego con otra, pero finalmente (50 DDT) todas conservaron unos valores similares. 64 DDT Strategos volvió a tener diferencias significativas con Mitre, siendo la primera mayor. En el tratamiento T2 no hubo diferencias significativas entre las variedades a lo largo de todo el ciclo de cultivo excepto en los días 50 DDT y 64 DDT donde Strategos presentó diferencias significativas con respecto a las otras dos variedades, que no mostraban diferencias entre sí, siendo Strategos bastante más inferior. El tratamiento T3 siguió la misma tendencia que el T2, sin diferencias significativas entre variedades hasta el día 50 DDT donde Strategos tuvo uno de los valores más bajos (3,4 GVRI), iniciando unas diferencias que fueron en aumento. Finalmente, 64 DDT, Strategos alcanzó valores de 3,2 GVRI frente a 4,0 GVRI de las variedades Mitre y Pradera.

5. Discusión.

5.1. Discusión general de los resultados.

En este trabajo se encontró que hubo diferencias entre variedades en las medidas del contenido de clorofila en hoja realizadas con el sensor Apogee y también en los índices de vegetación de reflectancia de la cubierta vegetal medidos con el sensor Crop Circle ACS470, como fueron GNDVI y GRVI, siendo estas

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

diferencias principalmente entre la variedad Strategos y Mitre. Por otro lado, en las medidas del contenido de clorofila en hoja realizadas con el sensor SPAD, no hubo efectos significativos de la variedad en el tratamiento T3 y en los índices de vegetación de reflectancia de la cubierta vegetal, NDVI y RVI, también medidos con el sensor Crop Circle, tampoco se encontraron diferencias significativas entre variedades en el tratamiento T2. Sin embargo, para los otros dos tratamientos se encontraron diferencias significativas entre las variedades Strategos y Mitre en la mayoría de días de medida.

Estos resultados se traducen en que a la hora de realizar mediciones con estos sensores ópticos e interpretar las medidas realizadas con los mismos y con valores de suficiencia disponibles en la literatura científica, hay que tener en cuenta que puede haber diferencias en los valores de las medidas entre ciertas variedades. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta la variedad elegida a la hora de interpretar el estado nutricional en N de un cultivo a partir de valores de suficiencia de sensores ópticos derivados para una variedad específica, ya que según la variedad, las medidas tendrán un valor u otro. En el caso del sensor SPAD, en el T3 (aporte óptimo, 14 mM N), las diferencias entre variedades fueron similares a lo largo de todo el ciclo, y para los índices NDVI y RVI tampoco hubo grandes variaciones en las diferencias entre variedades en el tratamiento T2 (aporte ligeramente deficitario, 8 mM N). Así pues, para el caso de un cultivo de pepino en invernadero, el sensor SPAD (para un rango comprendido entre 27 y 60 unidades SPAD) y los índices NDVI (para un rango comprendido entre 0,55 y 0,80) y RVI (comprendido entre 4,0 y 9,0), el efecto de la variedad fue bastante consistente en el tiempo y no dependió de la fecha de medida

Por otro lado, el efecto de la variedad en el sensor Apogee y los índices GNVI y GRVI, para este experimento de cultivo de pepino en invernadero, se vieron más influidos por el tiempo de medida, lo que evidenciaría que el efecto de la variedad es menos consistente en estos sensores.

En cuanto a las diferencias entre variedades, para el sensor SPAD, siempre que la variedad Mitre mostró diferencias significativas con respecto a las otras variedades fue debido a una tendencia a alcanzar cantidades más elevadas de clorofila que las demás. Este mismo patrón fue el que se encontró con el sensor Apogee. Del mismo modo, para los índices GNDVI y GRVI, las diferencias significativas entre variedades fueron debidas principalmente a la variedad Strategos y su dificultad para alcanzar los niveles de clorofila de las otras dos variedades. Esto ratificó la hipótesis de partida de que no se puede asumir un valor fijo que sea aplicable a todas las variedades siendo necesario relativizar por cada una.

Otro aspecto a tener en cuenta es que se observó una tendencia generalizada al final del ensayo en la que casi todos los índices y valores de las medidas bajaban drásticamente, algunos más que otros, debido al ataque severo de Mildiu (*Pseudoperonospora cubensis*) que sufrió el cultivo en las últimas fechas. Por tanto, los resultados encontrados en los días 57 DDT y 64 DDT no se pueden considerar medidas representativas de un cultivo sano y consecuentemente estas medidas realizadas sobre hojas que no estaban sanas no se podrían considerar del todo válidas.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Desde otra perspectiva, centrándonos en los índices de vegetación calculados a partir de las mediciones realizadas con el sensor Crop Circle, el índice NDVI es el que mostró mayor similitud entre los valores de las variedades por lo que se consideró el más indicado para este experimento. Descartando las últimas dos fechas de medidas, el índice RVI tampoco tiene diferencias significativas en T2 ni T3 y solo tuvo en el T1 en las fechas 43 DDT y 50 DDT hubo diferencias entre las variedades Strategos y Mitre, posicionándose Pradera en la primera fecha sin diferencias significativas con respecto a Mitre y, en la segunda fecha sin diferencias significativas con respecto a Mitre y Strategos. Esto significa que este índice también resultó interesante para su uso en el campo.

5.2. Relación con la bibliografía.

Diversos estudios apoyan los resultados obtenidos en este ensayo con los medidores de clorofila en la hoja, más concretamente con el sensor SPAD-502, ya que apenas hay estudios relacionados con el sensor Apogee.

Un experimento paralelo a este trabajo fue el desarrollado por Sandoval-Villa *et al.* (2000), que investigó sobre cómo las lecturas de los medidores de clorofila en la hoja (sensor SPAD) de tomate se ven afectadas por la variedad, la cantidad nitrógeno y la solución de nutrientes. Aunque esta última condición no se ha estudiado directamente en nuestro trabajo, su conclusión afecta de manera indirecta y refuerza la base de nuestro ensayo.

El artículo de Sandoval-Villa *et al.* (2000), corroboró que el contenido de clorofila foliar está estrechamente relacionado con el contenido de nitrógeno (N) en la hoja y que, en consecuencia, este verdor de las hojas afecta a las lecturas del medidor de clorofila (SPAD). Estas afirmaciones concuerdan con la base del presente trabajo realizado sobre cultivo de pepino. Sandoval-Villa *et al.* (2000), también demostró que el aumento de la concentración de la solución de nutrientes (NSS) aumentó la productividad del tomate, pero no llegaron a existir informes sobre cómo esa NSS afectaba a las lecturas de SPAD en condiciones de invernadero. Finalmente, y mucho más relacionado con la temática de este trabajo, también concluyó que el genotipo puede influir en las lecturas de SPAD, y advierte de que es necesaria la estandarización de las medidas para cada cultivar y el tiempo de muestreo. Esto quiere decir que no se puede estandarizar un mismo valor común a todas las especies cultivares y que, aun así, dentro de cada especie como ocurre en el caso del pepino, el genotipo entre variedades puede ser distinto, ya que la mejora genética es un pilar que avanza cada día en el ámbito de la mejora vegetal.

Finalmente, Sandoval-Villa *et al.* (2000), comprobó que en muchas fechas de muestreo, las lecturas de SPAD fueron significativamente diferentes entre las variedades y se vieron afectadas significativamente por la concentración de nitrógeno aportada en la solución. Estas afirmaciones son sustancialmente similares a las obtenidas en nuestro trabajo ya que también hubo diferencias significativas entre variedades a lo largo del tiempo en muchos tratamientos. Sandoval-Villa *et al.* (2000), señaló también que las lecturas no se vieron afectadas por la NSS. Esta conclusión aunque afecta indirectamente a nuestro trabajo, sustenta que el sensor

SPAD tiene una fuerte relación exclusivamente con la cantidad de N en la planta y que sus valores no se ven afectados por otros nutrientes aportados.

Otro estudio relevante para interpretar los resultados de este trabajo fue el de Hoel (2002), que estudió el contenido relativo de clorofila de la hoja con un medidor de clorofila portátil para obtener una indicación del estado de N de la planta. Su objetivo fue averiguar si existían diferencias significativas entre dos variedades diferentes de trigo de invierno y también evaluar si estos valores pudieron emplearse para la predicción del contenido de proteína de grano. Tomó las lecturas durante un año en la etapa de crecimiento de las plantas en 17 ensayos, con varias repeticiones de cada variedad, ubicados en el sureste de Noruega durante los años 1996, 1997 y 1998 y finalmente obtuvo diferencias significativas entre esos tres cultivares. Sin embargo, no halló diferencias significativas entre los tres cultivares más comúnmente utilizados en Noruega en la actualidad.

Estas conclusiones sustentan que las medidas realizadas con el sensor SPAD pueden verse alteradas en función del genotipo y que, seguramente, las tres variedades de trigo más cultivadas en la actualidad en Noruega serán las que mejor se adapten a tipo de clima y suelo, a la par que su rendimiento sea sostenible y consistente y, tendrán por lo tanto genotipos similares.

Hoel (2002) realizó un segundo experimento en el que concluyó que las diferencias de cultivares tienen un efecto sobre el verdor de la hoja y que es necesaria una calibración del instrumento para su utilización en la evaluación del estado de nitrógeno en el cultivo de trigo de invierno.

Estas afirmaciones concuerdan con el estudio anterior de Sandoval-Villa *et al.* (2000) y las halladas en este experimento de cultivo de pepino bajo invernadero, ya que la cantidad de clorofila en la hoja está directamente relacionada con la cantidad de N que hay en la planta. De igual modo, se sustenta que la interpretación de las medidas de los sensores ópticos no puede ser la misma entre genotipos.

Otro artículo relevante para este trabajo es el de Monostori *et al.* (2016), que estudió la relación entre el valor SPAD y el rendimiento de grano en el cultivo de trigo, afirmando que puede verse afectado por el medio ambiente y el contenido de N en el suelo. Este trabajo concluye que el genotipo de la planta y el medio que le rodea puede afectar a los valores de las medidas realizadas con el sensor SPAD. Este argumento puede explicar algunos de los datos obtenidos fuera de la media en nuestro experimento en el cultivo de pepino, pudiendo deberse a excesos de humedad en el microclima creado en el invernadero debido al marco de plantación.

Las conclusiones de Monostori *et al.* (2016), fueron llevadas a cabo mediante la realización de experimentos de campo en tres temporadas de cultivo consecutivas entre 2012 y 2015 en Hungría y se probaron cuarenta variedades de trigo de invierno con dos tratamientos diferentes de N. Finalmente, se encontró una fuerte correlación positiva significativa entre el rendimiento del grano y los valores de SPAD. No obstante, se concluyó que aunque el mismo valor SPAD podía predecir diferentes niveles de rendimiento en diferentes cultivares, se ratificó que el valor de SPAD debe calibrarse para cada cultivar con el fin de proporcionar una estimación más precisa para cada cultivo.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

Un trabajo de Samborski *et al.* (2015) acerca del efecto del genotipo del trigo de invierno en la reflectancia de la cubierta vegetal, estudia las implicaciones para el uso del NDVI para las recomendaciones de tratamiento con N. Samborski *et al.* (2015) sustenta que las observaciones visuales del verdor y la densidad de la planta del trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) sugieren que los valores de NDVI pueden ser específicos de cada genotipo. Esto reafirma algunas de las conclusiones del estudio de Monostori *et al.* (2016) anteriormente mencionado para el sensor SPAD y concuerdan también con los datos obtenidos en este trabajo.

No obstante, Samborski *et al.* (2015) señala que algunos sistemas de sensores utilizan coeficientes de corrección para eliminar el efecto del genotipo en los valores de NDVI y, tras llevar a cabo su estudio durante tres años con el fin de evaluar, en tres sitios diferentes en Polonia, los efectos de los cultivares de trigo de invierno y las condiciones de crecimiento en la reflectancia de la cubierta vegetal, medida por índices vegetativos de diferencia normalizada (NDVI) rojo y ámbar con los sensores GreenSeeker Modelo 505 y Crop Circle ACS-210, respectivamente, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) de NDVI asociadas con genotipos de trigo a lo largo de los años y sitios. Aunque en el estudio, las diferencias específicas del genotipo en el NDVI rojo y ámbar en el trigo de invierno no fueron consistentes y disminuyeron a lo largo de la temporada de crecimiento, se concluyó que se debe realizar una calibración in situ (usando referencia en el campo o tiras de referencia virtuales) o se deben usar coeficientes de corrección temporalmente variables para normalizar el NDVI a través de genotipos, años y sitios.

Los resultados de este trabajo junto con los antecedentes encontrados en la bibliografía sustentan la hipótesis de que la variedad vegetal pueden influir de manera determinante en las medidas de los sensores ópticos, más en los sensores a nivel de hoja, tipo los medidores de clorofila, que los sensores de reflectancia a nivel de cubierta, y que por tanto es necesario buscar maneras de estandarización de las medidas de los sensores ópticos que sean ajenas al efecto varietal.

6. Conclusiones.

En este trabajo se ha observado que las lecturas de medidas del contenido de clorofila en hoja y algunos índices de reflectancia de la cubierta vegetal (NDVI, GNDVI, RVI y GRVI) realizadas con diversos sensores ópticos proximales, estuvieron fuertemente asociadas con el tratamiento de N aplicado a tres variedades de pepino bajo invernadero, “Pradera” (de Rijk Zwaan), “Mitre” (de Semillas Fitó) y “Strategos” (de Syngenta). Las medidas de estos sensores ópticos se acrecentaron al aumentar la dosis de los tratamientos de N en cada una de las tres variedades a lo largo de gran parte del ciclo de cultivo.

En las medidas del contenido de clorofila en hoja realizadas con el sensor SPAD-502, no hubo un efecto significativo del tiempo sobre la variedad vegetal en el tratamiento T3 y, en los tratamientos T1 y T2 los efectos fueron provocados mayormente por las diferencias entre las variedades Strategos y Mitre.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

El índice NDVI, medido con el sensor Crop Circle ACS-470, no mostró diferencias notables entre variedades para los distintos tratamientos. Y, descartando las últimas dos fechas de medidas debido a que las lecturas obtenidas no se consideraron del todo válidas puesto que no eran representativas de un cultivo sano, el índice RVI tampoco tuvo diferencias significativas en T2 ni T3 y solo manifestó cambios en T1 en las fechas 43 DDT y 50 DDT entre las variedades Strategos y Mitre.

Paralelamente, los índices GNDVI y GRVI sí mostraron diferencias más aparentes entre variedades, principalmente en los tratamientos T1 (aporte claramente deficitario de N), al inicio de las tomas de medidas y en los tratamientos T2 (aporte ligeramente deficitario de N) y T3 (tratamiento óptimo) a partir de 50 DDT. Estas diferencias fueron originadas principalmente entre las variedades Mitre y Strategos, debido a la dificultad de la segunda para alcanzar los valores que mostró Mitre. Esta discrepancia entre ambas variedades se repitió en las diferencias encontradas en los índices NDVI y RVI, para los tratamientos T1 y T3, a pesar de que no se encontraron diferencias significativas en T2.

En líneas generales, el efecto de la variedad en el sensor Apogee y los índices GNDVI y GRVI, para este experimento de cultivo de pepino en invernadero, se vieron más influidos por el tiempo de medida, lo que demostró que el efecto de la variedad es menos consistente en estos sensores.

En conjunto, estos resultados implican que a la hora de realizar mediciones con estos sensores ópticos e interpretar las medidas realizadas con los mismos y con valores de suficiencia disponibles en la literatura científica, hay que tener en cuenta que puede haber diferencias en los valores de las medidas entre ciertas variedades.

Estos resultados sugieren que no es recomendado usar un valor de suficiencia que sea aplicable a todas las variedades, siendo necesario relativizar según la variedad. Esto podría limitar en cierto modo el potencial de uso de estos sensores ópticos si no se tiene en cuenta el efecto de la variedad.

Bibliografía

- Birth, G., & McVey, G. (1968). Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, págs. 60, 640–643.
- BOJA. (5 de febrero de 2008). *Decreto 36/2008. Por el que se designan las nitratos de origen agrario*. Boletín Oficial de la Comunidad Autónoma de Andalucía nº 36 de 20/02/2008: 5-15.
- Cadahía, C. (2005). *Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Madrid, Barcelona, México: Ediciones Mundi-Prensa.
- Camacho, F. (2015). *Técnicas de producción en cultivos protegidos. Tomo 1*. Almería, España: Caja Rural Intermediterránea, Cajamar.
- Camacho, F. (2016). *Técnicas de producción en cultivos protegidos. Tomo 2*. Almería, España: Caja Rural Intermediterránea, Cajamar.
- Camargo, J., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas*.
- Cárdenas-Navarro, R., Sánchez-Yáñez, J., Farías-Rodríguez, R., & Peña-Cabriales, J. (2004). Los aportes de nitrógeno en la agricultura. *Revista chapingo*.
- CEE, D. 9. (1991). Relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. Diario Oficial de la Comunidad Europea n L375 de 31/12/1991: 1-8.
- FAO. (1996). Cumbre mundial sobre la alimentación. Roma.
- FAO. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia: Departamento de Desarrollo Económico y Social.
- García, M., Céspedes, A., Pérez, J., & Lorenzo, P. (2016). *El sistema de producción hortícola protegido de la provincia de Almería*. IFAPA.
- García, M., Fernández, M., Navarro, V., & Baeza, R. (2007). *Contaminación por nitratos de origen agrario*. Centro IFAPA La Mojonera-La Cañada, Almería: Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- Hatfield, J., Gitelson, A., Schepers, J., & Walthall, C. (2008). Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. *Agronomy Journal*.
- Hoel, B. (2002). Chlorophyll meter readings in winter wheat: cultivar differences and prediction of grain protein content. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil & Plant Science* (págs. 147-157). Kapp, Norway: The Norwegian Crop Research Institute, Apelsvoll Research Centre, NO-2849.
- Hopkins, W. G. (1995). *Introduction to Plant Physiology*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 464 p.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

- Isik, M. . (2002). Variable-rate nitrogen application under uncertainty: Implications for profitability and nitrogen use. *J. Agric. Resour. Econ.*27:61–76.
- Izcarra, S. (2000). La directiva nitratos en España (el ejemplo del Campo de Dalías, Almería). *Estudios Agrosociales y Pesqueros*, n.º 186, 203-226.
- Jifon, J., Syvertsen, J., & Whaley, E. (2005). Growth Environment and Leaf Anatomy Affect Nondestructive Estimates of Chlorophyll and Nitrogen in Citrus sp. Leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.
- Knipling, E. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote sensing of environment*.
- Ma, B., Morrison, M., & Dwyer, L. (1996). Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. *Agronomy Journal*, págs. 88, 915–920.
- Meisinger, J., Schepers, J., & Raun, W. (2008). Crop Nitrogen Requirement and Fertilization. *Nitrogen in agricultural systems*.
- Monostori, I., Árendás, T., Hoffman, B., Galiba, G., Gierczik, K., & Szira, F. (2016). Relationship between SPAD value and grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat. *Euphytica*, 103-112.
- Padilla, F., Gallardo, M., Peña-Fleitas, M., de Souza, R., & Thompson, R. (2018). Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops. *Sensors*, 1-16.
- Padilla, F., Peña-Fleitas, M., & Gallardo, M. (2017). Determination of sufficiency values of canopy reflectance vegetation indices for maximum growth and yield of cucumber. *European Journal of Agronomy*.
- Padilla, F., Peña-Fleitas, M., Gallardo, M., & Thompson, R. (2014). Evaluation of optical sensor measurements of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon. *European Journal of Agronomy*.
- Padilla, F., Peña-Fleitas, M., Gallardo, M., & Thompson, R. (2015). Threshold values of canopy reflectance indices and chlorophyll meter readings for optimal nitrogen nutrition of tomato. *Ann. Appl. Biol.*, 166.
- Pérez, J., López, J., & Fernández, M. (2002). La agricultura del sureste: situación actual y tendencias de las estructuras de producción en la horticultura almeriense. *Colección Mediterráneo Económico "La agricultura mediterránea en el siglo XXI"*.
- Reche, J. (2011). *Cultivo del pepino en invernadero*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Rosset, P. (1998). *La crisis de la agricultura convencional, la sustitución de insumos, y el enfoque agroecológico*. Oakland, California.

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

- Samborski, S. M., Gozdowski, D., Walsh, O. S., Lamb, D. W., Stępień, M., Gacek, E. S., y otros. (2015). Winter wheat genotype effect on canopy reflectance: implications for using NDVI for in-season nitrogen topdressing recommendations. *Agronomy Journal Abstract - Soil Fertility & Crop Nutrition*.
- Samborski, S., Tremblay, N., & Fallon, E. (2009). Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal*, 101: 800–816.
- Sandoval-Villa, M., Guertal, E., & Wood, C. (2000). Tomato leaf chlorophyll meter readings as affected by variety, nitrogen form, and nighttime nutrient solution strength. *Journal of Plant Nutrition*, 649-661.
- Satorre, E. (2005). Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia hoy*, 28.
- Schepers, J., Blackmer, T., Wilhelm, W., & Resende, M. (1996). Transmittance and reflectance measurements of cornleaves from plants with different nitrogen and water supply. *Journal of Plant Physiology*.
- Schröder, J., Neeteson, J., Enema, O., & Struik, P. (2000). Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? *Reviewing the state of the art. Field Crops Res.* 66:151–164.
- Sellers, P. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, págs. 1335-1372.
- Thompson, R., Gallardo, M., & Voogt, W. (2014). Optimizing nitrogen and water inputs for greenhouse vegetable production. *International Horticultural*.
- Thompson, R., Incrocci, L., Voogt, W., Pardossi, A., & Magán, J. (2015). *Sustainable irrigation and nitrogen management of fertigated vegetable crops*. Proc. VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, (364) (367). DOI 10.17660/ActaHortic.2017.1150.52.
- Thompson, R., Martínez-Gaitán, C., Gallardo, M., Giménez, C., & Fernández, M. (2007a). Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agr. Water Manage.* 89, 261–274.
- Thompson, R., Tremblay, N., Fink, M., Gallardo, M., & Padilla, F. (2017). Tools and strategies for sustainable nitrogen fertilisation of vegetable crops. *Advances in Research on Fertilization Management in Vegetable Crops*, 11-63.
- Tremblay, N., Fallon, E., & Ziadi, N. (2011). Sensing of Crop Nitrogen Status: Opportunities, Tools, Limitations, and Supporting Information Requirements. *HortTechnology*.
- Tremblay, N., Fallon, E., Bélec, C., Tremblay, G., & Thibault, E. (2007a). *Growing season and soil factors related to predicting corn nitrogen fertilization in Quebec. Managing crop nitrogen for weather*. T.W. Bruulsema (ed.) Proc. of

Efecto de la variedad vegetal sobre las medidas de sensores ópticos

the Symp. "Integrating Weather Variability into Nitrogen Recommendations."
Int. Plant Nutrition Inst., Norcross, GA.

UE, L. D. (2010). Unión Europea.

Varvel, G., Wilhelm, W., Shanahan, J., & Schepers, J. (2007). An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agron. J.* 99:701–706.

World Health Organization. (2004). Recommendations; nitrite, nitrate and nitrite. En *Guidelines for drinking-water quality. 3rd ed.* (págs. 417–420). WHO, Geneva, Switzerland.

El nitrógeno (N) es el elemento fundamental para el desarrollo de los cultivos y permite obtener producciones elevadas. Pero generalmente, el N y el riego suministrado a los cultivos intensivos de hortalizas son excesivos para los requerimientos de los cultivos, lo que ha desencadenado en la contaminación de acuíferos subyacentes a campos de cultivo como consecuencia directa de la lixiviación de nitratos utilizados en la agricultura. Debido a esto, se han declarado zonas vulnerables a la contaminación por nitratos y en consecuencia, existe la necesidad de desarrollar programas y herramientas que ajusten con precisión tanto el N como el suministro de riego a las exigencias de los cultivos.

En este sentido, los sensores ópticos, que son dispositivos que miden propiedades ópticas de las plantas, pueden emplearse como indicadores del estado nutricional de los cultivos y hacer así un uso eficiente del N. Para evaluar el efecto de la variedad sobre estos sensores, se realizó un ensayo experimental para tres variedades de cultivo de pepino en suelo en invernadero, en condiciones similares a las comerciales del sureste de España.

El invernadero se estructuró en un total de doce parcelas y se aplicaron tres tratamientos experimentales con tres concentraciones crecientes de N (desde aporte muy deficitario a dosis óptima), aplicadas en la solución nutritiva del sistema de fertirrigación, sin limitaciones en el resto de nutrientes.

Se realizaron medidas periódicas con sensores ópticos proximales a lo largo del ciclo de cultivo. Por un lado, se midió contenido de clorofila en hoja, utilizando dos sensores manuales (SPAD-502 y APogee) que miden la transmitancia de la hoja en una medida adimensional, que se traduce en contenido de clorofila relativo que tiene la hoja. Y por otro lado, se realizaron medidas de reflectancia de la cubierta vegetal con otro sensor activo de reflectancia (Crop Circle ACS470) y, a partir de ellas, usando diferentes fórmulas matemáticas, se calcularon distintos índices de vegetación más empleados en la literatura científica (i.e. NDVI, RVI, GNDVI y GVI).

El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo para comparar los tres tratamientos y las tres variedades con un nivel de confianza del 95%. Estos análisis permitieron evaluar la sensibilidad de cada sensor y se concluyó que no hubo diferencias notables entre variedades en los índices NDVI y RVI. Sí hubo diferencias significativas entre variedades en las medidas de SPAD-502, Apogee y los índices de vegetación GNDVI y GVI.

Los resultados sugieren que no es recomendable usar un valor único de suficiencia de sensores ópticos que sea aplicable a todas las variedades dentro de una misma especie, siendo necesario relativizar según la variedad.

