

## **Estimación del rendimiento de soja con datos de radiación solar de CERES**

Gustavo Ovando<sup>1</sup>, Silvina Sayago<sup>1</sup>, Fernando Salvagiotti<sup>2</sup> y Mónica Bocco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

<sup>2</sup> Estación Experimental Agropecuaria Oliveros -INTA. Santa Fe (Argentina).

**Resumen.** Los modelos de simulación de cultivos permiten representar su desarrollo y rendimiento, considerando además la aplicación de nuevas tecnologías o condiciones de manejo. Los datos provenientes de satélites como inputs en modelos resuelven el problema de faltantes o errores. El objetivo de este trabajo fue evaluar cambios en la estimación del rendimiento de soja con CROPGRO soybean, al considerar datos de radiación solar obtenidos de imágenes CERES. La aplicación se realizó para 6 campañas agrícolas en Oliveros (Santa Fe). Los resultados mostraron que el rendimiento estimado al utilizar la radiación solar de CERES es equivalente al obtenido a partir de la radiación registrada, cuando el porcentaje de sustitución de datos no supera el 30%, independientemente del año, fecha de siembra y grupo de madurez. Se observó que en el 45% de las campañas, que al reemplazar el 100% de los datos se obtienen valores menores al 3% del porcentaje de la raíz del error cuadrático medio.

**Palabras clave:** imágenes satelitales, DSSAT, soja, rendimiento.

### **1 Introducción**

Los modelos de cultivos simulan el desarrollo y rendimiento de los cultivos, así como estimar su crecimiento ante la aplicación de nuevas tecnologías o condiciones de manejo. Por estas razones, entre otras, los modelos son útiles en entornos dinámicos y rápidamente cambiantes como es la agricultura actual. Como se señala en [1], los modelos de cultivos permiten representar y evaluar las relaciones multidimensionales entre los factores que afectan a los cultivos. Estos factores incluyen fecha de siembra, selección de cultivares, tipo de suelo, estrategias de fertilización y riego y los patrones meteorológicos estacionales.

Existen numerosos modelos disponibles para estimar el crecimiento de los cultivos, entre otros podemos mencionar el Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) [2], el Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) [3] y el Soil, Water, Atmosphere, and Plant (SWAP) [4].

El sistema DSSAT incluye modelos para simular el desarrollo y rendimiento de un cultivo, ante diferentes prácticas de manejo, o disponibilidades de agua en el suelo considerando diferentes tipos de suelos, clima [5]. Entre estos modelos de cultivos, está el CROPGRO que modela leguminosas de grano, entre ellas soja (*Glycine max* L. Merr.), o el CERES para maíz (*Zea mays* L.).

Estos modelos de simulación de cultivos requieren información de radiación solar diaria, temperaturas (máximas y mínimas) y precipitación [6]. La radiación solar es una de las variables necesaria para las estimaciones, sin embargo estos datos no siempre están fácilmente disponibles ya sea porque en las bases de datos existen datos faltantes o que se encuentren fuera del rango esperado debido a fallas de equipo [7], [8]. En Argentina, se ha indicado que el problema de la falta de suficientes datos de radiación en cantidad y calidad es generalizado [9], pudiendo alterar las estimaciones de los modelos ya que la acumulación de biomasa y el rendimiento en grano es proporcional a la radiación incidente interceptada por el cultivo (excepto en casos de stress severo) [10]. Las variaciones en el rendimiento de la soja son consecuencia de efectos del genotipo, del ambiente y de su interacción, siendo el efecto ambiental el que explica la mayor parte de estas variaciones. Las propiedades del suelo (físicas y químicas) en interacción con las variables meteorológicas (radiación, agua y regímenes térmicos) determinan diferentes ambientes para el cultivo de soja [11].

En las últimas décadas, los avances teledetección proporcionan una forma de obtener información de radiación global en continuidad temporal y homogeneidad espacial. Entre otros, los datos provenientes del producto CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System) permitieron en los últimos años hacer un gran avance para estimar la radiación solar [12]. Debido a la importancia de los datos satelitales de la variable radiación solar, recientemente se desarrollaron diferentes estudios para evaluar la coincidencia de CERES con observaciones terrestres [8], [13], [14].

La aplicación de datos de radiación provenientes de satélites como inputs en modelos de simulación de cultivo, ha tomado auge en los últimos años. Por ejemplo, un estudio global utilizó datos meteorológicos provenientes de NOAA combinados con datos de radiación solar de la base de datos de NASAPOWER para estimar rendimiento potencial de arroz, maíz y trigo usando los modelos ORYZA2000, HybridMaize y CERES-Wheat, respectivamente [15]. En otro trabajo se utilizó estimaciones de precipitación a partir de imágenes de radar y radiación solar proveniente de GOES, para predecir el rendimiento de maíz en EEUU con el modelo DSSAT en el período 2008-2010 [16].

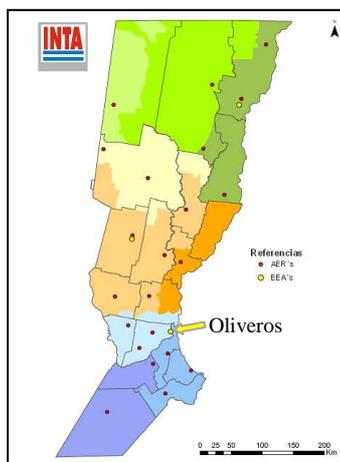
La producción agrícola extensiva es el principal uso de las tierras dedicadas a este fin en Argentina y una de las mayores fuentes de ingresos económicos. El cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) constituye una de las principales actividades agrícolas en la campaña de verano, alcanzando alrededor del 66% del área total sembrada en Argentina, alcanzando un total de 20.479.094 ha sembradas en la campaña 2015/2016 [17].

El objetivo de este trabajo fue evaluar cambios en la estimación del rendimiento de soja utilizando el modelo DSSAT (CROPGRO soybean), cuando se consideran datos de radiación solar obtenidos de imágenes satelitales (CERES) para reemplazar distintos porcentajes de datos meteorológicos faltantes en una base de datos. La aplicación y validación se realizó en un período de 6 campañas agrícolas de soja cultivada en la zona rural de Oliveros (Santa Fe - Argentina).

## 2 Materiales y métodos

### 2.3 Región de estudio

El área donde se realizó el estudio es una región agrícola importante situada en la zona rural de la EEA Oliveros - INTA (Figura 1), provincia de Santa Fe (32° 33'S; 60° 51'W). En esta región los suelos son predominantemente del tipo Argiudol típico serie Maciel [18]. El clima es húmedo mesotermal con poco o nulo déficit hídrico. Se presentan veranos calurosos y húmedos e inviernos secos y templados, alcanzando en 2016 temperaturas media máxima y mínima de 25°C y 13°C, respectivamente. En el mismo año la precipitación alcanzó los 1300 mm.



**Fig. 1.** Región de estudio (Imagen extraída de <http://inta.gob.ar>)

En esta región se utilizan cultivares de soja pertenecientes a los grupos de madurez III, IV y V, la fecha de siembra se concentra en el mes de noviembre y más del 90% se siembra en forma directa, con distancia entre surcos de 52 cm. La cosecha se realiza durante los meses de marzo/abril y los controles de malezas y fertilización son los normales para dicho cultivo.

## 2.2 Datos satelitales

La radiación solar proveniente de satélite se obtuvo del instrumento CERES, (Figura 2) que opera en distintos satélites de NASA, y mide la radiación solar reflejada y la emitida por la Tierra desde el tope de la atmósfera ([http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES\\_INSOL\\_M](http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M)). Todos los datos fueron procesados siguiendo lo propuesto por el proyecto Fast Longwave And SHortwave Radiative Fluxes (FLASHFlux- <http://flashflux.larc.nasa.gov/>). CERES cuenta con tres canales, uno de onda corta que mide brillo solar reflejado, otro de medición de la radiación termal emitida por la Tierra y un tercero que da cuenta del espectro total de radiación saliente de la Tierra. La resolución espacial de las imágenes empleadas en este trabajo fue de 0,25° de latitud/longitud, con una resolución temporal diaria para el período de tiempo Julio 2010 a Julio 2016.



**Fig. 2.** Radiación solar provista por CERES y correspondiente a 30 marzo de 2015 (Imagen extraída de <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov>).

## 2.3 El modelo CROPGROP Soybean - DSSAT

Se utilizó el modelo CROPGRO Soybean incluido en DSSAT V4.6 que simula el crecimiento diario del cultivo hasta el estadio de madurez fisiológica y de cosecha, , cuantificando entonces el rendimiento. Este software está compuesto por cuatro módulos que interactúan: desarrollo, balance de carbono, balance de agua y balance de nitrógeno y si bien la unidad de tiempo es diaria, algunos procesos como la fotosíntesis o la evolución fenológica utilizan un paso horario.

CROPGRO Soybean requiere como datos de entrada a los relacionados con el clima (temperatura máxima y mínima, radiación solar global, precipitación), el suelo (propiedades físicas y químicas de cada horizonte del perfil), el manejo del cultivo

(residuos, fechas de siembra, fertilización, riego) y los coeficientes genéticos de los cultivares.

Para el presente trabajo se utilizaron datos de la estación meteorológica de la EEA Oliveros (INTA) y los correspondientes datos de suelo (hasta una profundidad de 240cm).

Se consideraron tres variedades para la soja, con diferentes grupos de madurez: GM III, GM IV y GM V, cuyos coeficientes genéticos genéricos están definidos en el software. A fin de contemplar distintos regímenes fototermales e hídricos a los que podría estar expuesto el cultivo se evaluaron dos fechas de siembra: 15/10 y 15/11 para seis campañas agrícolas comprendidas entre los años 2010 y 2016, considerando como período de simulación desde el 1/10 al 30/4.

Para evaluar el efecto de la sustitución de datos de radiación solar observados por estimaciones de CERES; en cada campaña, se reemplazaron al azar, a lo largo del ciclo del cultivo, entre el 10% y el 100% de los datos (en pasos de 10% de incremento), y para cada tipo de reemplazo se realizaron 10 repeticiones. Por último se realizó la comparación entre el rendimiento (en kg/ha) obtenido por CROPGRO Soybean con datos de radiación solar observados y el resultante al usar datos de CERES con distintos porcentajes de reemplazo.

### **2.3 Estadísticos de validación**

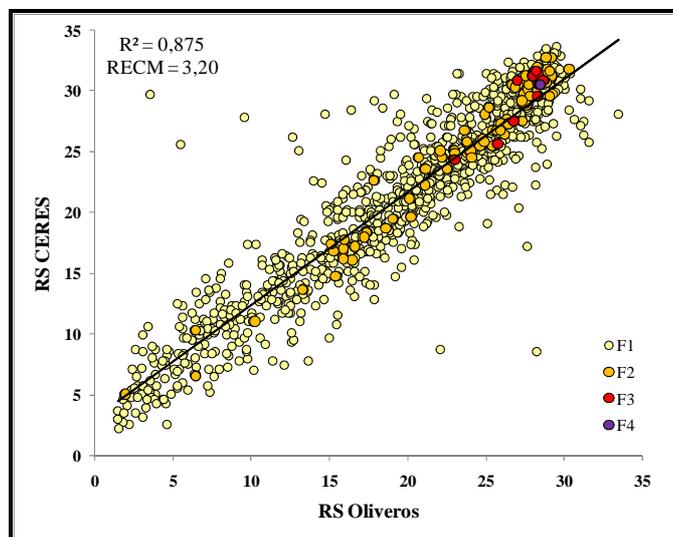
Para evaluar la validez de reemplazar datos medidos por los provenientes de CERES se calcularon, según corresponda, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (RECM) y su porcentaje (%RECM).

## **3 Resultados y discusión**

Los valores de radiación solar registrados y los estimados de CERES, para la localidad de Oliveros en todo el período de tiempo considerado en el presente trabajo, se presentan en la Figura 3.

Los valores de ajuste ( $R^2$  y RECM) entre la radiación registrada y la obtenida de CERES para la zona de estudio se encuentran dentro de los rangos ya observados por otros autores [19].

Teniendo en cuenta el ajuste entre datos registrados en la estación meteorológica y aquellos estimados a través del satélite y dado que algunos trabajos expresan que los resultados de los modelos de simulación de cultivos están afectados por la calidad de los datos de radiación solar utilizados [6], se calcularon los estadísticos que muestran las diferencias entre la radiación solar diaria registrada y la obtenida de CERES, para cada uno de los porcentajes de reemplazo utilizados en el modelo (Tabla 1).



**Fig. 3.** Dispersión entre los valores de radiación solar diaria registrados EEA Oliveros (INTA) y los estimados por CERES (en MJ/m<sup>2</sup>d), entre los años 2010 y 2016 (Fi = frecuencia i de los valores de radiación en el período).

Como puede observarse en la Tabla 1, los errores entre los valores de radiación solar registrada y reportada por CERES, con distintos niveles de reemplazo, varía entre 2,30 y 4,66 MJ/m<sup>2</sup>d, valores que se encuentran dentro del rango promedio para 340 localizaciones a nivel mundial, que fue de 2,90 MJ/m<sup>2</sup>d [20]. En cada campaña el incremento en el porcentaje de reemplazo no produjo grandes variaciones en los valores de RECM. La campaña 2011/12 fue la que presentó las mayores diferencias para todas los porcentajes de reemplazo y, por el contrario, 2014/15 la que tuvo los menores errores.

**Tabla 1.** Raíz del Error cuadrático medio del ajuste entre radiación solar diaria registrada y proveniente de CERES, según porcentaje de datos reemplazados y en promedio para las FS 15/10 y 15/11.

Campaña	RECM (en MJ/m <sup>2</sup> d)									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
2010/11	3,91	3,79	3,82	3,91	3,82	3,95	3,92	3,92	3,86	3,89
2011/12	4,30	4,52	4,00	4,59	4,31	4,52	4,66	4,65	4,59	4,60
2012/13	3,13	3,18	2,83	3,09	3,08	3,20	3,26	3,23	3,27	3,26
2013/14	3,01	3,00	3,06	3,05	3,07	3,10	3,05	3,03	3,06	3,06
2014/15	2,30	2,42	2,49	2,46	2,45	2,43	2,45	2,45	2,47	2,46
2015/16	2,79	2,74	2,78	2,82	2,76	2,82	2,82	2,84	2,85	2,84

Al emplear el modelo DSSAT en diferentes fechas de siembra, campañas y grupos de madurez con datos de la radiación solar registrada por la EEA Oliveros, se obtuvieron los rendimientos que se presentan en la Tabla 2.

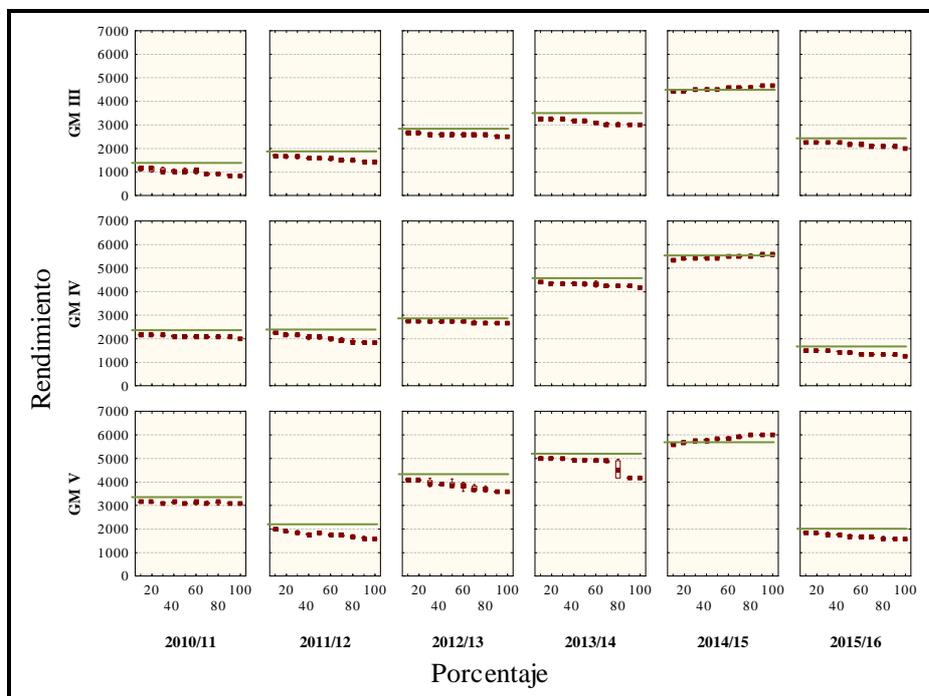
**Tabla 2.** Rendimiento de soja (kg/ha) estimada por CROPGRO utilizando la radiación solar observada, según fechas de siembra (FS) y grupo de madurez (GM) para las campañas entre los años 2010 y 2016.

Campaña	FS: 15/10			FS: 15/11		
	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V
2010/11	1234	2179	3154	2537	3071	3338
2011/12	1740	2300	2053	2600	3678	4027
2012/13	2681	2737	4153	1088	1823	2874
2013/14	3382	4411	5053	3733	4527	4957
2014/15	4385	5341	5583	4339	4848	5097
2015/16	2299	1540	1882	1868	1892	3358

Las diferentes combinaciones de fecha de siembra, grupo de madurez y campañas agrícolas, generaron diferentes combinaciones genotipo /ambiente para la simulación, que permiten dar cuenta de una importante cantidad de escenarios, CROPGRO a partir de valores registrados de radiación solar estimó rendimientos de la soja entre 1234 y 5583 kg/ha (Tabla 2). Estos valores se corresponden con los rendimientos registrados para la misma región, para la campaña 2011/12 entre 2011 y 4530 kg/ha y para la campaña 2014/15 de entre 4655 y 5429 kg/ha [18], [21].

Al aplicar el modelo reemplazando distintos porcentajes de los valores de radiación solar registrada con la reportada por CERES, se observaron los rendimientos que se presentan en las Figuras 4 y 5, donde se observa que cuando el porcentaje de sustitución de datos es bajo (hasta el 30%) los resultados son similares a los estimados a partir de la radiación registrada, independientemente del año, fecha de siembra y grupo de madurez. En la mayoría de los casos para la primera fecha de siembra y en dos campañas para la segunda, al incrementar el porcentaje de reemplazo, los valores de los errores en la estimación del rendimiento aumentan. En las Tablas 3 y 4 se presentan, para cada fecha de siembra respectivamente, los valores de la raíz del error cuadrático medio y el porcentaje que da cuenta del error que representa sobre el rendimiento obtenido a partir de datos registrados.

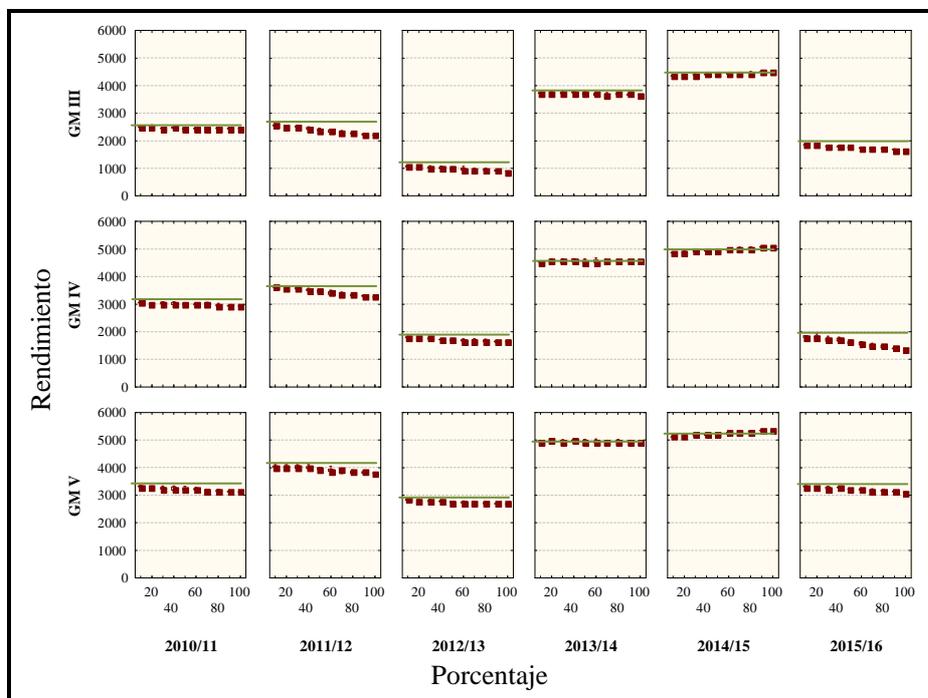
Analizando las combinaciones fecha de siembra/grupo de madurez/campaña, la tasa de incremento del error es pequeña en mayoría de los casos. El mejor de ellos se observa para la fecha de siembra del 15/10, en la campaña 2010/11 y para el GM V, donde RECM varía entre 14 y 80 kg/ha para reemplazos entre 10 y 100%, respectivamente (Tabla 3). También se observan bajos errores de ajuste para la campaña 2012/13 en los GM III y IV correspondientes a la primera fecha de siembra.



**Fig. 4.** Rendimiento de soja (kg/ha) estimada por CROPGRO en la fecha de siembra 15/10, considerando distintos porcentajes de reemplazo de radiación solar con datos de CERES, para distintos grupos de madurez (GM) y campañas (la línea verde indica el rendimiento obtenido al utilizar datos registrados de radiación solar en la estación meteorológica de Oliveros).

En la soja sembrada el 15/11 se presentan un mayor número de casos con un pequeño error, donde en el 45% de los reemplazos, la diferencia entre rendimiento estimado a partir de radiación registrada vs obtenido con radiación de CERES, no supera el 3%. Particularmente, en la campaña 2013/14 y para todos los grupos de madurez sería posible incrementar el porcentaje de reemplazo de valores de radiación solar sin modificar las estimaciones del rendimiento en soja (Figura 5).

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo CROPGRO muestran también que el incremento en el porcentaje de reemplazo de la radiación solar registrada puede llevar, en algunas campañas, a una subestimación del rendimiento. Este comportamiento puede notarse en las Figuras 4 y 5; particularmente para el grupo de madurez V y en la primera fecha de siembra se observa en 4 de las 6 campañas analizadas. Las subestimaciones, reemplazando el 100% de los datos, alcanzan, en muy pocos casos, a lo sumo %RECM= 30% (Tablas 3 y 4). Debe notarse que este comportamiento del modelo es independientemente de la magnitud del rendimiento.



**Fig. 5.** Rendimiento de soja (kg/ha) estimada por CROPGRO en la fecha de siembra 15/11, considerando distintos porcentajes de reemplazo de radiación solar con datos de CERES, para distintos grupos de madurez (GM) y campañas (la línea verde indica el rendimiento obtenido al utilizar datos registrados de radiación solar en la estación meteorológica de Oliveros).

Por último, en la campaña 2014/15, cuando se utiliza CROPGRO con un porcentaje alto de datos de CERES, los valores del rendimiento fueron sobreestimados, para los tres grupos de madurez considerados y en ambas fechas de siembra (Figuras 4 y 5). En general los errores de sobreestimación, cuando se reemplazan todos los datos, son muy bajos y rondan el 5% de %RECM; a excepción del GM V que en la siembra del 15/11 alcanza el 18% (Tablas 3 y 4).

A los efectos de discutir los resultados obtenidos en este trabajo, con los de otros autores, se encontró una escasa cantidad de trabajos publicados, referidos al uso de radiación solar estimada por satélites como dato de entrada de CROPGRO Soybean. Entre estos, podemos citar a [22], quienes, con simulaciones realizadas con CROPGRO-PEANUT en India, a partir de información meteorológica (temperatura y precipitaciones) y datos de radiación solar únicamente derivada de satélites, estimaron el rendimiento de maní.

**Tabla 3.** Raíz del error cuadrático medio (RECM) y su porcentaje (%RECM), del rendimiento de soja estimada a partir de radiación solar registrada y de CERES, para las campañas donde se presenta el mejor ajuste, las mayores sub y sobreestimaciones (fecha de siembra 15/10).

Campaña	RECM (en kg/ha) y (%RECM)									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
<b>Grupo de madurez III</b>										
2012/13	36 (1,3)	47 (1,8)	67 (2,5)	84 (3,1)	85 (3,2)	89 (3,3)	115 (4,3)	117 (4,4)	144 (5,4)	158 (5,9)
2010/11	103 (8,3)	150 (12,1)	198 (16,0)	206 (16,7)	213 (17,3)	222 (18,0)	313 (25,4)	317 (25,7)	357 (29,0)	408 (33,1)
2014/15	37 (0,8)	69 (1,6)	93 (2,1)	137 (3,1)	148 (3,4)	183 (4,2)	212 (4,8)	248 (5,6)	264 (6,0)	302 (6,9)
<b>Grupo de madurez IV</b>										
2012/13	29 (1,1)	50 (1,8)	42 (1,5)	39 (1,4)	51 (1,9)	47 (1,7)	42 (1,5)	49 (1,8)	82 (3,0)	88 (3,2)
2011/12	50 (2,2)	129 (5,6)	159 (6,9)	246 (10,7)	247 (10,8)	301 (13,1)	349 (15,2)	405 (17,6)	445 (19,3)	447 (19,4)
2014/15	26 (0,5)	48 (0,9)	75 (1,4)	108 (2,0)	123 (2,3)	162 (3,0)	184 (3,4)	209 (3,9)	233 (4,4)	279 (5,2)
<b>Grupo de madurez V</b>										
2010/11	14 (0,4)	47 (1,5)	44 (1,4)	47 (1,5)	60 (1,9)	67 (2,1)	59 (1,9)	58 (1,9)	63 (2,0)	80 (2,5)
2011/12	77 (3,8)	161 (7,9)	202 (9,8)	264 (12,9)	239 (11,6)	314 (15,3)	329 (16,0)	387 (18,9)	426 (20,7)	469 (22,8)
2014/15	46 (0,6)	93 (1,2)	147 (1,5)	210 (1,9)	243 (2,4)	295 (2,8)	322 (8,2)	376 (12,6)	419 (17,4)	463 (18,1)

Nota: mejor ajuste (en blanco) y los mayores valores de sub (gris claro) y sobreestimaciones (gris oscuro) del rendimiento.

En un estudio, ajustando los coeficientes de la ecuación de Bristow–Campbell, estimaron la radiación global con valores de RECM entre 2,42 y 3,79 MJ/ m<sup>2</sup>d y con estos valores calculados y los de radiación solar medidos, al comparar los rendimientos obtenidos por DSSAT, mostraron valores de R<sup>2</sup> de 0,96 (año 2008) y 0,98 (año 2009) para maní y un menor ajuste para el cultivo de arroz (R<sup>2</sup> =0,54 y 0,82 en cada año, respectivamente) [23].

**Tabla 4.** Raíz del error cuadrático medio (RECM) y su porcentaje (%RECM), del rendimiento de soja estimada a partir de radiación solar registrada y de CERES, para las campañas donde se presenta el mejor ajuste, las mayores sub y sobreestimaciones (fecha de siembra 15/11).

Campaña	RECM (en kg/ha) y (%RECM)									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
<b>Grupo de madurez III</b>										
2013/14	15 (0,4)	30 (0,8)	34 (0,9)	32 (0,8)	67 (1,8)	77 (2,1)	68 (1,8)	47 (1,3)	61 (1,6)	56 (1,5)
2012/13	28 (2,5)	48 (4,4)	61 (5,6)	69 (6,3)	102 (9,4)	125 (11,5)	140 (12,9)	147 (13,5)	171 (15,7)	197 (18,1)
2014/15	15 (0,4)	48 (1,1)	63 (1,5)	73 (1,7)	84 (1,9)	108 (2,5)	113 (2,6)	139 (3,2)	161 (3,7)	175 (4,0)
<b>Grupo de madurez IV</b>										
2013/14	21 (0,5)	73 (1,6)	59 (1,3)	72 (1,6)	53 (1,2)	69 (1,5)	53 (1,2)	56 (1,2)	57 (1,3)	58 (1,3)
2015/16	80 (4,2)	113 (6,0)	189 (10,0)	187 (9,9)	284 (15,0)	345 (18,2)	404 (21,4)	429 (22,7)	495 (26,2)	558 (29,5)
2014/15	23 (0,5)	58 (1,2)	86 (1,8)	94 (1,9)	116 (2,4)	144 (3,0)	166 (3,4)	194 (4,0)	221 (4,6)	239 (4,9)
<b>Grupo de madurez V</b>										
2013/14	24 (0,5)	43 (0,9)	34 (0,7)	34 (0,7)	34 (0,7)	53 (1,1)	39 (0,8)	33 (0,7)	25 (0,5)	1 (0,0)
2015/16	43 (1,3)	63 (1,9)	100 (3,0)	83 (2,5)	141 (4,2)	158 (4,7)	188 (5,6)	196 (5,9)	224 (6,7)	245 (7,3)
2014/15	24 (0,5)	61 (1,2)	97 (1,9)	110 (2,2)	125 (2,4)	158 (3,1)	181 (3,6)	218 (4,3)	247 (4,8)	270 (5,3)

Nota: mejor ajuste (en blanco) y los mayores valores de sub (gris claro) y sobreestimaciones (gris oscuro) del rendimiento.

Si bien la sustitución de datos de radiación solar observados por estimaciones de CERES fue al azar, el hecho de haber contemplado porcentajes elevados de reemplazo, nos asegura haber simulado con datos de radiación global estimados por CERES el rendimiento de soja en los períodos críticos del cultivo.

## 4 Conclusiones

Los resultados encontrados en este trabajo, confirman que es posible emplear la radiación solar proveniente de CERES, en caso de no poseer registros de esta variable, para estimar rendimiento de soja a partir del modelo CROPGRO Soybean.

Considerando los distintos porcentajes de reemplazo de datos por radiación obtenida del satélite, se encontró que el rendimiento de soja es mejor estimado siempre que el reemplazo de datos no supere el 30% de los mismos, independientemente de la fecha y año de siembra y del grupo de madurez del cultivo.

En años con situaciones ambientales adecuadas y para grupos de madurez que mejor se adaptan a las fechas de siembra de octubre o noviembre, el modelo presenta muy buenas estimaciones del rendimiento aún reemplazando casi la totalidad de los registros por la radiación reportada por CERES. Se observa, en aproximadamente el 40% de los casos, que al reemplazar el 100% de los datos se obtienen muy bajos errores (valores menores al 5% del porcentaje de la raíz del error cuadrático medio).

## Referencias

1. Dokoochaki, H., Gheysari M., Mousavi, S., Zand-Parsa, S., Miguez, F., Archontoulis, S. and Hoogenboom, G. Coupling and testing a new soil water module in DSSAT CERES-Maize model for maize production under semi-arid condition. *Agricultural Water Management* 163, 90–99. (2016).
2. Hoogenboom, G., Jones, J., Traore, P. and Boote, K. Experiments and Data for Model Evaluation and Application (Chapter 2). J. Kihara et al. (eds.), *Improving Soil Fertility Recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*, Springer Science+Business Media Dordrecht. (2012).
3. Keating, B., Carberry, P., Hammer, G., Probert, M., Robertson, M., Holzworth, D., Huth, N., Hargreaves, J., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R., Freebairn, D. and Smith, C. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18(3–4), 267–288. (2003).
4. Van Dam, J., Huygen, J., Wesseling, J., Feddes, R., Kabat, P., Van Walsum, P., Groenendijk, P. and Van Diepen, C. Theory of SWAP version 2.0; Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Report 71 Department Water Resources, Wageningen Agricultural University Technical Document 45 DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 19. (1997).
5. Li, Z., Yang, J., Drury, C. and Hoogenboom, G. Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China. *Agricultural Systems* 135, 90–104. (2015).
6. Wang, J., Wang, E., Yin, H., Feng, L. and Zhao, Y. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields. *Field Crops Research* 176, 1–10. (2015).
7. Will, A., Bustos, J., Bocco, M., Gotay, J. and Lamelas, C. On The Use of Niching Genetic Algorithms for Variable Selection in Solar Radiation Estimation. *Renewable Energy* 50, 168–176. (2013).
8. Almorox, J., Ovando, G., Sayago, S. and Bocco, M. Assessment of surface solar irradiance retrieved by CERES. *International Journal of Remote Sensing* 38(12), 3669–3683. (2017).
9. Ovando, G., Sayago, S. y Bocco, M. Radiación solar: modelos para estimarla a partir de imágenes de CERES. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 3, 08.01-08.09. (2015).
10. Pedrol, H., Castellarín, J. y Ferraguti, F. Crecimiento, producción de granos por planta y variación del índice de cosecha según genotipo y ambiente. En: *Actas IX Congreso Nacional de Maíz*. Rosario Santa Fe. p 113. (2010).

11. Salvagiotti, F., Enrico, J., Bodrero, M. y Bacigaluppo, S. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. Para Mejorar La Producción 45, 151–154. INTA EEA Oliveros. (2010). <http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-produccion-de-soja-y-uso-eficiente-de-los-recursos.pdf>
12. Smith, N.P., Thomas, S., Shankar, M., Hess, P.C., Smith, N.M., Walikainen, D.R., Wilson, R.S. and Priestley, K. J. Assessment of the clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instrument performance and stability on the Aqua, Terra, and S-NPP spacecraft. In: Proceedings of SPIE Earth Observing Systems XX 9607, 96070T-96070T-10. (2015).
13. Pan, X., Liu, Y. and Fan, X. Comparative Assessment of Satellite-Retrieved Surface Net Radiation: An Examination on CERES and SRB Datasets in China. Remote Sensing 7(4), 4899–4918. (2015).
14. Zhang X., Liang, S., Wild, M. and Jiang, B. Analysis of Surface Incident Shortwave Radiation from Four Satellite Products. Remote Sensing of Environment 165, 186–202. (2015).
15. Van Wart, J., Grassini, P. and Cassman, K. Impact of derived global weather data on simulated crop yields. Global Change Biology 19, 3822–3834. (2013).
16. McNider, R., Christy, J., Moss, D., Doty, K., Handyside, C., Limaye, A., Garcia y Garcia, A. and Hoogenboom, G. A Real-Time Gridded Crop Model for Assessing Spatial Drought Stress on Crops in the Southeastern United States. Journal of Applied Meteorology and Climatology 50, 1459–1475. (2011).
17. Ministerio de Agroindustria. <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (2017).
18. Enrico, J. M. y Gentili, O. Ensayos Comparativos de Rendimiento de soja. Campaña 2014-15. Para Mejorar La Producción 45, 71–80. (2016). <http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-6.ensayos-comparativos-rendimiento-soja.pdf>
19. Zhang, J., Zhao, L., Deng, S., Xu, W., Zhang, Y., Zhang, J., Zhao, L., Deng, S., Xu, W. and Zhang, Y. A critical review of the models used to estimate solar radiation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, 314–329. (2017).
20. Jia, A., Jian, B., Liang, S., Zhang, X. and Ma, H. Validation and Spatiotemporal Analysis of CERES Surface Net Radiation Product. Remote Sensing 8, 90. (2016).
21. Enrico, J. M., Conde, M.B., Martignone, R.A. y Bodrero, M.L. Soja: evaluación de la estabilidad del rendimiento según fechas de siembra. Para Mejorar La Producción 50, 71–78. (2013). [http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-soja-evaluacion-estabilidad-rendimiento-segun-fe\\_2.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-soja-evaluacion-estabilidad-rendimiento-segun-fe_2.pdf)
22. Biswal, A. Sai, S. and Rao, K. Assessment of satellite and model derived long term solar radiation for spatial crop models: A case study using DSSAT in Andhra Pradesh. Computational Ecology and Software 4(3), 205–214. (2014).
23. Phakamas, N., Jintrawet, A., Patanothai, A., Sringam, P. and Hoogenboom, G. Estimation of solar radiation based on air temperature and application with the DSSAT v4.5 peanut and rice simulation models in Thailand. Agricultural and Forest Meteorology 180, 182–193. (2013).