

ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN CULTIVOS HERBÁCEOS *mediante sensores remotos*

La incorporación de sensores remotos satelitales en la gestión agraria, en particular en los cultivos herbáceos extensivos, permite realizar un seguimiento preciso y a diferentes escalas de la evolución del crecimiento del cultivo y estimar finalmente su rendimiento, apoyando la toma de decisiones de manejo.

ELISABET CARPINTERO GARCÍA^{1,2}, PEDRO J. GÓMEZ GIRÁLDEZ^{1,3},
JOSEFINA C. SILLERO SÁNCHEZ DE PUERTA¹, MARÍA P. GONZÁLEZ DUGO¹

¹ IFAPA, Centro Alameda del Obispo, Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba

² Instituto de Agricultura Sostenible (IAS), CSIC, Alameda del Obispo s/n, 14004 Córdoba

³ Estación Biológica de Doñana, CSIC, C. Américo Vespucio s/n, 41092 Sevilla

En España, la superficie ocupada por cultivos herbáceos extensivos es de algo más de ocho millones de hectáreas, con casi el 70% de ellas ocupadas por cereales grano (cerca de 2,5 millones de ha de cebada, 2 millones de ha de trigo y 600.000 ha de otros cereales de invierno). Incorporar avances de la investigación agraria, como el uso de sensores remotos, en el asesoramiento técnico a los productores puede contribuir a mejorar su productividad e incrementar su sostenibilidad económica y ambiental. El seguimiento de cultivos mediante sensores remotos (también conocido como teledetección), puede proporcionar estimaciones regulares de producción de biomasa y de la cosecha final, siguiendo métodos no destructivos, adaptables a distintas escalas de seguimiento (desde parcela a comarca o región) y con un coste reducido, ya que se puede realizar usando imágenes distribuidas por la Agencia Espacial Europea de forma gratuita. Conocer la evolución de la biomasa de un cultivo es de gran utilidad para evaluar distintas prácticas de manejo en las parcelas agrícolas, como son la

aplicación de fertilizantes, el riego, o el uso de pesticidas. También sirve para cuantificar el impacto del calentamiento global en el desarrollo y la cosecha de cultivos, o discriminar genotipos óptimos en programas de mejora genética de variedades.

Modelo de estimación de producción en cultivos

Uno de los métodos más conocidos para estimar la producción de biomasa de los cultivos es el modelo de eficiencias de Monteith (1977), que relaciona la producción de materia seca o producción primaria neta con la radiación incidente, y la eficiencia de la vegetación para usar esta energía. La producción primaria neta (PPN) se estima según la ecuación representada en la **Figura 1**, donde FPAR es la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta, PAR es la radiación fotosintéticamente activa y ϵ es la eficiencia en el uso de la luz. Esta variable se emplea en el seguimiento de la productividad de un cultivo ofreciendo información durante la campaña sobre el crecimiento de su cubierta vegetal.

Una ventaja de este método es que

emplea parámetros que pueden ser obtenidos fácilmente mediante teledetección, estaciones meteorológicas y datos tabulados (**Figura 1**). Además, este modelo semi-empírico puede ser extrapolable a diferentes zonas y cultivos con ligeras adaptaciones. Su aplicación para estimar biomasa, combinada con la estimación de un índice de cosecha, se emplea para conocer la producción final de los cultivos.

- Estimación de PAR y FPAR

La estimación de PAR (radiación fotosintéticamente activa) se realiza a partir de los datos de radiación solar medida por las estaciones meteorológicas. Este dato de radiación solar se multiplica por un coeficiente de reducción de 0,48, valor derivado por Szeicz (1974) a partir de medidas realizadas por todo el mundo.

FPAR (fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta) se puede medir directamente en campo usando equipos como el cepatómetro. También se puede derivar del índice de vegetación NDVI (índice de vegetación de la diferencia normalizada) calculado a partir de imágenes de satélite o dron mediante una rela-

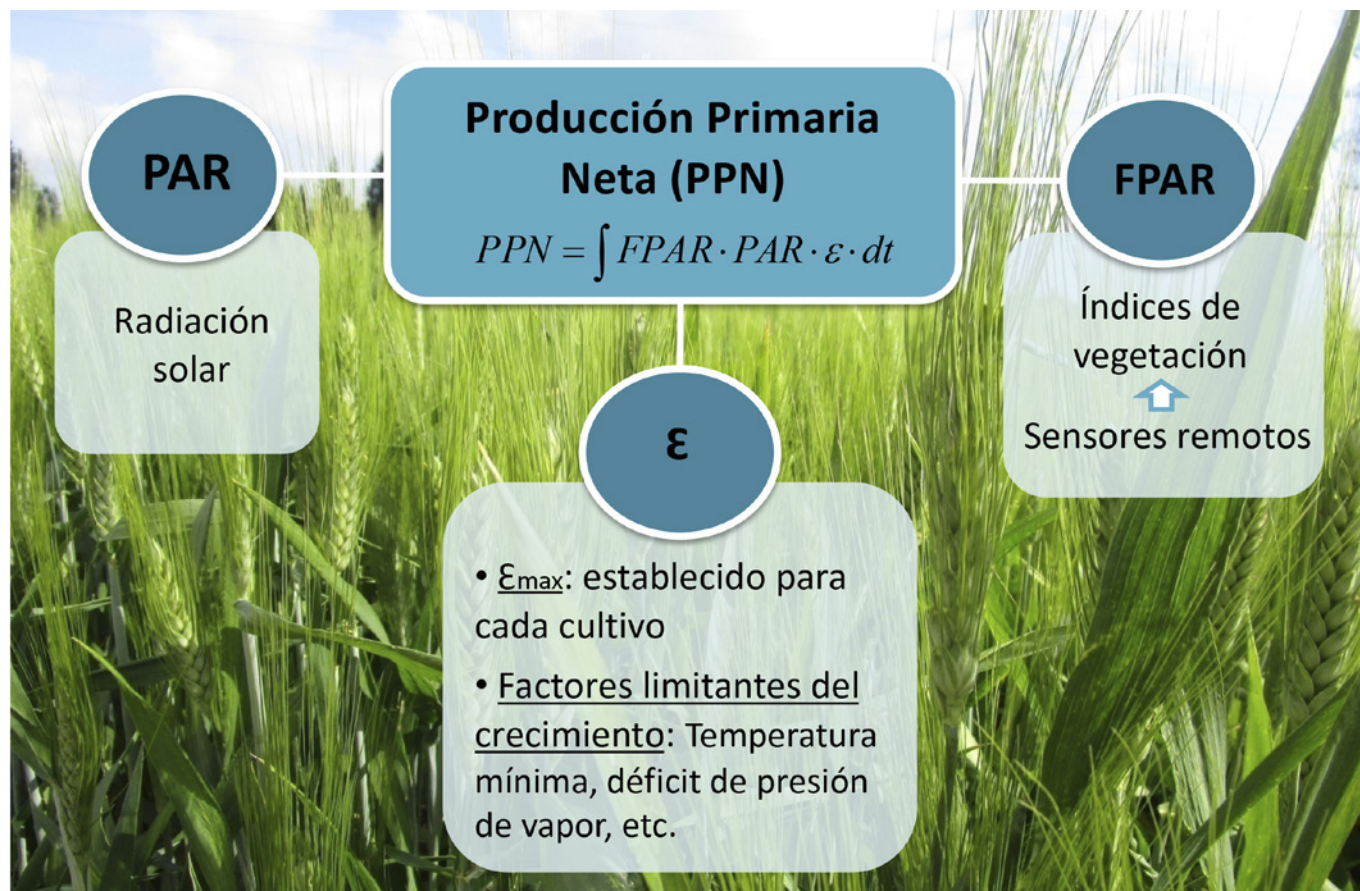


FIGURA 1
Esquema simplificado de la aplicación del modelo de estimación de biomasa.

ción lineal. Este índice, muy usado en teledetección, está relacionado con la fracción de suelo cubierto por la planta y con el vigor de la vegetación. Diversos autores han establecido relaciones empíricas para distintos cultivos. A pesar de la dependencia según el tipo de cultivo, Padilla (2011) estableció una ecuación validada para varios cultivos diferentes (maíz, ajo, y trigo) y que presentó un coeficiente de determinación de 0,92 en la relación NDVI – FPAR (ecuación 1):

$$FPAR = 1,14 \times NDVI - 0,15 \quad (1)$$

- Estimación de la eficiencia en el uso de la luz

La eficiencia en el uso de la luz (ε) es un parámetro que hace referencia a la capacidad de la planta de transformar la radiación solar en materia seca.

Existen varias aproximaciones para su cálculo, una de las formulaciones más sencillas es la que recogen Running *et al.* (2000) en la ecuación 2:

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \times T_{min\ esc} \times DPV_{esc} \quad (2)$$

En esta ecuación se establece un valor máximo de ε (ε_{max}), determinado por el tipo de cultivo (se aportan valores tipo en la **Figura 2**), que se ve modificado por variables ambientales que reducen la eficiencia de la planta. Entre los factores que pueden limitar el crecimiento se encuentran, por ejemplo, una temperatura del aire muy baja o un déficit de agua en el suelo que provoque estrés hídrico. La formulación aquí propuesta se basa únicamente en dos variables meteorológicas sencillas de obtener, como son la temperatura mínima (T_{min}) y el déficit de presión

de vapor (DPV). Para su aplicación se calculan unos valores escalares ($T_{min\ esc}$ y DPV_{esc}) mediante funciones lineales entre 0 y 1 usando los valores diarios de T_{min} y DPV.

Obtención de datos de entrada del modelo

Los datos de entrada necesarios para la aplicación de este método de estimación de biomasa se recogen en la **Figura 2**. Los sensores remotos (en satélites o aeroportados) necesarios para aplicar esta metodología deben contar con bandas en las regiones del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, que permitan calcular el índice NDVI. Algunos de los satélites más utilizados son: las misiones Landsat (Landsat- 8 y 9), Sentinel-2A y 2B (2C próximamente), o MODIS (Aqua y Terra). El uso de un

satélite determinado o un dron dependerá de la escala o nivel de detalle y del tamaño de la zona de cultivo a la que aplicar esta metodología. Además, son necesarios datos diarios de las siguientes variables meteorológicas:

radiación solar, temperatura mínima, y déficit de presión de vapor. En caso de no disponer de esta última variable, podrá calcularse a partir de los valores máximos y mínimos de humedad relativa. Algunas de las principales

redes disponibles que ofrecen esta información son las estaciones terrestres operadas por la Agencia Española de Meteorología (AEMET), o la Red de estaciones del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). También se pueden obtener a escala global de datos de reanálisis meteorológico proporcionados por agencias internacionales. Finalmente se necesitan valores máximos de eficiencia en el uso de la luz, ϵ_{max} . Existen trabajos de investigación que han medido y publicado valores de la eficiencia en el uso de la luz para distintos cultivos obtenidos en todo el mundo. Algunos ejemplos se recogen en la tabla de la **Figura 2**.

Aplicación del modelo en un ensayo de fertilización en trigo

- Parcelas de ensayo

Se llevó a cabo un ensayo experimental durante la campaña 2017/18 realizado en una finca cerealista situada en Santaella, en la campiña sur cordobesa. Se hizo un diseño de subparcelas con diferentes dosis de fertilización nitrogenada y tamaño suficiente para permitir su seguimiento usando imágenes del satélite Sentinel-2 (resolución espacial de 10 m).

La siembra se realizó con la variedad Amilcar de trigo duro. La parcela de

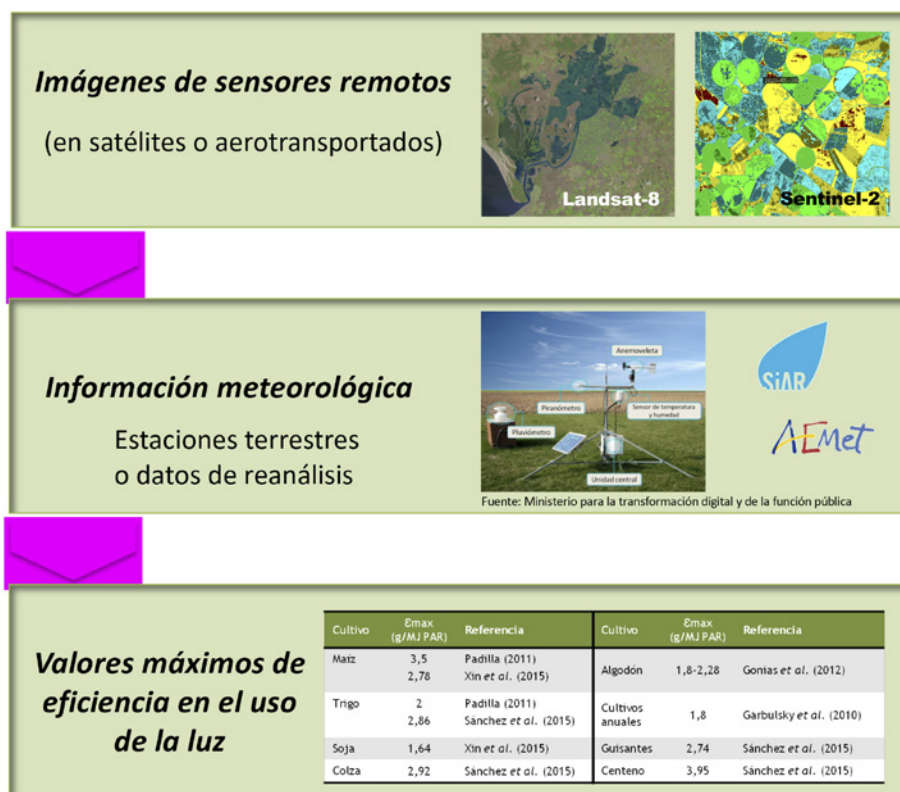


FIGURA 2
Datos de entrada del modelo de estimación de biomasa de Monteith.

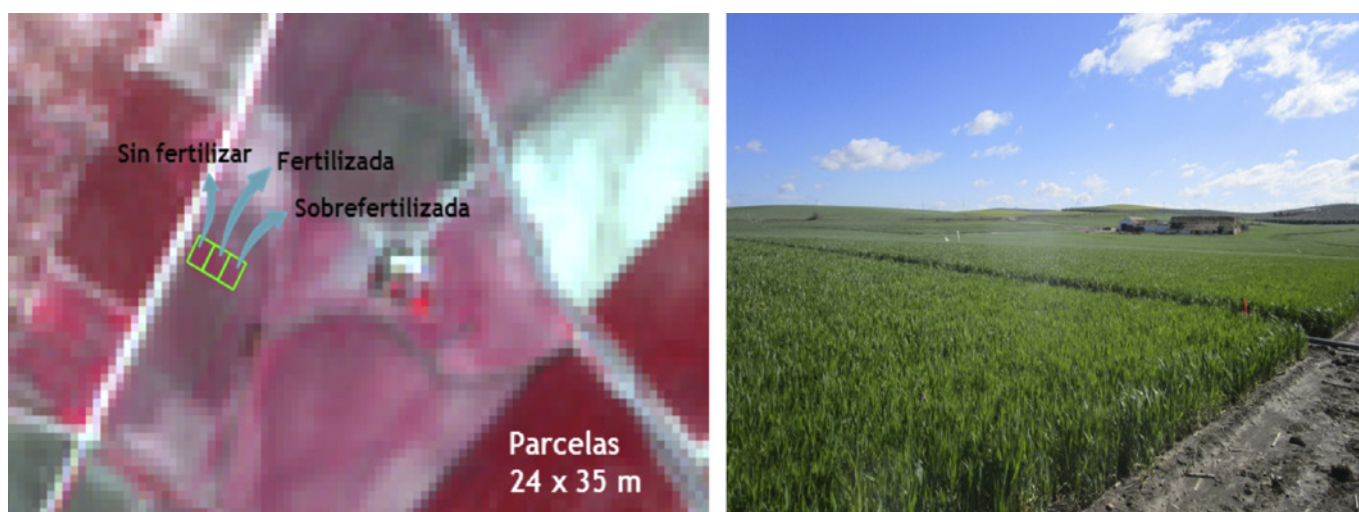


FIGURA 3
Izquierda: Composición en falso color de la imagen de Sentinel-2 (22/01/18), y localización de las subparcelas experimentales. Derecha: Fotografía de las parcelas a final de encañado (05/03/2018).

ensayo se dividió en 3 subparcelas de 24 x 35 m (**Figura 3**), donde se aplicaron abonados nitrogenados con diferentes dosis (**Tabla 1**): una parcela sin abonado nitrogenado de cobertera, otra con una dosis de abonado similar a la utilizada por los agricultores de la zona y una tercera con un abonado sobredimensionado, casi doble del recomendado.

- Evolución de biomasa diaria y

acumulada a lo largo del ciclo del cultivo

Se descargaron todas las imágenes disponibles del satélite Sentinel-2 durante el ciclo del cultivo, eliminando del análisis aquellas con presencia de nubes. Se utilizaron un total de 33 imágenes, y se aplicó el modelo de estimación de biomasa descrito a escala diaria. Los valores de NDVI entre fechas de imágenes fueron interpolados linealmente con el fin de obtener valores diarios. Los datos meteorológicos diarios fue-

TABLA 1

Diferentes abonados de cobertera aplicados

ABONADOS	1ª COBERTERA (23/01/2018)	2ª COBERTERA (22/03/2018)
Parcela 1 (sin fertilizar)	0 UFN	0 UFN
Parcela 2 (fertilizar)	90 UFN (225 Kg/ha, Nutrisol 40%)	45,9 UFN (170 Kg/ha, Nutrisol 27%)
Parcela 3 (sobrefertilizada)	140 UFN (350 Kg/ha, Nutrisol 40%)	94,5 UFN (350 Kg/ha, Nutrisol 27%)

ron proporcionados por la estación agroclimática de la RIA (Red de Información Agroclimática de Andalucía) en Santaella (Córdoba). Se utilizó un valor de $\epsilon_{max} = 2$ gr/MJ, estimado por Padilla (2011) en condiciones agroclimáticas similares.

El modelo estimó la evolución de la biomasa diaria para todas las subparcelas sometidas a los diferentes tratamientos de fertilización, así como la biomasa acumulada a lo largo del

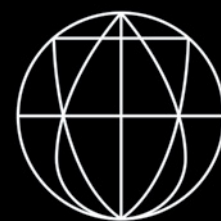
desarrollo del cultivo durante la campaña 2017/18 (**Figura 4**).

A partir de la estimación de la evolución de la producción primaria neta acumulada a lo largo del ciclo del cultivo, se puede apreciar que la producción de biomasa en la parcela sin fertilizar queda unos 1000 kg/ha por debajo en producción de las sí fertilizadas, mientras que en éstas el exceso de fertilización no supuso un incremento significativo en la producción total.

UNA PROMESA A FUTURO QUE COMIENZA HOY.

Fertiberia
TECH

NERGETIC COMPLETE



La línea de fertilizantes más completa y avanzada en eficiencia productiva.

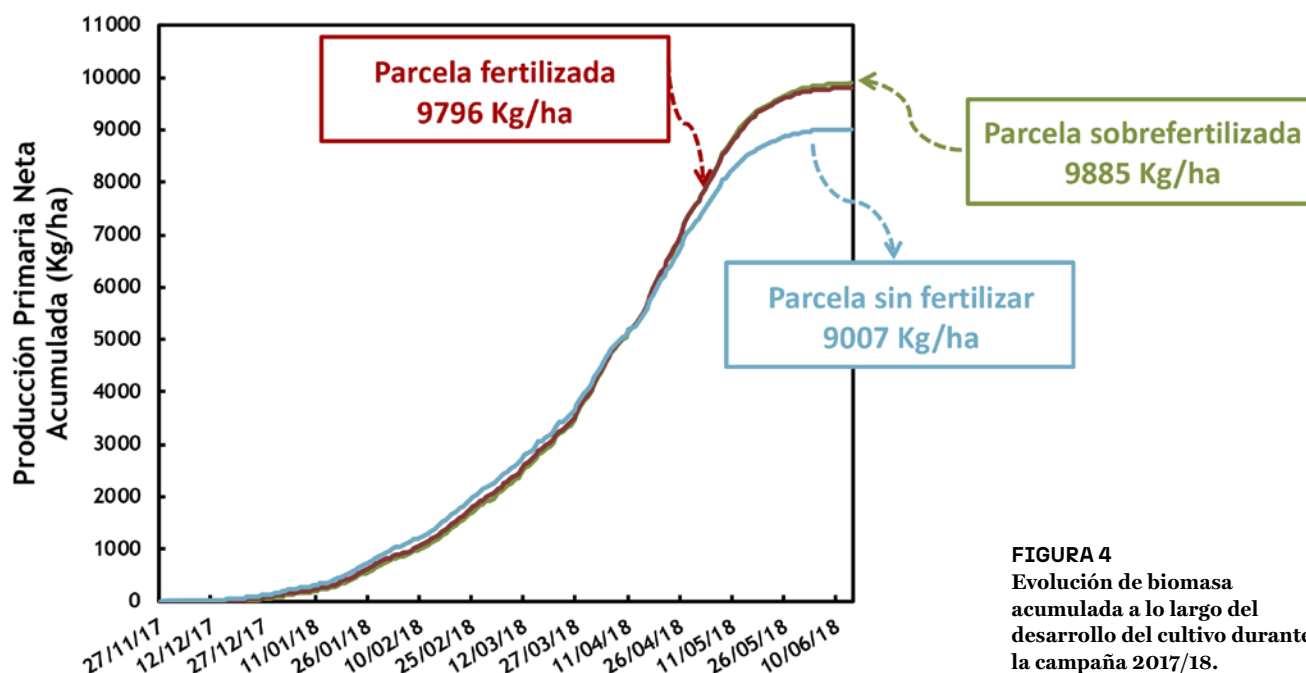


FIGURA 4
Evolución de biomasa acumulada a lo largo del desarrollo del cultivo durante la campaña 2017/18.

Conclusiones

Este artículo presenta una guía para la estimación de la producción de biomasa en una amplia variedad de cultivos herbáceos que puede ser empleado en distintas zonas y a diferentes escalas, haciendo especial hincapié en los cultivos extensivos más representativos de España.

Se han presentado las bases del modelo de eficiencia en el uso de la luz de Monteith, que relaciona la producción de materia seca con la radiación incidente, y la eficiencia de la vegetación para usar esta energía. Se han descrito los datos y parámetros de entrada necesarios para aplicar esta metodología, principalmente información procedente de teledetección y de estaciones meteorológicas. Asimismo, se han recogido las fuentes bibliográficas de los parámetros presentados para diferentes cultivos.

Finalmente, se ha mostrado un ejemplo de aplicación del modelo en varias parcelas de trigo duro sometidas a diferentes tratamientos de fertilización. La aplicación del modelo en este caso ha permitido

estimar la evolución de biomasa diaria y acumulada a lo largo del ciclo del cultivo, observándose diferencias significativas en la biomasa producida entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas, mientras que, en las parcelas con exceso de fertilización nitrogenada, este no ha supuesto ningún beneficio relevante.

Bibliografía

Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE). 2023. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin20231_tcm30-690544.pdf

Monteith, J. 1977. *Climate and efficiency of crop production in Britain*. Philos. Trans. R. Soc. of London, Ser B, 277-294.

Szeicz, G. 1974. *Solar radiation for plant growth*. J. Appl. Ecol., 11, 617-637

Padilla, F.L.M. 2011. *Integración de datos remotos en modelos de crecimiento y estimación de cosecha de cultivos herbáceos. Aplicación a escala local sobre trigo y maíz*. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba

Running, S.W., et al. 2000. *Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System*. Methods in Ecosystem Science. O. Sala, R. Jackson and H. Mooney. New York, Springer Verlag: 44-57.

Xin, Q., Broich, M., Suyker, A. E., Yu, L., Gong, P. 2015. *Multi-scale evaluation of light use efficiency in MODIS gross primary productivity for croplands in the Midwestern United States*. Agric. For. Meteorol., 201, 111-119.

Sánchez, M.L., Pardo, N., Pérez, I.A., García, M.A. 2015. *GPP and maximum light use efficiency estimates using different approaches over a rotating biodiesel crop*. Agric. For. Meteorol., 214, 444-455.

Gonias, E., Oosterhuis, D., Bibi A., Roberts, B. 2012. *Radiation Use Efficiency of Cotton in Contrasting Environments*. Am. J. Plant. Sci., Vol. 3 No. 5, 649-654.

Garbulsky, M.F. et al. 2010. *Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems*. Global Ecol. Biogeogr., 19, 253-267.