

Optimización de la fertilización nitrogenada en invernaderos: estrategias de manejo y calidad de producto.



Francisco M. del Amor

Instituto Murciano de Investigación y
Desarrollo Agrario y Alimentario
Departamento de hortofruticultura

Gestión sostenible del N en agrosistemas
semiáridos mediterráneos.
Cartagena, 14-15 Junio 2016



**Optimización
de la
fertilización
nitrogenada en
invernaderos**



Cultivos sin suelo

Maximización
tecnológica

Máximo
rendimiento



Cultivos en suelo

Producción
ecológica

Calidad
diferenciada

Optimización de la fertilización nitrogenada en invernaderos

Cultivos sin suelo

Carbgrowth
Gestión de la fertilización N
(Acuaponía)

Gestión de la fertilización N
(CO₂)

Gestión de la fertilización N
(Fert. foliar)

Optimización de la fertilización nitrogenada en invernaderos

Cultivos en suelo

Estrategias de control de la
Fertilización lixiviación
(Estiércoles)

Estrategias de control de riego
(Frecuencias)



RUENA
Red de Unidades de Investigación
en Agricultura



Instituto Murciano de Investigación
y Desarrollo Agrario y Alimentario

Maximización de la producción de la horticultura de invernadero con aguas de mala calidad

FP7-SME-2011-BSG-285854



CarbGrowth

ENABLING WASTEWATER USAGE AND CO₂ RECOVERY FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE

- Increase crop net production and tolerance to salinity through CO₂ injection
 - Recover CO₂ for injection by photocatalysis
- Reuse wastewater from aquaculture facilities for irrigation purposes
 - Reduce the cost associated with water supply
 - Reduce discharge loses in irrigation systems
- Develop process control to optimise irrigation, CO₂ injection and greenhouse climate control



Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario



Consorcio Proyecto

Industrial Association
/Grouping of SMEs



MILAN
CHAMBER OF
COMMERCE

Italia



Francia



Rumanía



España

Small /
Medium
enterprise



España



Croacia

St. Andrew's Farm

Malta

Research
institutions



Coordinador



Malta



Inspiralia

España



Croacia

Problemas a solucionar

Agricultura:

- Alto consumo de agua.
 - 26% Europa / 80% Mediterráneo
- Degradación del suelo y salinización.
 - 20% superficie de regadío.
 - Na^+ & Cl
- Países mediterráneos estas pérdidas se estiman en **300-350 kg N**, 125-300 kg P y 3000-3500 m³ de agua por hectárea .
- En invernaderos del norte de Europa, alrededor de **120 Kg de N**, 20 Kg P y 700 m³ por ha y año
- Competencia de la horticultura no europea (menores costes).
 - Costes laborales >12%
 - Costes suministros >65%
 - Margen de beneficio <63% (2.5 to 0.9 €/m²)
 - Importaciones no-EU >20% en valor.



Acuicultura:

- Elevada cantidad de agua no reutilizada durante el proceso de producción.
 - 20% prod. Total peces.
 - 200-600 m³/kg peces generados
- Elevada cantidad de residuos orgánicos e inorgánicos
 - < 30% N y P** aprovechado



Subsistemas

1- Sistema de producción de plantas:
Tolerancia a estrés, CO₂, agua y los nutrientes (N)



2- Sistema de producción de peces (N)



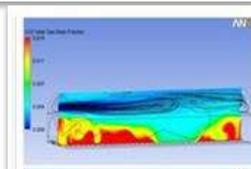
3- Sistema de fotocatálisis (CO₂)



4- Sistema de limpieza y confinamiento gases calefacción



5- Sistema de confinamiento de CO₂ en invernadero.



Soluciones a implementar

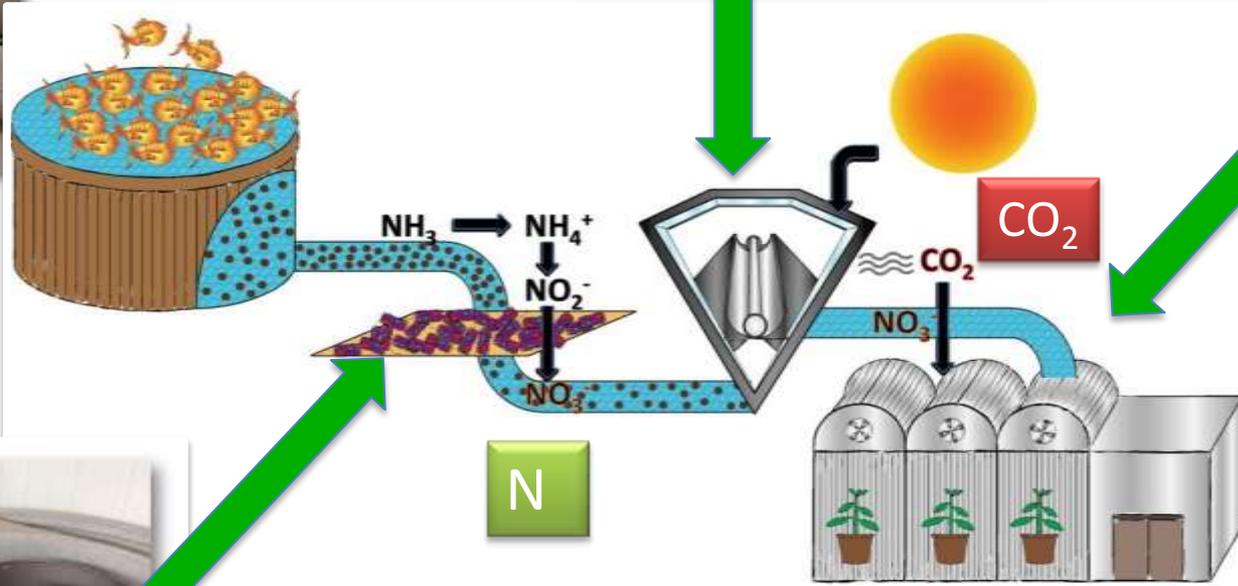
Catalytic Photoreaction

Gas exhaust treatment

Fish culture system

Recirculating Aquaculture Systems (RAS)

Injection from greenhouse heating systems



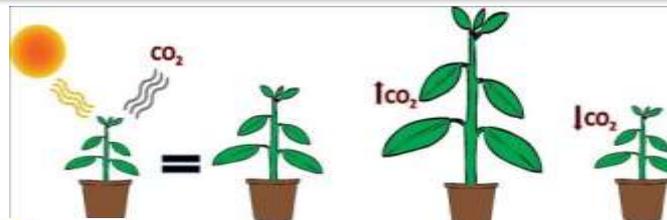
Gas exhaust treatment

Plant response characterisation

CO2 confinement



Bioreactor



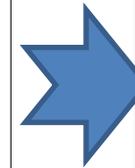
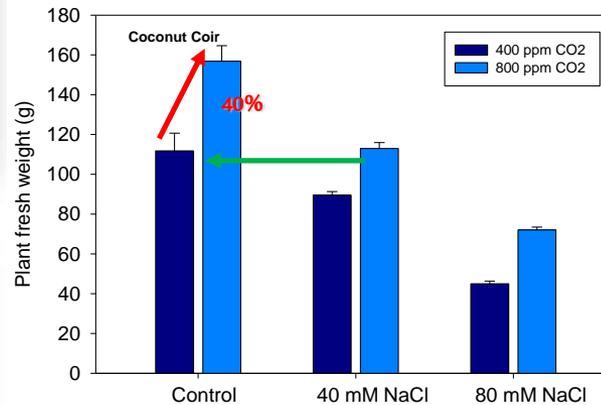
Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario



1- CarbGrowth: Sistema de producción plantas: tolerancia la estres, CO₂, agua y nutrientes (N).



Estudio de la fisiología en la respuesta de los cultivos de pimiento y tomate a diferentes condiciones de estrés, a elevado CO₂.



Yield

Agua de buena calidad: eCO₂ incrementa FW +40%

Agua mala calidad : eCO₂ mantiene FW a niveles similares a los del agua de buena calidad a concentración aCO₂.

Incremento [CO₂] puede proveer una estrategia eficaz para evitar las pérdidas producidas por agua de baja calidad en invernadero (pimiento y tomate).

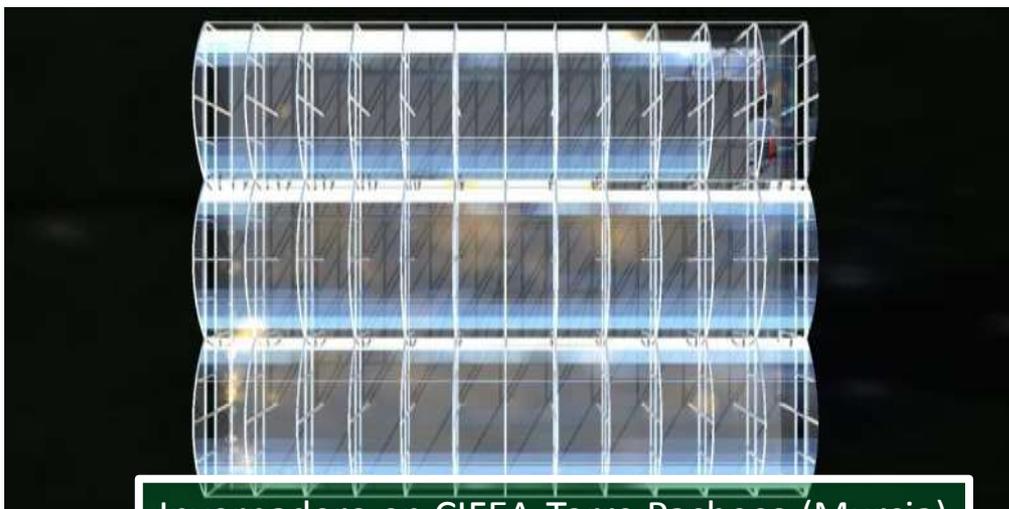
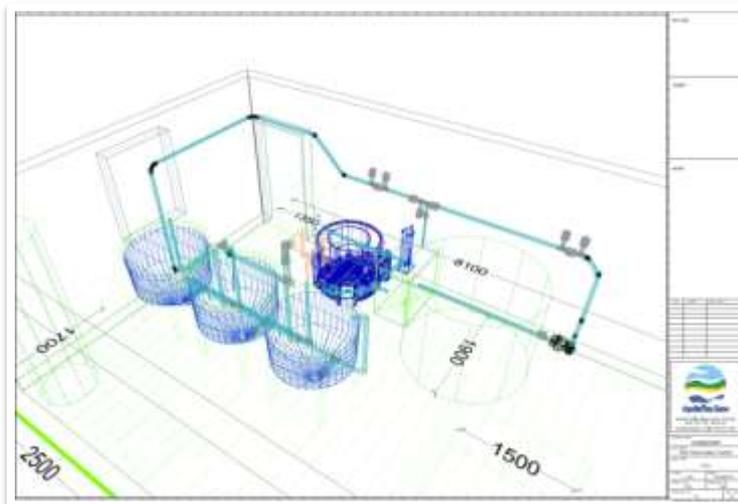
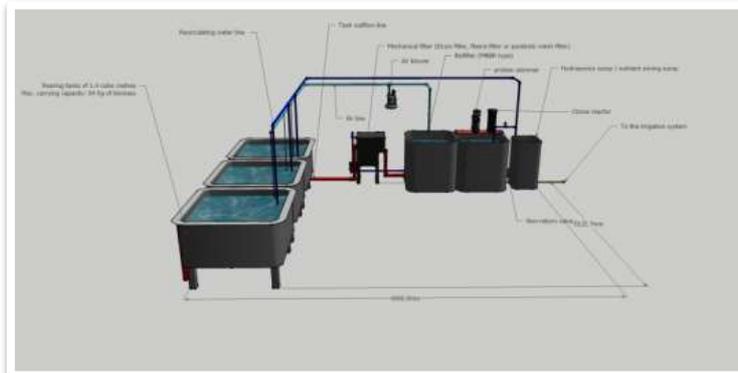


2- CarbGrowth: Sistema de acuaponía

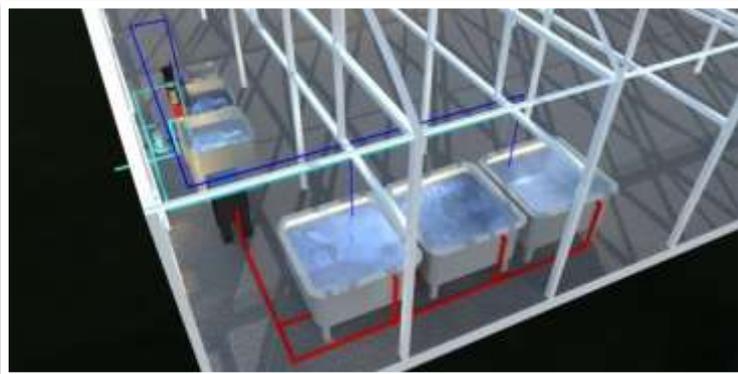
Recirculating Aquaculture Systems (RAS)

CarbGrowth's RAS sub-system dimensionado para proveer de nutrientes (N) y agua al cultivo hortícola y obtener peces como segunda cosecha.

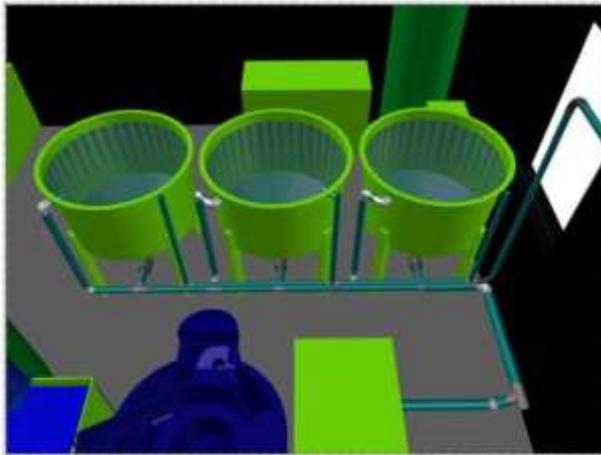
La selección de especies debe ser adaptada al sistema de producción de plantas así como a la tecnología disponible.



Invernadero en CIFEATorre Pacheco (Murcia)



CarbGrowth: Sistema Recirculación Acuapónico.



Tres tanques de con capacidad total de 3 m³ para crecimiento de peces

Heating system



Botella de O₂ para control de oxígeno disuelto (fallo eléctrico)



Filtración Mecánica



Bombas de recirculación y compresor de aire.



Tanque de compensación

Sistema de filtración biológica Conversión de amonio (tóxico para peces) en nitratos

CarbGrowth fish culture system

LA estrategia de producción está basada en:

1. Máxima capacidad de 20 kg de peces por cada m³ de agua.
2. Un peso de cosecha de tilapia de 400 gramos.
3. Ciclo de crecimiento de 135 días.



Excrementos de peces

Amoniaco

N asimilable cultivo

Nitratos

Nitrobacter

Nitritos

Nitrosomonas

Amonio



Tilapia



RUENA
Red de Unidades de Nutrición Ambiental



Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario

La tilapia:

- Rápido crecimiento.
- Tolerancia a rangos amplios de factores ambientales (temperatura, salinidad, bajo contenido en oxígeno disuelto, etc.).
- Resistencia al estrés y a las enfermedades, capacidad para reproducirse en cautividad y corto tiempo generacional.
- Alimentación de niveles tróficos inferiores y aceptación de dieta artificial inmediatamente después de la absorción del saco vitelino.



RAS- Condiciones de control

Oxígeno > 4 mg/l

Amoniaco < 2 mg/l

Nitritos < 10 mg/l

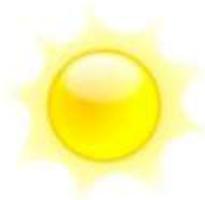
Nitratos < 100 to 500 mg/l

pH: 6.5

Temperature: 20-25°C

Optimización de la fertilización nitrogenada

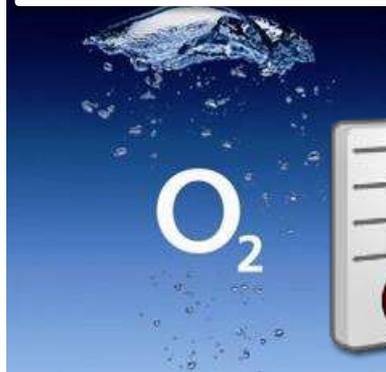
2- Sistema de producción de peces



O_2 disuelto inversamente proporcional a la temperatura agua



Tasa de crecimiento Tilapia directamente proporcional a la temperatura agua



Tª Agua



+ Crecimiento
+NO₃⁻

3- Sistema de fotocatálisis

- Tª
- (CO₂)
- **Desinfección sistema recirculación**

3- Carbgrowth Sistema de fotocatalisis



Light (UV)

Materia orgánica

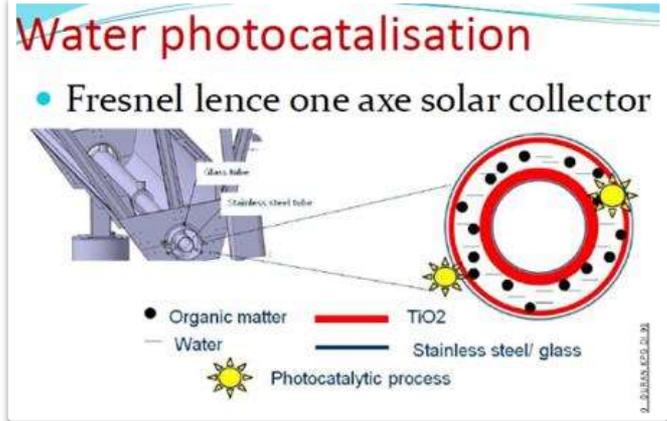
Photocatalytic system

CO₂

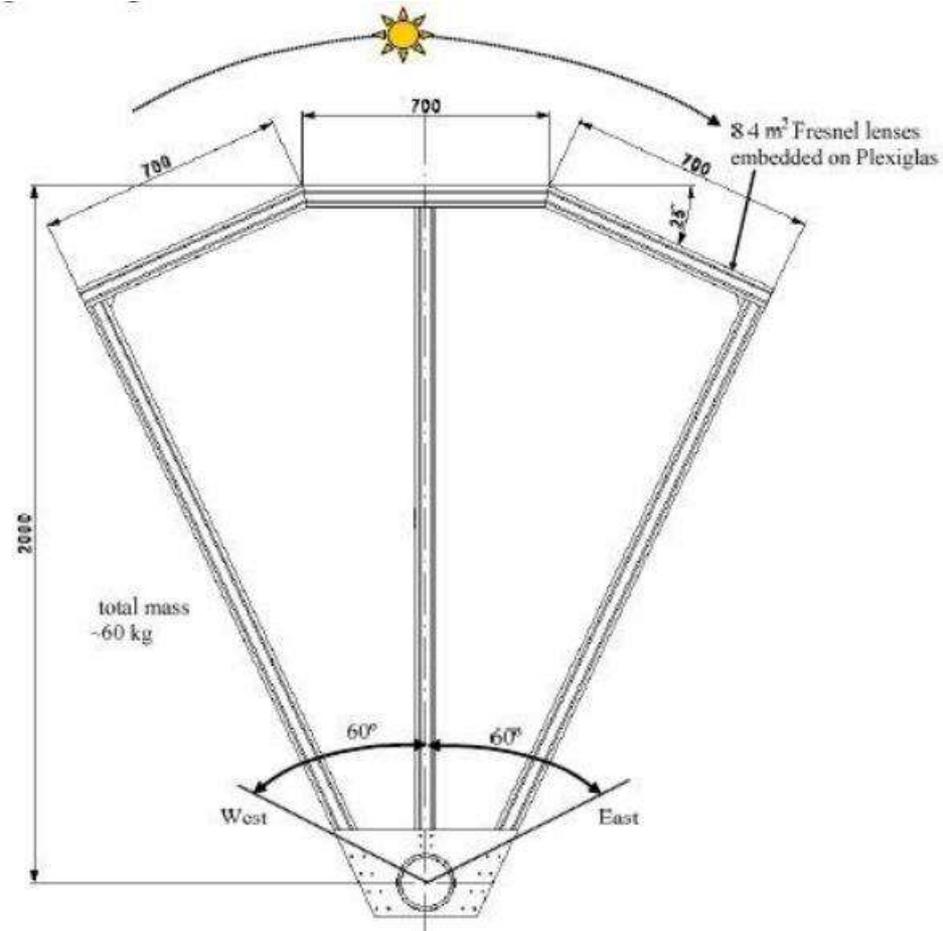
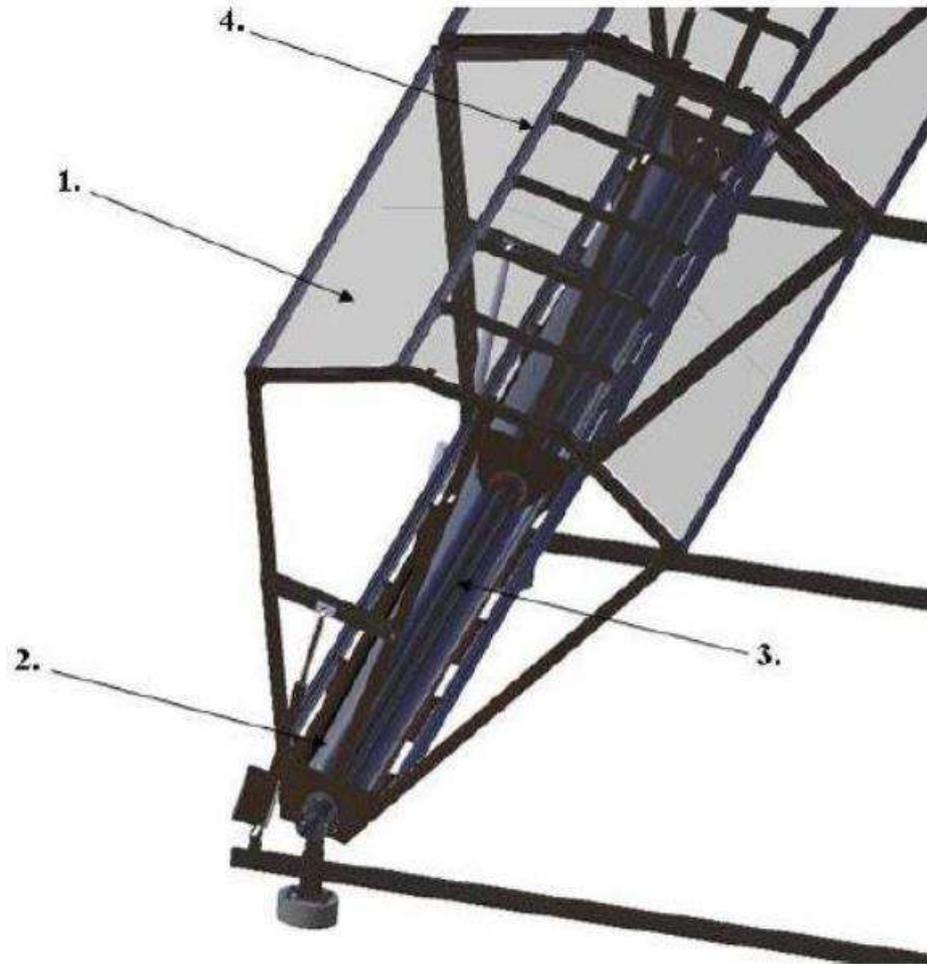


+ Desinfección
(recirculación de la disolución nutritiva)

+ Incremento de la temperatura del agua
(crecimiento tilapia)



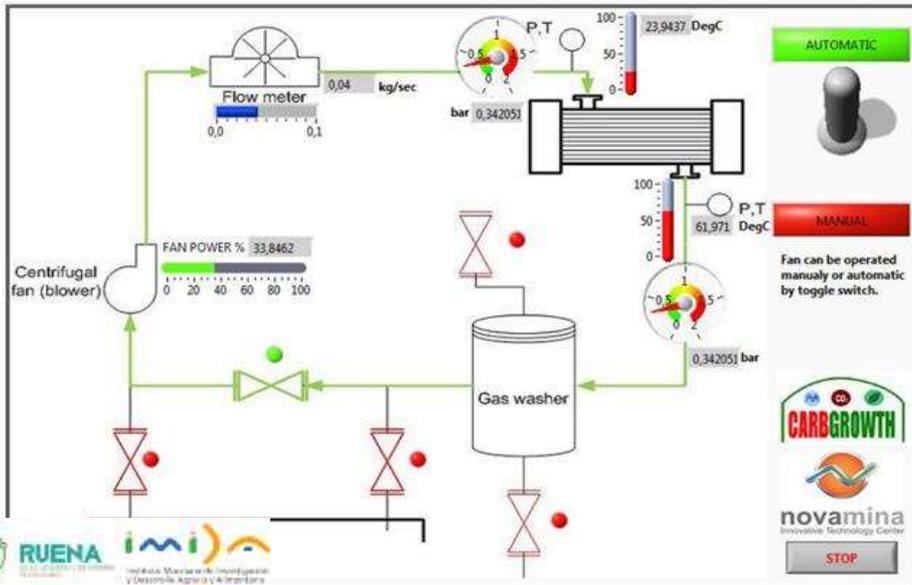
Lab scale photocatalyst prototype

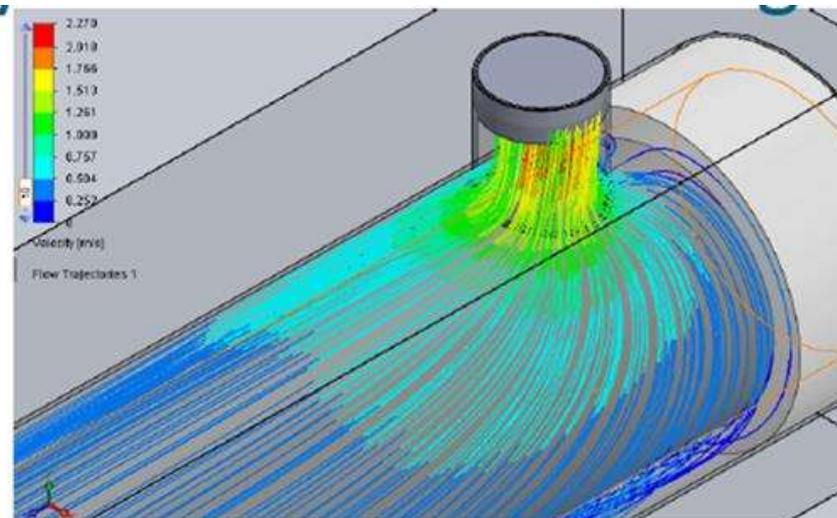
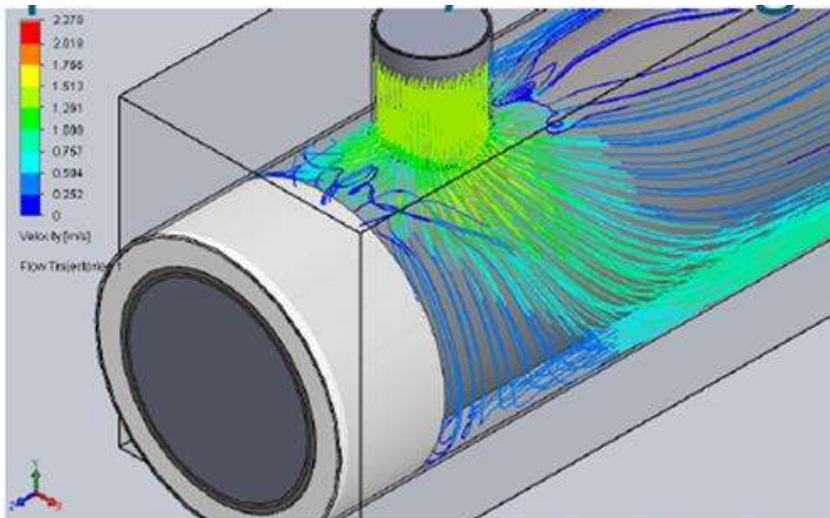


Fresnel lenses plates (1.), secondary mirrors (2.), Water photocatalisator (3.) and supportive frame (4.)



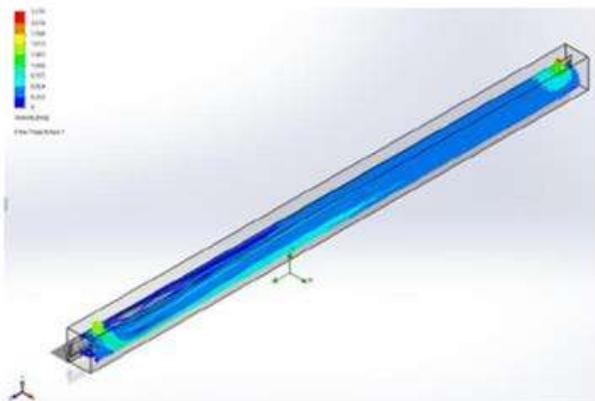
Labview control software





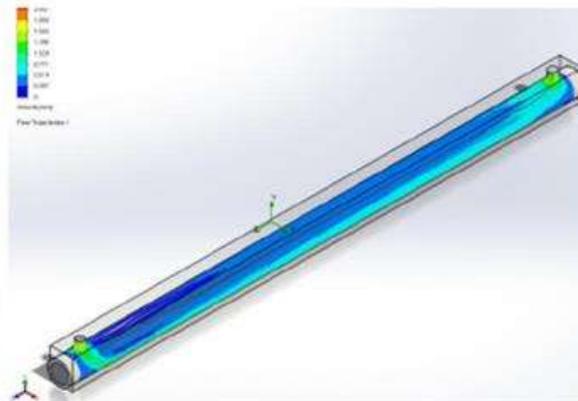
Computational Fluid Analysis (CFD) analysis:

- variable inner diameter of glass pipe



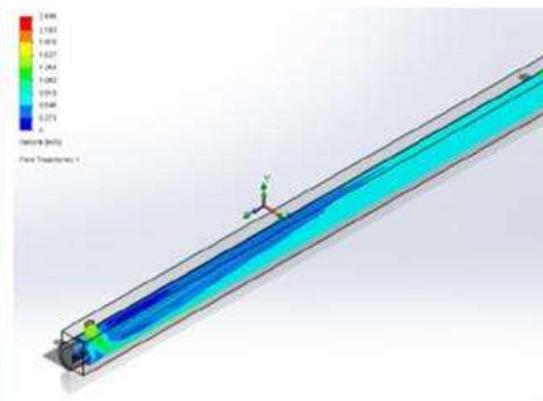
90mm

Avg. Speed = 0.47 m/s



88mm

Avg. Speed = 0.54 m/s



86mm

Avg. Speed = 0.63 m/s

Borosilicate glass tubes

Tube dip coating with TiO₂

- Coating speed from 10-35mm/min, (was 30mm/min)

- Process was repeated 6 times



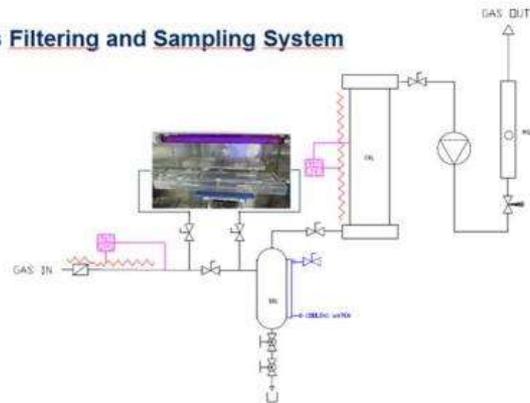
4- Gases de combustión caldera calefacción: Limpieza y confinamiento.

4a. Desarrollo de espumas para la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles (VOCs)

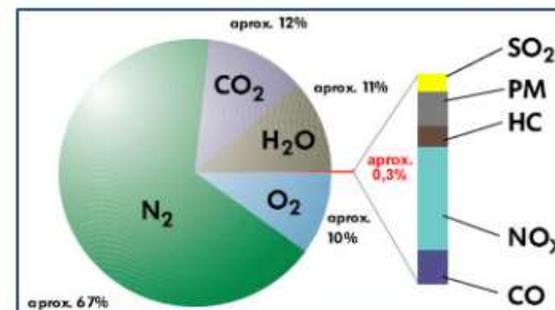
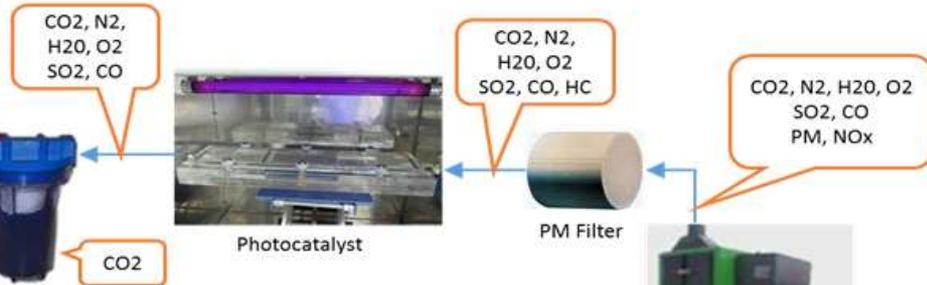
4b. Desarrollo de una espuma de absorción de CO2



Gas Filtering and Sampling System



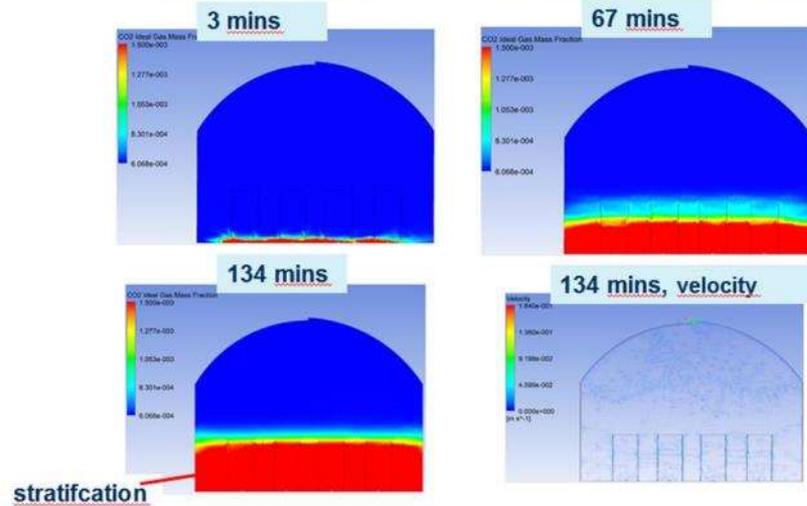
Integration with Carbrowth system



Inyección de CO2 del sistema de calefacción del invernadero.

5- Sistema de confinamiento de CO2 en el invernadero.

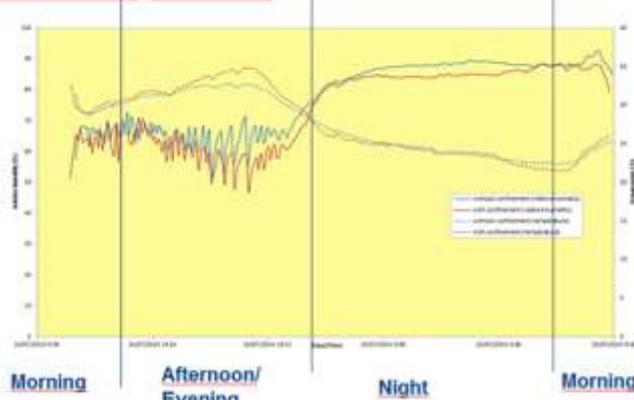
2D CFD simulations - CO2 distribution (transient)



El modelo en CFD fue capaz de predecir cuantitativamente la estratificación de CO₂ en el interior del invernadero



Measurements with improved CO2 confinement curtains



- Altura: 2.6m, longitud : 5m
- Polietileno transparente 250µm espesor. Estabilización UV.

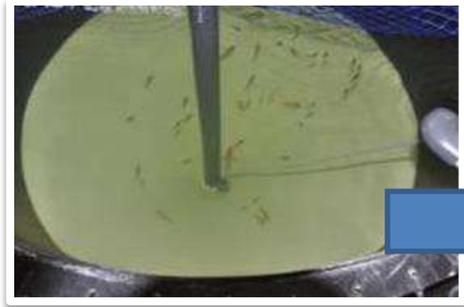
REGULACIÓN AGUA Y NUTRIENTES (N)



CULTIVO

Agua y nutrientes de los drenajes.

CE
pH
Nutrientes



Disolución del RAS(NO_3^-)



Unidad fertilización



2 X 5000 L Depósitos

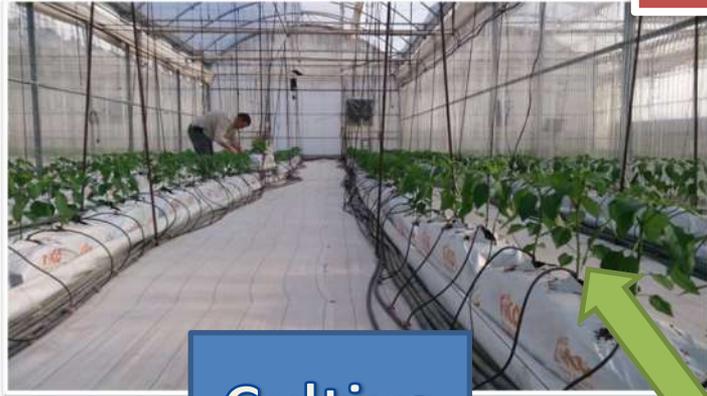


Agua de embalse/pozo

Agua de lluvia



REGULACIÓN CO₂



Cultivo



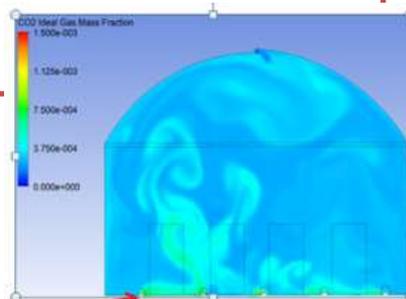
Fotocatálisis CO₂

Unidad control de clima



Condiciones ambientales

Temperatura
Humedad
CO₂



Sistema almacenamiento

Sistema de filtración gases



Caldera calefacción



Tanque criogénico



RUENA
Red de Unidades de Investigación
en Agricultura

imi
Instituto Murciano de Investigación
y Desarrollo Agrario y Alimentario

Gestión de la fertilización N (CO₂)



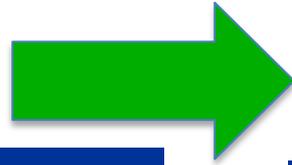
El Nitrógeno es un factor crítico en la respuesta del cultivo al incremento de CO₂



RUENA
Red de Unidades de Investigación
en Agricultura



Gestión de la fertilización N (CO_2)



Elevado CO_2

La respuesta de las plantas a elevado CO_2 , es muy dependiente de la fuente de N utilizada (Cruz et al., 1997)

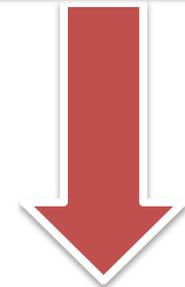
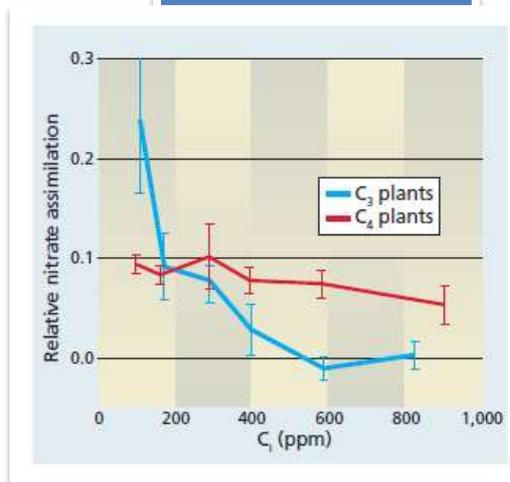
Reducción de la concentración de N en las plantas (Rubio et al., 2015)

Efectos adversos en plantas C3

C3 asimilación de NO_3^- depende de la fotorespiración

Formas de Nitrógeno

Aclimatación



Disminución de la concentración de proteína en frutos

Bloom AJ, Caldwell RM, Finazzo J, et al. 1989. Oxygen and carbon dioxide fluxes from barley shoots depend on nitrate assimilation. Plant Physiol 91:352–6.



RUENA
RED DE UNAS DE INVESTIGACIÓN EN AGRICULTURA

imi
Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario

La aclimatación al elevado CO₂ Hipótesis

a) Limitación en la demanda (sumidero) de carbohidratos.

De acuerdo con esta hipótesis, las plantas con enriquecimiento de CO₂ inicialmente asimilan más dióxido de carbono en carbohidratos de lo que pueden incorporar en sus tejidos en crecimiento. En respuesta, disminuyen la asimilación de dióxido de carbono mediante una disminución de los niveles de Rubisco (Long et al. 2004). Este cambio en los niveles de Rubisco puede resultar de la disminución general en proteínas y en las concentraciones de nitrógeno

b) Limitación progresiva de nitrógeno.

Otra hipótesis para dar respuesta a la aclimatación es la reducción en la concentración de nitrógeno que se produce en las hojas cuando su absorción por las raíces no consigue abastecer al tallo al mismo ritmo que la acumulación de carbohidratos .

c) Inhibición de la fotorrespiración.

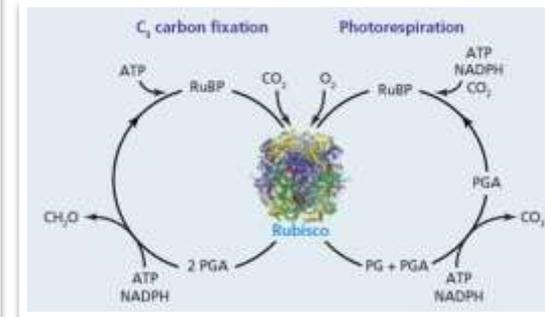
La asimilación de nitrato en compuestos orgánicos nitrogenados depende de la fotorrespiración. $>CO_2 \rightarrow <O_2$

Mecanismos implicados en la dependencia de la asimilación de NO_3^- de la fotorrespiración

1º El primer paso de la asimilación de nitrato es nitrato \rightarrow nitrito, en el que interviene un compuesto NADH y en el cual la *fotorrespiración incrementa* la disponibilidad de este compuesto. (Igamberdiev *et al.* 2001)

2º El siguiente paso de la asimilación de nitrato es la conversión de nitrito a amonio, que tiene lugar en el cloroplasto, y el cual requiere el transporte de nitrito hacia el interior del cloroplasto. *Elevado CO_2 inhibe este transporte* (Bloom *et al.* 2002).

3º El siguiente paso requiere de la energía de la oxidación de Ferredoxina , y otros procesos en los que se encuentran la asimilación de CO_2 *también dependen de la misma fuente de energía*, parece ser prioritaria. Algunos estudios indican que Ferredoxina está solo involucrada en la asimilación de nitrato cuando el CO_2 limita la fotosíntesis en plantas C_3 . (Backhausen *et al.* 2000)

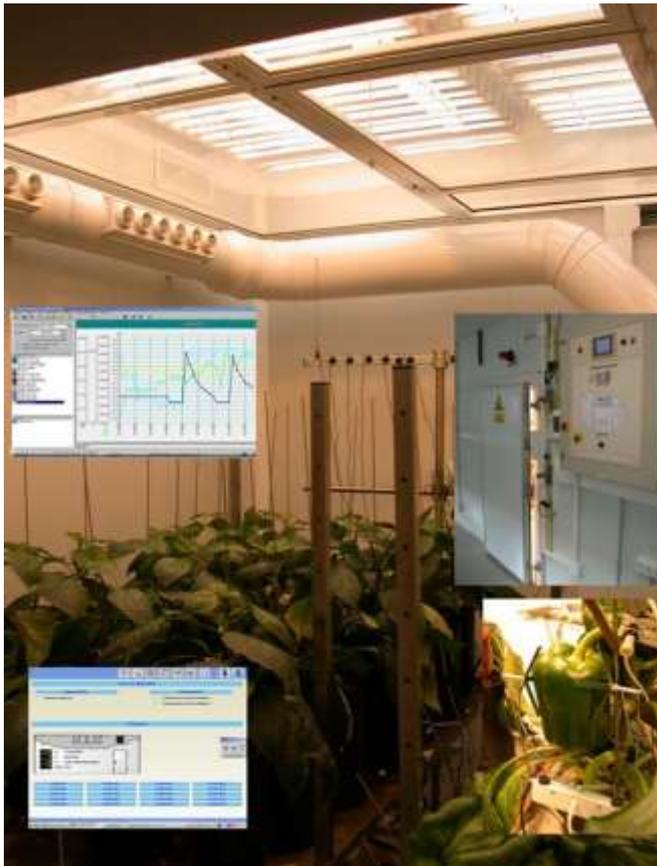


Bloom, 2009

Gestión de la fertilización

N (CO₂)





Enriquecimiento de CO₂:

400 ppm ([CO₂] ambiental)

800 ppm ([CO₂] elevado)

▶ **N (100% NO₃⁻)**

▶ **N (100% NO₃⁻ + Urea foliar)**

▶ **N (90% NO₃⁻ + 10% NH₄⁺)**

▶ **N (50% NO₃⁻ + 50% NH₄⁺)**

▶ **N (25% NO₃⁻ + 25% NH₄⁺)**

8 plantas/tratamiento
10 tratamientos

Aplicación de urea foliar

(15 g L⁻¹):

400 ppm CO₂



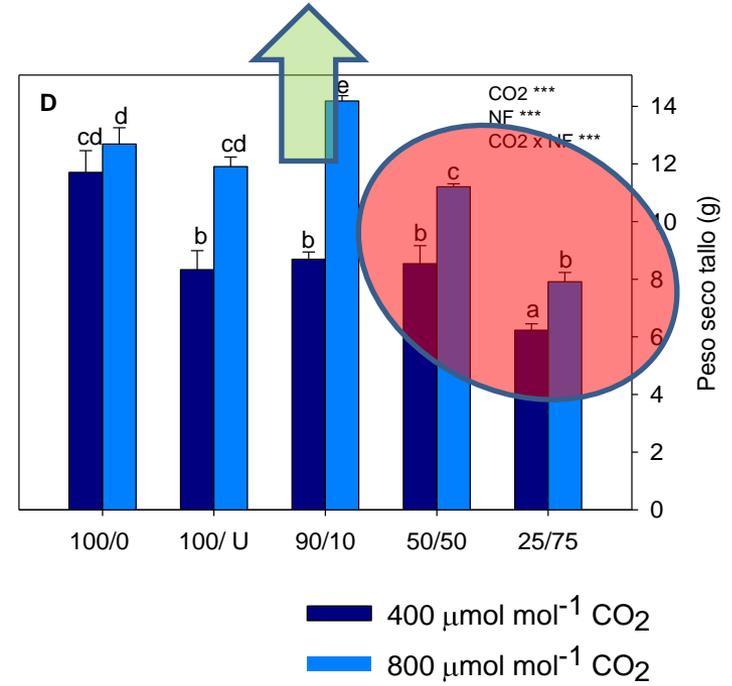
% NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	100/0	100/0 + Urea	90/10	50/50	25/75
---	-------	--------------------	-------	-------	-------

800 ppm CO₂



% NO ₃ ⁻ /NH ₄ ⁺	100/0	100/0 + Urea	90/10	50/50	25/75
---	-------	--------------------	-------	-------	-------

Experimento a 800 ppm



Aporte de NH_4^+ tiene un comportamiento diferencial según la concentración de CO_2 en el que crezcan las plantas

Gestión de la fertilización N (Fert. foliar)



Efecto de la fertilización foliar con urea para minimizar la contaminación por nitratos en pimiento



RUENA
RED DE UNIDADES DE INVESTIGACIÓN
EN AGRICULTURA



Instituto Murciano de Investigación
y Desarrollo Agrario y Alimentario

ANTECEDENTES



▪ Eibner (1985), La nutrición vía foliar resulta más económica que la fertilización al suelo, por las bajas cantidades de producto utilizado así como por su mayor aprovechamiento generando una menor contaminación en el suelo.

▪ La urea aplicada vía foliar puede suplir parte del N requerido para el mantenimiento del crecimiento. Nicoulaud y Bloom (1996).

▪ La urea es absorbida con la suficiente rapidez para compensar la falta de N y el inconveniente del suministrar N únicamente por vía foliar puede residir únicamente en la fototoxicidad de la urea y no a la deficiencia de N.

▪ Gooding y Davies (1992) también describieron el potencial de utilización de urea foliar en cereales incrementando la producción de los mismos mientras disminuyeron las pérdidas de nitrógeno debidas a la desnitrificación y lixiviación.

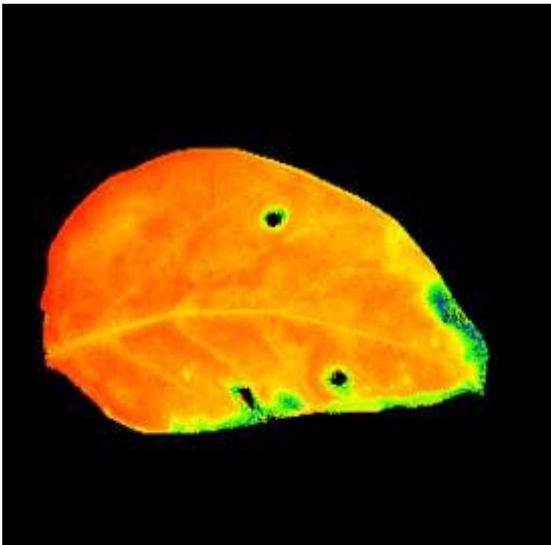
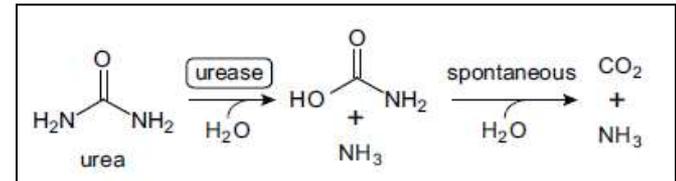
Gómez et al. (1994) observaron una respuesta muy satisfactoria de algunos cítricos a las aplicaciones foliares de nutrientes, como complemento a la del suelo. Anwar y Lovatt (1994) al aplicar urea a las hojas a una dosis de 0.16 kg de nitrógeno por árbol sobre naranja 'Washington Navel', encontraron que dichas aplicaciones incrementaron un 25% el número de frutos por árbol con relación al testigo durante tres años consecutivos, y el número de frutos

Inconvenientes

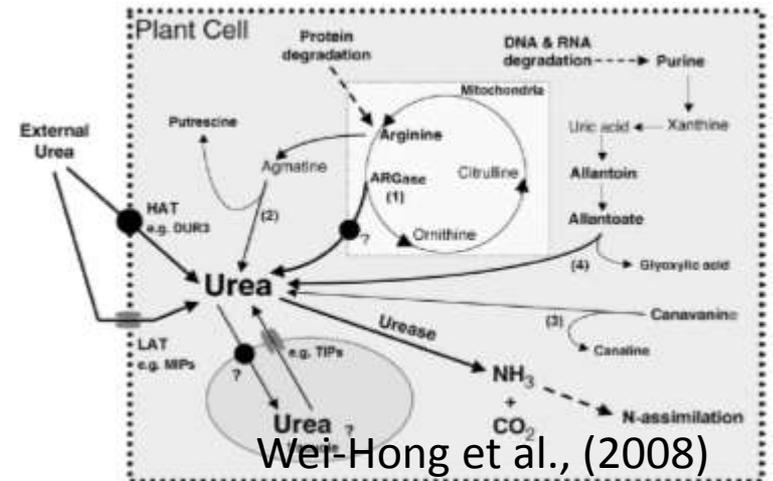
Volatilización

Toxicidad:
(Alta concentración/frecuencia).

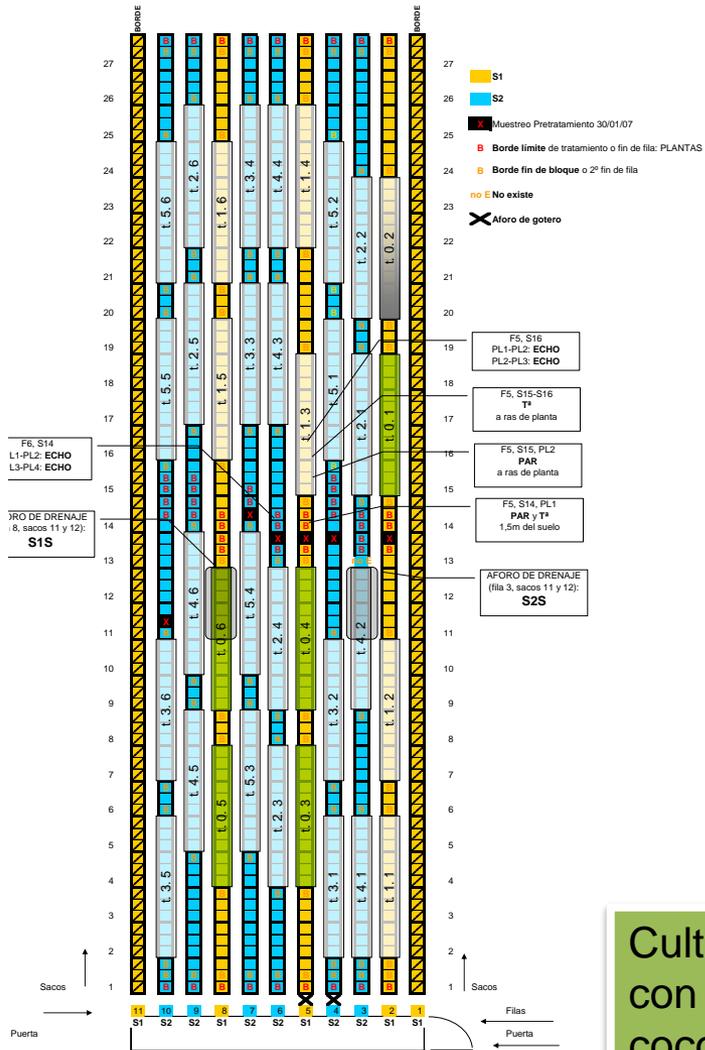
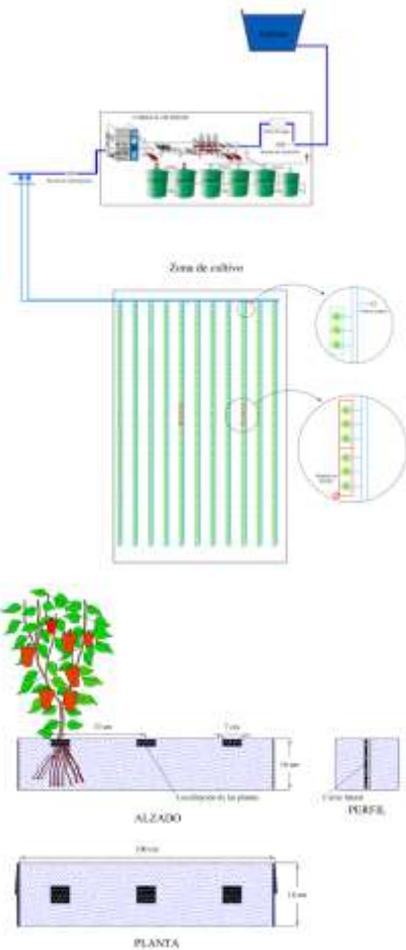
La ureasa cataliza la hidrólisis de urea a carbamato, → a amoníaco y bicarbonato



Toxicidad por urea en hojas de pimiento



Fertilización foliar



Cultivar: Herminio; 6 bloques al azar, con 4 sacos de sustrato (fibra de coco) por bloque
Urea foliar: 15 g l-1

Cultivar: Herminio; 6 bloques al azar, con 4 sacos de sustrato (coco) por bloque (72 plantas por tratamiento)

Urea foliar: 15 g l^{-1}

5 tratamientos:

CONTROL: T0: S1: 12 mM NO_3^-

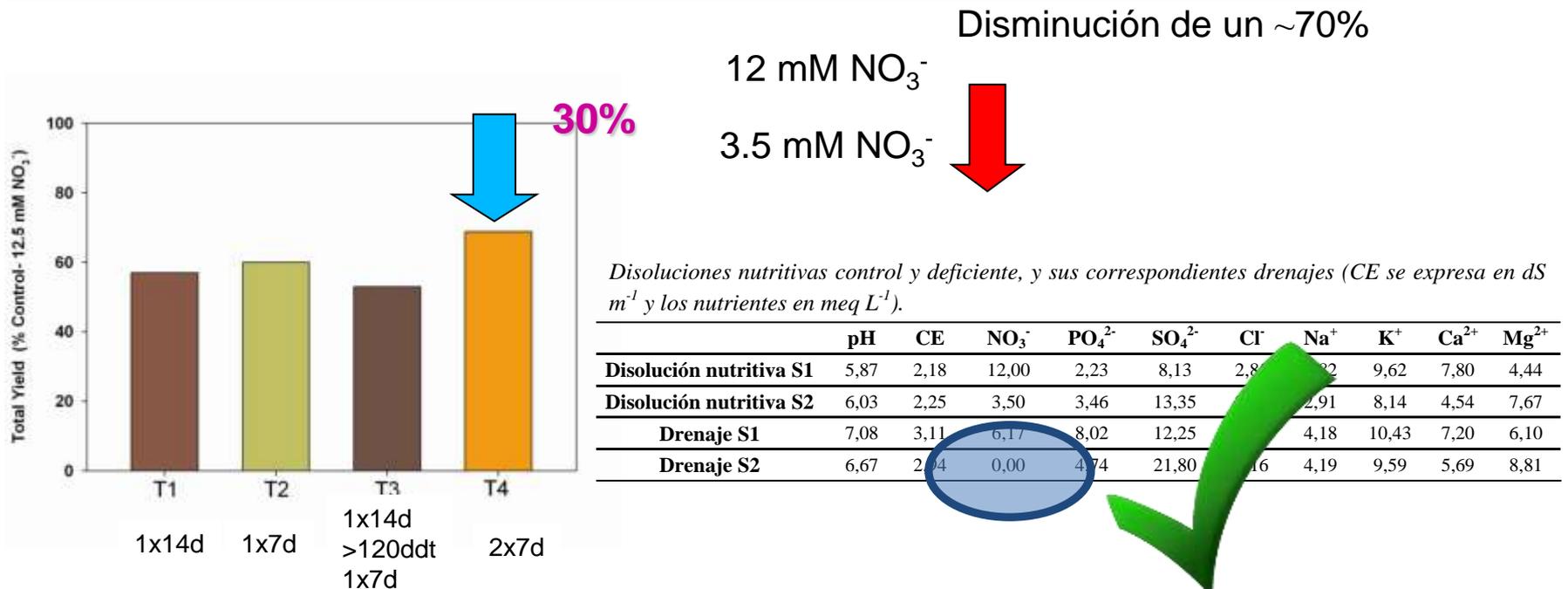
DEFICIENTES S2 (3.5 mM NO_3^-)

1 aplicación cada 2 semanas.

1 aplicación cada semana.

1 aplicación cada semana y >120 DDT 2 aplicaciones cada semana.

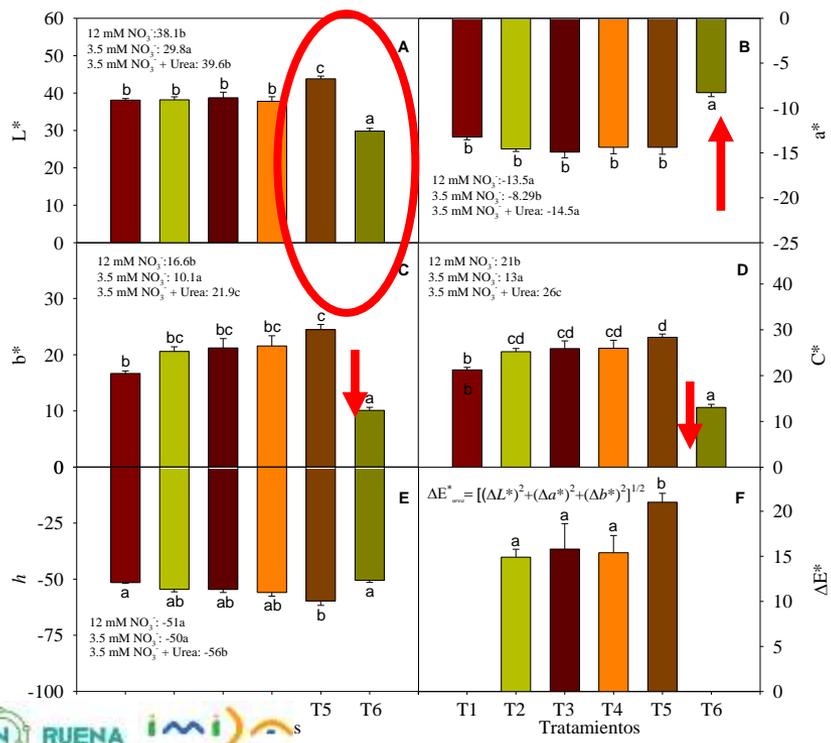
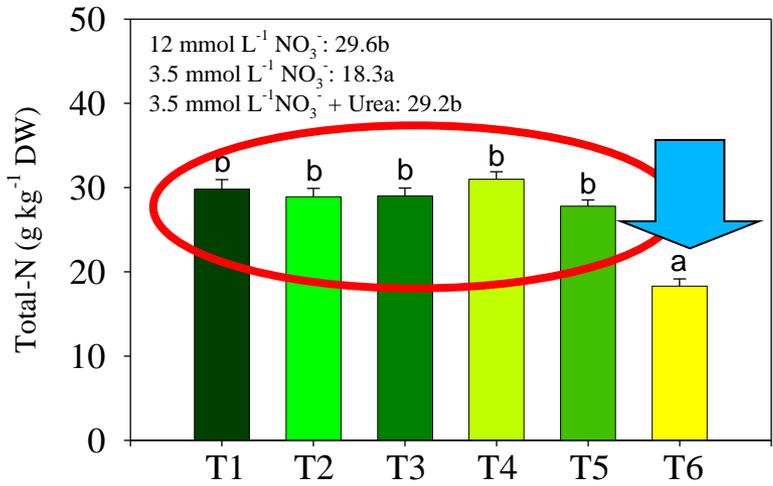
2 aplicaciones cada semana.



Concentración N en frutos

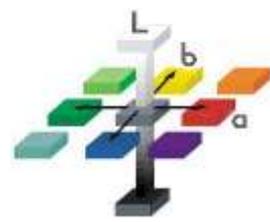
38%

En condiciones de suministro de N deficiente %N en los frutos descendió significativamente sin la aplicación de urea foliar

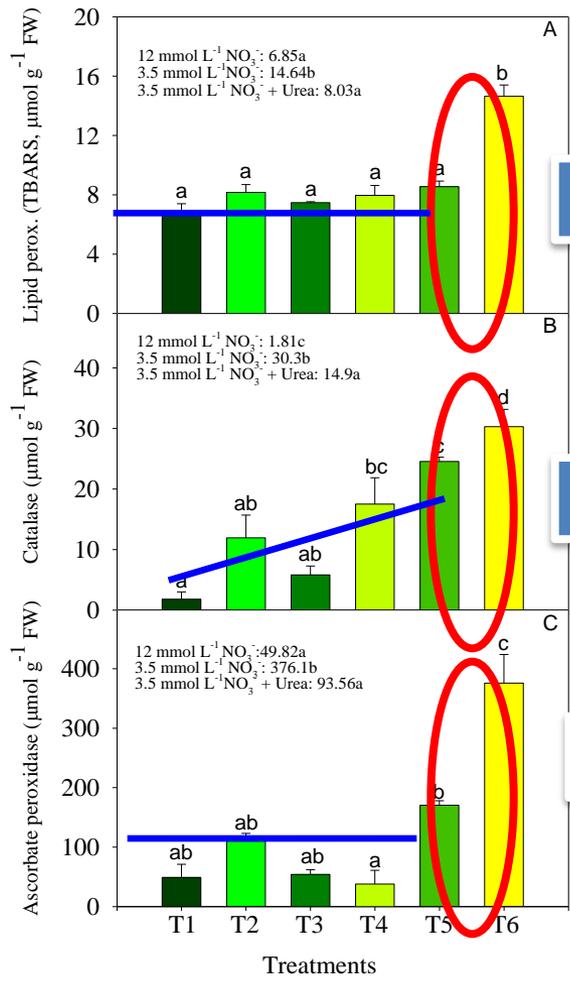


Influencia de la frecuencia de aplicación de urea foliar sobre los parámetros de color de los frutos de pimiento.

Cuando los frutos crecen con una solución baja de N, la aplicación de urea foliar afecta significativamente los parámetros L*, a*, b* y C* comparados con los tratamientos sin aplicación de urea



Fertilización foliar



Peroxidación lipídica

Catalasa

Ascorbato peroxidasa

El aumento en las actividades de las enzimas antioxidantes y las concentraciones de TBARS (peroxidación lipídica) de plantas deficientes en N implica estrés oxidativo, el cual se redujo por la aplicación foliar de urea

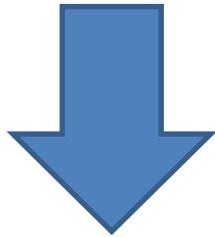
❑ En la horticultura sin suelo, los aportes de agua y nutrientes están asociados. Esto significa que cuando los agricultores aportan más agua, también aplicarán más nutrientes. Por lo tanto, para prevenir alguna escasez los agricultores usan cantidades en exceso de agua y nutrientes controlando la concentración total de sales más que la concentración individual de los nutrientes. Sin embargo, las demandas de agua y nutrientes de la planta no están asociadas (ej: un incremento de la humedad del aire no cambia sustancialmente la demanda de nitrógeno, pero disminuye el uso del agua).

❑ La urea foliar puede separar la demanda de N de la demanda de agua, optimizando el suplemento de agua y nutrientes en cualquier momento del ciclo del cultivo.

❑ Se necesitan más estudios para aclarar si esta técnica de fertilización puede ser optimizada por un seguimiento automático, con abono foliar aplicado en el invernadero (ej. Fog system).

❑ Estos sistemas pueden usar el N más eficientemente y al coste más bajo que aplicando el mayor nivel recomendado de otros fertilizantes nitrogenados a la solución nutritiva.

Fertilización foliar:
Análisis del coste/beneficio



Optimización del producto
Mejora de la absorción
Mejora de la aplicación
(Frecuencia y concentración)

Relativa disminución de
la producción

Beneficio medioambiental
al reducir muy
significativamente la
contaminación.



Optimización de la fertilización nitrogenada en invernaderos

Cultivos en suelo

Estrategias de control de la
Fertilización lixiviación
(Estiércoles)

Estrategias control de riego
(Frecuencias)

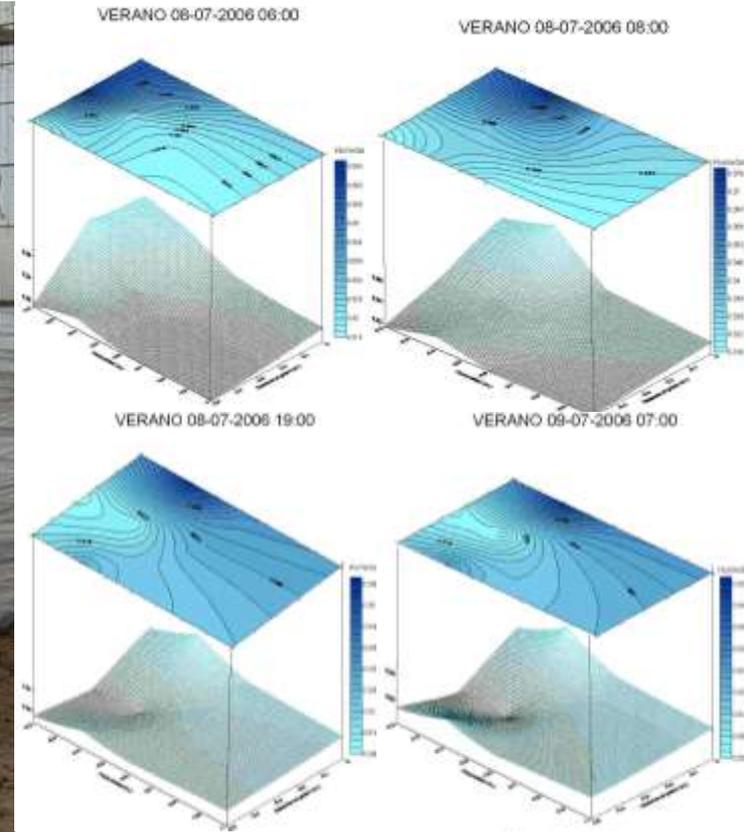


RUENA
Red de Unidades de Investigación
en Agricultura



Instituto Murciano de Investigación
y Desarrollo Agrario y Alimentario

Control de la lixiviación (Nitratos)



Manejo del cultivo - lixiviación (Nitratos)

Se estudiaron 6 tratamientos correspondientes a los tres tipos de estiércoles y tres tipos de aplicación vía gotero (sólo agua o con la adición de fertilización química).

- 8 Kg m⁻² 1er año + 4.5 kg m² y 3er año.
- Composición en peso seco (%):
 - **Oveja**: Materia orgánica (O.M.):73.8; N-total: 2.01; C/N: 21.13; P₂O₅: 1.04; K₂O: 3.78; CaO: 5.86; MgO: 1.52.
 - **Caballo**: O.M.:70.3; N-total: 1.77; C/N: 23.04; P₂O₅: 1.5; K₂O: 3.08; CaO: 7.18; MgO: 0.87.
 - **Gallinaza**: O.M.:57.4; N-total: 2.41; C/N: 13.82; P₂O₅: 3.24; K₂O: 3.57; CaO: 16.54; MgO: 1.52.
- **Fertilización química** : mmol L⁻¹: 4.2 NO₃⁻; 1.7 H₂PO₄⁻; 3.4 SO₄²⁻; 3.8 Ca²⁺; 1.2 K⁺; 2.0 Mg²⁺.
- **Todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de riego.**



Season and Treatment	Culture time (days)	Plant height (cm)	Total Leaf FW(g)	LA (m ² leaf)	Vegetative DM (g)	Yield (kg m ⁻²)
2006		<i>164</i>				
HF		106.00a	365.72b	1.215b	117.42b	6.18b
HW		114.50a	390.05b	1.300b	121.24b	5.18ab
PF		111.01a	334.90ab	1.115ab	108.91ab	5.78b
PW		106.75a	196.67a	0.667a	60.68a	5.63ab
SF		112.25a	313.30ab	1.050ab	90.96ab	4.54a
SW		114.25a	260.72ab	0.877ab	87.18ab	4.56a
2007		<i>178</i>				
HF		110.33a	523.17c	1.732c	206.54a	6.15ba
HW		120.00ab	203.90a	0.687a	145.51a	5.02a
PF		127.75bc	372.58b	1.245b	229.91a	5.55ab
PW		117.33a	299.92ab	1.007ab	166.52a	4.83
SF		131.00c	540.27c	1.792c	210.31a	6.13b
SW		111.66a	195.75a	0.660a	141.98a	4.90a
2008		<i>213</i>				
HF		139.50a	857.20b	2.810b	197.37b	7.07bc
HW		148.66b	432.62a	1.400a	105.99a	6.38ab
PF		151.00b	917.09b	3.000b	209.97b	7.84c
PW		153.07b	479.60a	1.712a	125.73a	6.18ab
SF		147.75b	986.20b	3.222b	224.50b	6.49ab
SW		148.24b	508.43a	1.685a	124.05a	5.56a
Main Effects						
Manure	H	122.21a	460.46a	1.525a	149.01a	6.39b
	P	126.54a	439.62a	1.457a	150.23a	6.36b
	S	127.45a	467.44a	1.547a	146.50a	5.76a
Chemical Fertilizer	No-added	124.55a	332.70a	1.111a	119.88a	5.36a
	Added.	126.28a	578.93b	1.908b	177.32b	6.19b



H: Caballo
P: Gallinaza
S: Oveja
F: fertilización química.
W: Sólo adición de agua.

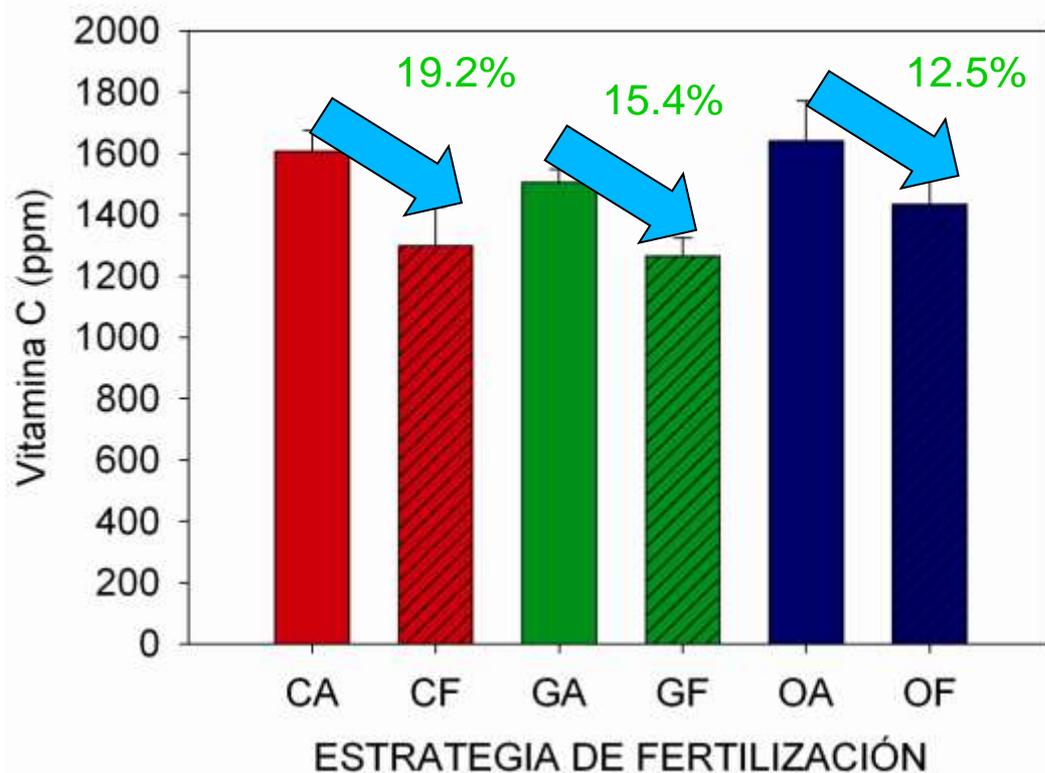


13.4% disminución producción

32.7% disminución vegetativo

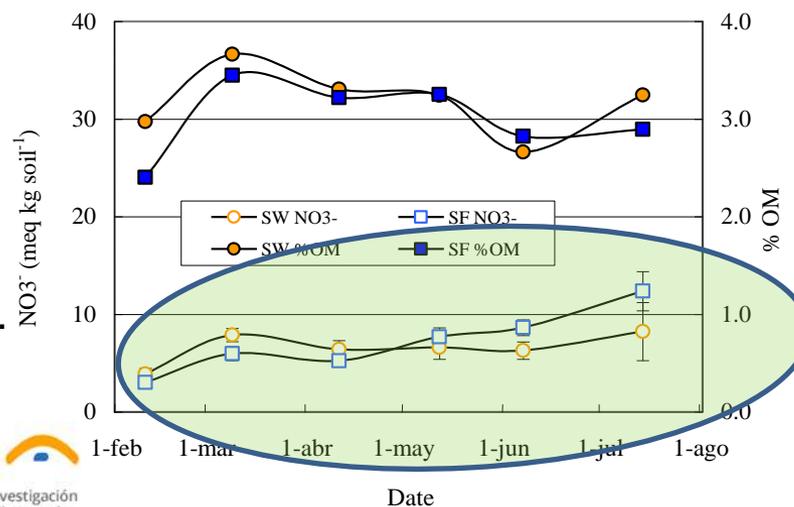
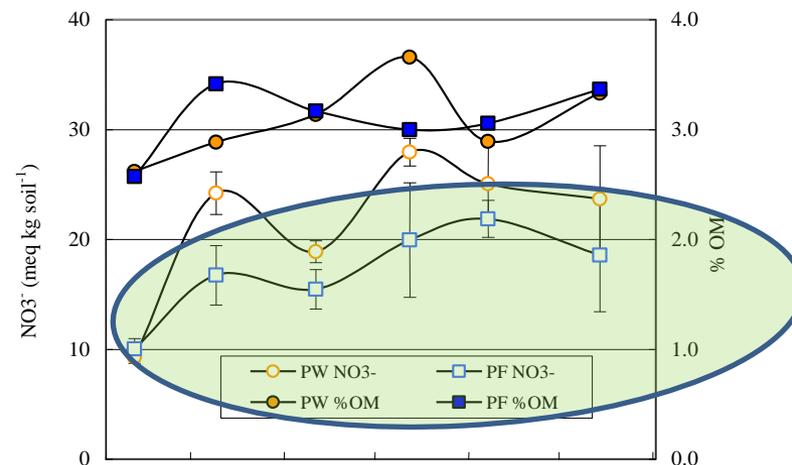
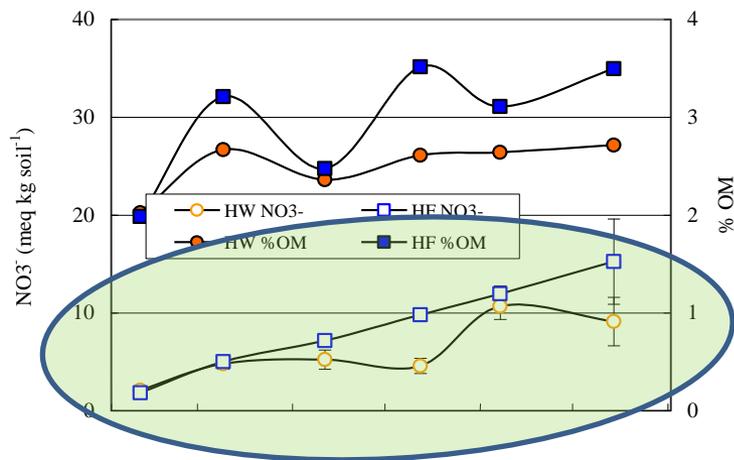
H: horse; P: poultry; S: sheep; F: with additional fertigation; W: only with water

CALIDAD de los frutos (Contenido en vitamina C)



H: Caballo
P: Gallinaza
S: Oveja
F: fertilización química.
W: Sólo adición de agua.

EVOLUCIÓN NITRATOS EN SUELO



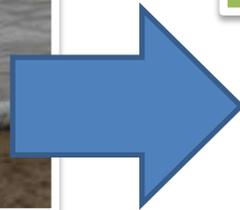
H: Caballo
 P: Gallinaza
 S: Oveja
 F: fertilización química.
 W: Sólo adición de agua.



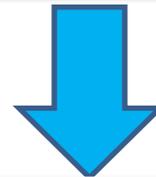
La fertilización química adicional al cultivo de pimiento de invernadero supone:

Aumento significativo en el potencial de lixiviación de nitratos

Leve aumento marginal en la producción obtenida.



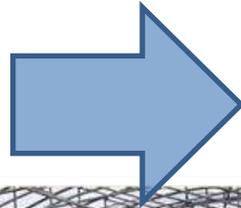
Solo la fertilización orgánica (Solarización)



Calidad (vit. C) calidad diferencial (Ecológico)

Estrategias de control de riego (Frecuencias)

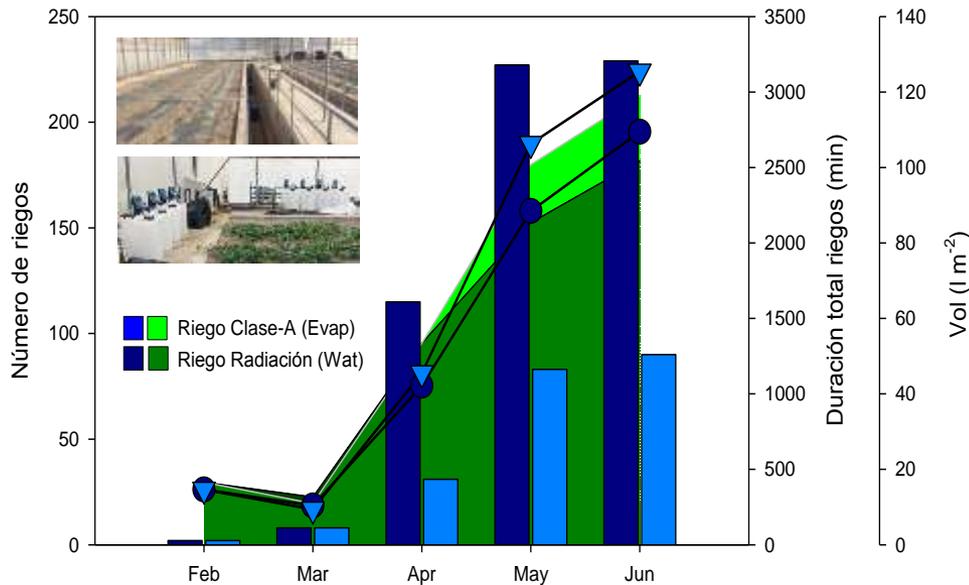
Ajuste de la frecuencia y volumen del riego



Limitar la lixiviación
 NO_3^-



Riego en dos sistemas de cultivo: ecológico e integrado



- Riego en función de evaporímetro clase A
- **Radiación acumulada** (1000, 900 o 800 Wm⁻²) correspondiente a cada periodo (40-55, 56-71 y 72-124 DDT- días después del trasplante), con una duración de 8, 10 y 12 minutos, respectivamente)

8 lisímetros independientes 7.8m largo, 6.5m ancho y 0.9 m de profundidad.

Estrategias de riego de muy alta frecuencia y bajo caudal permiten un mayor control de lixiviados



Gracias por su atención