

## Ecofisiología y rendimiento de Soja (*Glycine max*)

Ing. Agr. (Esp) Rubén Toledo.  
Cereales y Oleaginosas, FCA, UNC



  @sojaenmultimedia

### DESARROLLO

Para el seguimiento fenológico de soja se utiliza la escala desarrollada por [Fehr et al., \(1977\)](#), que describe las [etapas vegetativas y reproductivas](#) según el número de nudos del tallo principal (estados V) o la presencia o tamaño de órganos reproductivos en los nudos del tallo (estados R). Luego de VE los cotiledones (insertados en el nudo 0) se abren y se despliega el par de hojas unifoliadas (en el nudo 1), luego las hojas trifoliadas (del nudo 2 en adelante) aparecen a un ritmo que depende, principalmente, de la temperatura definiendo los sucesivos estados V (V1, V2, Vn). Se menciona que el filocrono, según las diferentes condiciones de campo, implica que aproximadamente una hoja se expanda cada 3 o 4 días ([Fehr y Caviness, 1977](#), [Bastidas et al., 2008](#)).

La primera manifestación externa del estado reproductivo es la apertura de la primera flor (**R1**). Cuando las flores se abren en alguno de los dos nudos superiores del tallo, se define el estado de plena floración (**R2**). Los estados posteriores a R2 se los determina según la presencia y tamaño de vainas y granos en alguno de los cuatro nudos superiores: una vaina de 5 mm (**R3**), una vaina de 2 cm (**R4**), un grano de 3 mm (**R5**) o los granos llenando las cavidades de la vaina correspondiente (**R6**). Los granos continúan creciendo hasta que, al alcanzar la madurez fisiológica (**R7**), pierden su color verde y las plantas comienzan a madurar; la madurez completa (**R8**) se considera cuando el 95% de las vainas alcanzan su color típico de madurez. ([Kantolic, 2008](#)) (Fig. 1)

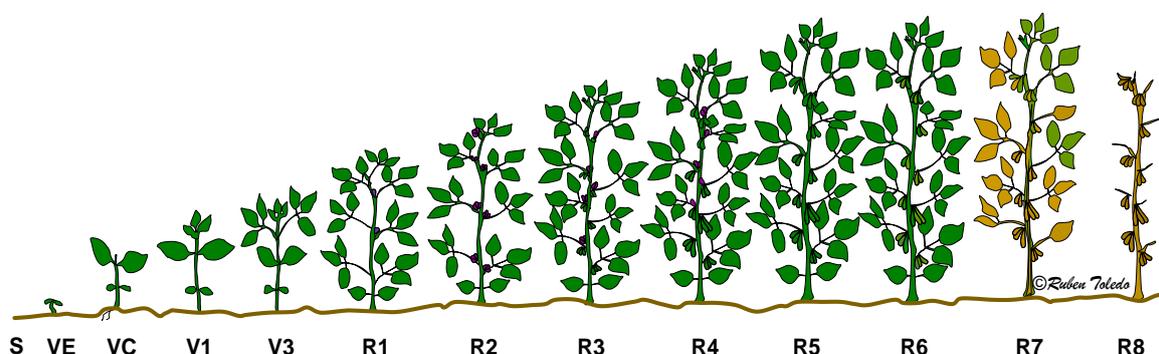


Figura 1: Representación de la clave fenológica según Fehr y Caviness (1977)

En R5 comienzan a desarrollarse los granos como se representa en la Fig. 2; dónde en **R5** se logra la máxima altura de planta, la máxima diferenciación de nudos, el mayor índice de área foliar (IAF) y la máxima tasa de fijación biológica de Nitrógeno (FBN). En **R6** se logra el máximo peso seco (biomasa aérea) y la máxima acumulación de nutrientes en planta, y el **grano** tiene el alrededor del **80% de humedad (H°)**. En **R7** se logra el máximo peso de grano y acumulación de nutrientes en los mismos, esta etapa se la denomina **madurez fisiológica** y el grano tiene alrededor del **60% de H°**. Finalmente, en **R8** se logra la **madurez completa**, dónde el grano tiene alrededor del **35% de H°**, cuyo porcentaje debe seguir bajando hasta que pueda ser cosechado a un valor cercano al **13,5% de H°** que es la **madurez comercial** del grano.

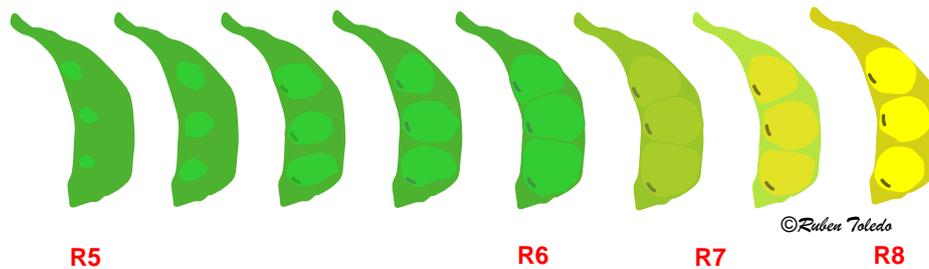


Figura 2: Representación de la evolución en el desarrollo de granos.

## Hábitos de crecimiento

En Argentina podemos encontrar dos tipos de **Hábito de crecimiento (HC)**:

- HC determinado:** La planta prácticamente detiene la diferenciación de nudos en el eje principal cuando inicia la floración. Luego de dicha etapa comienza a generar ramas, y en los extremos apicales se forman ramilletes de estructuras reproductivas. Algunas variedades del **GM VII y VIII** tienen este tipo de HC. Mayor el GM más genotipos se pueden encontrar con este HC. (Fig. 3a)
- HC indeterminado:** Es el tipo predominante en Argentina. La planta continúa diferenciando nudos en el eje principal, siguen desarrollando alternadamente estructuras vegetativas y reproductivas. Todas las variedades de los **GM II, GM III, GM IV, GM V**, la mayoría del **GM VI**. Cada vez más variedades del **GM VII y GM VIII** poseen este HC. (Fig. 3b)

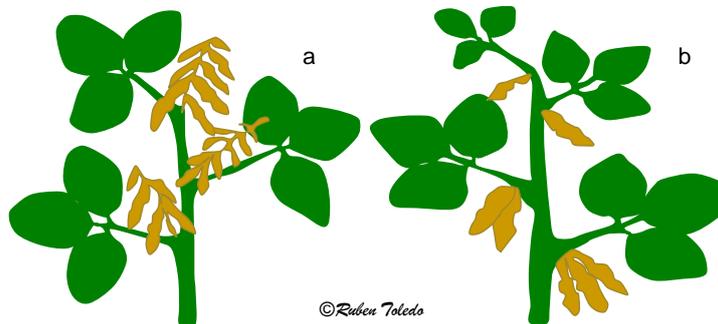


Figura 3: Representación de los Hábitos de crecimiento: a) determinado y b) indeterminado.

*Sembrados en una misma FS y comparando el mismo GM (por ej. GM VI), los cultivares de HC indeterminado son de mayor altura de planta a madurez que los de HC determinados.*

## Factores que regulan el desarrollo

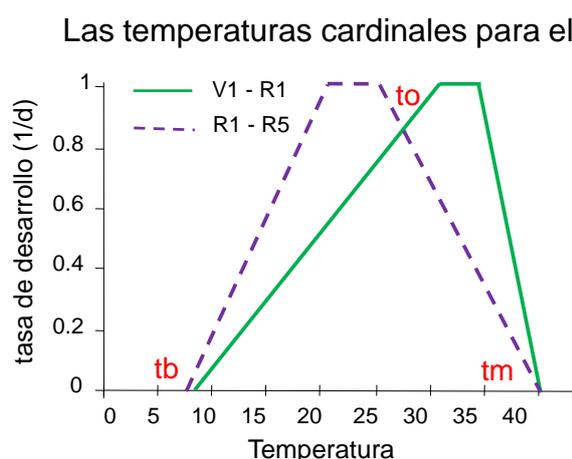
La **temperatura** y el **fotoperiodo** son los factores ambientales que regulan la duración de las fases de desarrollo del cultivo, actuando en forma simultánea en las plantas y con evidencia de interacción entre ellos. (Kantolic y Satorre, 2004)

- **Temperatura**

Se puede mencionar que la **temperatura base** ( $T_b$ ) de desarrollo promedio es de **8°C**, las **temperaturas óptimas** diurnas para la fotosíntesis están comprendidas entre los **30 y 35°C** (Salado Navarro, 2012) Las temperaturas óptimas nocturnas para crecimiento se encuentran entre los **21 y 27 °C** (Jones *et al.*, 1991). Los requerimientos de **sumas térmicas**

de siembra a emergencia son **105°C días** y **125 °C días** si se considera temperatura de suelo y aire respectivamente. Por lo tanto, se resume que la **temperatura óptima** promedio para el desarrollo normal vegetativo y reproductivo se encuentra entre los **25°C y 30°C**.

La duración de una fase (habitualmente medida en días calendario) depende de la temperatura, siendo esta determinante en la longitud de cada una de las etapas. La relación entre dicha duración y la temperatura no es lineal, por ello se prefiere caracterizar la longitud de una etapa a través de su inversa. Esta función inversa de la duración se llama **tasa de desarrollo** y su unidad es **1/día**. En términos generales esta tasa aumenta linealmente entre la  $T_b$  (temperatura por debajo de la cual no hay desarrollo) y la óptima ( $T_o$ ), donde la velocidad con que se cumple cada etapa es máxima; entre la  $T_o$  y la máxima ( $T_m$ ) la tasa disminuye. Por debajo de la  $T_b$  y por encima de la  $T_m$  no hay desarrollo.



**Figura 4:** Efecto de la temperatura sobre la tasa de desarrollo. (Fuente: Modificado de Kantolic 2004)

La **temperatura** regula el desarrollo **durante todo el ciclo**, sin respuestas diferenciadas entre genotipos, es decir que habría una **respuesta universal** a la temperatura por parte de todos los GM; sin embargo, los requerimientos de tiempos térmicos para que se produzca la floración, tienden a disminuir desde los GM mayores hacia los GM menores. (Piper et al., 1996).

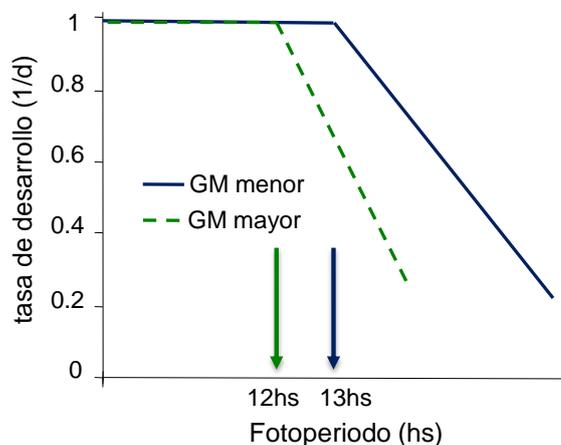
### • Fotoperiodo

Antes de conocer el efecto del fotoperiodo, se mencionarán algunos aspectos generales sobre los GM:

- ✓ Los cultivares comerciales se agrupan en GM o de precocidad. En Argentina se siembran un rango de variedades del **GM II** al **GM VIII**.
- ✓ Cada GM reúne variedades con **similar respuesta al fotoperíodo**, -similar duración de días desde VE a R1-
- ✓ Dentro de cada GM se encuentran variedades que son de **ciclo cortos, intermedios y largos**.
- ✓ Los GM II, GM III, GM IV, y GM V de ciclo corto son denominados **GM bajos o menores** por su menor largo de ciclo. Cuanto más bajo el GM "**menos sensibles**" al **fotoperiodo** y más rápida respuesta a la temperatura (dado por su ciclo más corto). Cuanto más bajo el GM **mayor productividad**.
- ✓ Los GM V de ciclo largo, GM VI, GM VII y GM VIII son denominados **GM altos o mayores** por su mayor largo de ciclo. Cuanto más alto el GM "**más sensibles**" al

**fotoperiodo** y el efecto de la temperatura se ve atenuado por el largo de los ciclos. Cuanto más alto el GM **mayor estabilidad**.

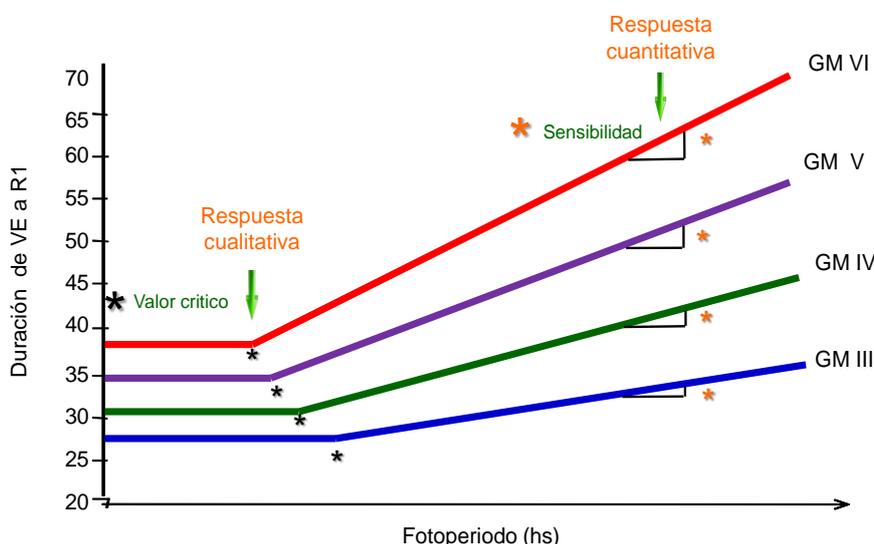
El efecto principal del fotoperíodo es el de **inducir la floración**. En términos generales la soja se clasifica como **planta de días cortos**. El fotoperíodo influye y regula la mayor parte de los eventos reproductivos condicionando el inicio y final de las diferentes fases, y la tasa con que progresan los cambios dentro de la planta. (Kantolic et al., 2004). La sensibilidad al fotoperíodo y el umbral por encima del cual el fotoperíodo retrasa el desarrollo, varía entre genotipos (Fig. 5). Cuanto más bajos, los GM presentan una menor sensibilidad y un mayor umbral (alrededor de 13hs de luz o mayor), o a la inversa, cuanto mayor es el GM mayor es la sensibilidad y el umbral es menor (alrededor de 12hs de luz o menor) (Kantolic, 2008)



**Figura 5:** Efecto del fotoperíodo sobre la tasa de desarrollo, según el GM. (Fuente: [Kantolic 2008](#))

Según (Miralles, et al., 2004) la respuesta fotoperiódica se la puede clasificar en:

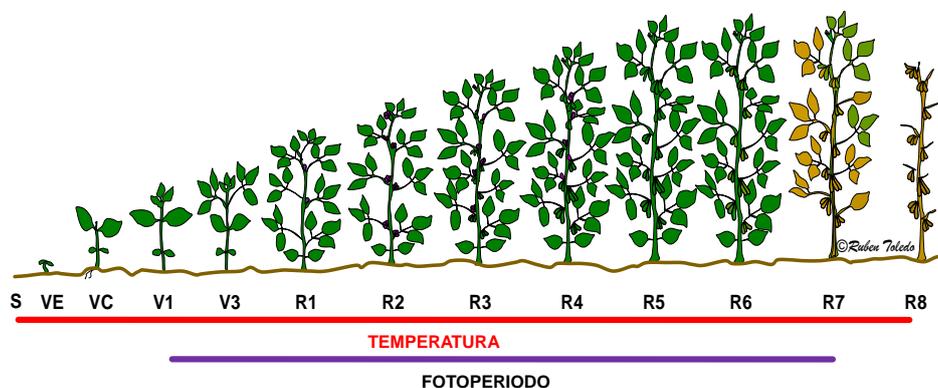
- cuantitativa:** Cada GM tiene que superar un **valor crítico** o umbral de respuesta, para que se produzca la floración y que varía entre las **12 - 14,5** horas de luz.
- cuantitativa:** es aquella donde cada GM tiene una pendiente de respuesta, donde la mayor o menor respuesta va a depender del **grado de sensibilidad** del GM. (Fig. 6).



**Figura 6:** Respuestas fotoperiódicas en función del GM.

A nivel mundial existen genotipos con un rango muy amplio de sensibilidad fotoperiódica: a) los que son insensibles, b) los que tienen valores críticos altos adaptados a mayores latitudes, y que florecen con fotoperíodos muy largos, y c) los que están adaptados a bajas latitudes, que florecen con fotoperíodos más cortos y que poseen alta sensibilidad.

A diferencia de la **temperatura** que influye durante **todo el ciclo** del cultivo, la mayoría de los genotipos presentan una corta **fase juvenil** o preinductiva, donde la inducción floral puede ocurrir en cualquier estadio después del desarrollo de la hoja unifoliada (Hicks, 1983), lo cual se puede asumir que cuando se expanden las primeras hojas trifoliadas la planta comienza a ser sensible al fotoestímulo fotoperiódico, y esta respuesta se prolonga hasta madurez fisiológica (Sadras et al., 2000). Por lo tanto, el **fotoperíodo** regula el desarrollo desde **V1-V2 hasta R7**. (Fig. 7)



**Figura 7:** Influencia de la temperatura y el fotoperíodo durante el ciclo.

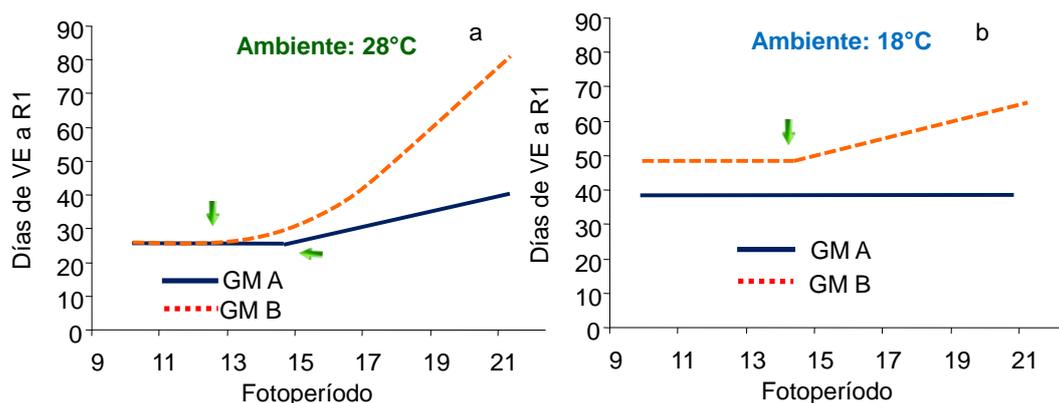
- **Interacción temperatura – fotoperíodo**

La duración de las diferentes etapas de desarrollo está regulada simultáneamente por la **temperatura** y por el **fotoperíodo**; por lo tanto, la fenología del cultivo depende, finalmente, de la respuesta genotípica a ambos factores; estos están interactuando en el ambiente.

Lo mencionado anteriormente se ejemplifica con un trabajo desarrollado por Cober et al., (2001) comparando un genotipo A (línea continua) y un genotipo B (línea discontinua), en dos ambientes con temperaturas controladas (18°C y 28°C):

- En **condiciones óptimas (28°)** el genotipo B -más sensible- tiene un umbral crítico menor, requiere menos horas de luz para inducirse a la floración con respecto al genotipo A -menos sensible-. (Fig. 8a)
- En **condiciones sub óptimas (18°C)**, el principal efecto es un **retraso** en el inicio de la **floración**, es decir aumenta la duración de la etapa vegetativa, ya que se **modifica** la **sensibilidad** al fotoperíodo, y el umbral crítico se altera para ambos genotipos, desaparece el valor crítico en el GM A (no tiene efecto el fotoperíodo), y en el GM B su respuesta se desplaza hacia más horas de luz. (Fig. 8b)

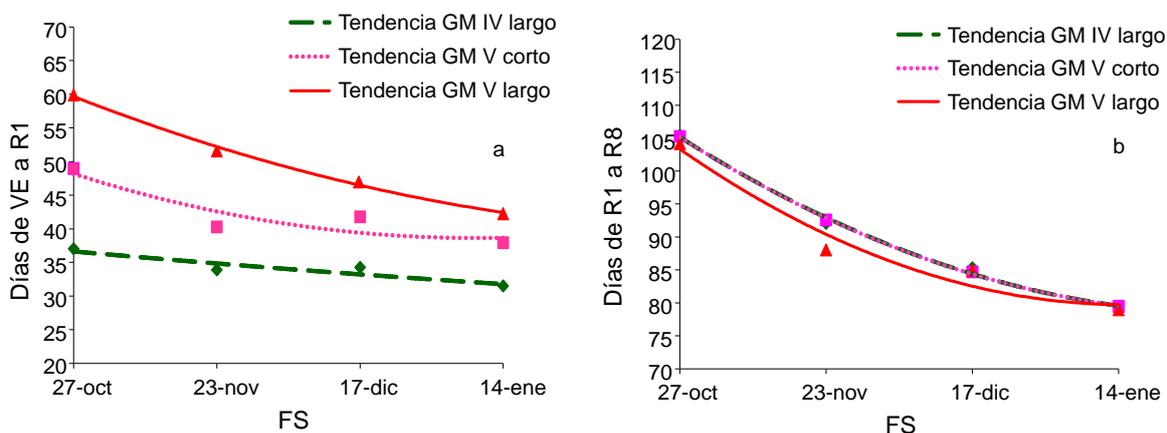
Recordemos que al disminuir la temperatura disminuye la tasa de desarrollo, por lo tanto, la duración de las etapas es mayor. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en FS tempranas primaverales con temperaturas media ambientales más frescas, dónde, además de aumentar la longitud de la etapa vegetativa, disminuye la sensibilidad al fotoperíodo, siendo esto significativo en aquellos GM de menor sensibilidad. Temperaturas por **debajo de los 25°C** atrasan la floración independiente de la longitud del día. Con fotoperíodos largos y temperaturas **mayores a 32°C** se producen abortos de flores y vainas. (Whigham and Minor, 1983)



**Figura 8:** Interacción entre temperatura y fotoperíodo con a) temperatura a 28°C y b) temperatura a 18°C.

Para visualizar mejor el “**efecto del fotoperíodo**”, en la Fig. 9a se observa un ejemplo de tendencia de respuesta promedio de los GM IV largo, GM V corto y GM V largo. En todos los GM la longitud de la etapa vegetativa -VE a R1- tiene tendencia decreciente a medida que se atrasa la fecha de siembra (FS). Sembrados en la 2<sup>da</sup> quincena de octubre, la floración se produce a los **60 días** (GM V largo), **49 días** (GM V corto) y a los **37 días** (GM IV largo). Si se observa que ocurre en la FS de enero los valores se reducen: a **42 días** (GM V largo), a **38 días** (GM V corto) y a **31 días** (GM IV largo). Es decir, en el GM de mayor ciclo la diferencia entre FS extremas fue de 18 días y en el de menor ciclo fue de 6 días, esto refleja el efecto de la modificación del ambiente -FS- sobre la respuesta cuantitativa al fotoperíodo de los GM.

Con respecto a la duración de la etapa reproductiva -R1 a R8- sigue la misma tendencia decreciente que la etapa anterior, pero con la diferencia de que las pendientes de respuestas son similares en los GM. En octubre la duración promedio fue de **105 días** y en enero se reduce a **79 días**. Fig. 9b.



**Figura 9:** Tendencia de duración promedio de a) VE a R1 y de b) R1 a R8 según FS y GM (Campaña 2002/03 al 2020/21) Campo Escuela, FCA-UNC. (31°19'LS, 64°13'LV) (Toledo, 2021)

*“El atraso en la FS reduce los ciclos de los diferentes GM, tanto por un acortamiento de la etapa vegetativa como también de la etapa reproductiva.”*

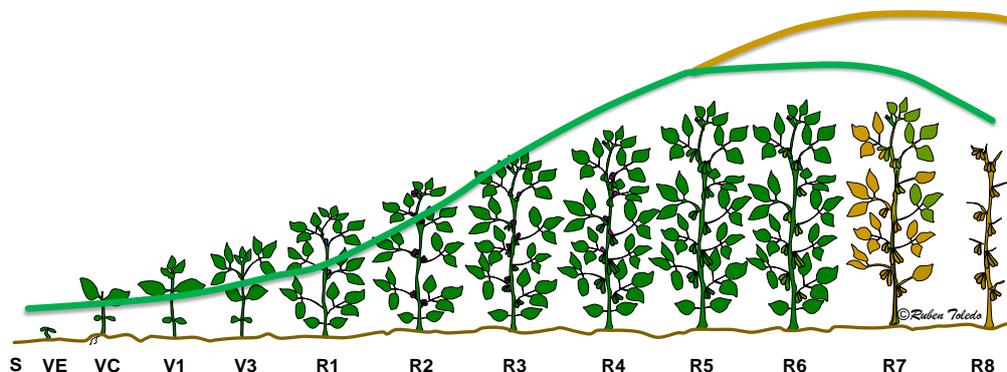
## CRECIMIENTO

El crecimiento comienza con la germinación de la semilla, y ocurre cuando absorbió entre el **30-40%** (Sadras *et al.*, 2000) y el **50-55%** de su peso en agua (Baigorri, 1997). La

tensión hídrica del suelo no puede ser menor que **-6,6 bares** para que germine la semilla dentro de los 5-8 días a una temperatura de **25°C**. (Hicks, 1983).

Durante el desarrollo de la semilla, se diferencian en el embrión al menos tres hojas, las **dos unifoliadas y la primera trifoliada** y sus respectivas yemas. Entre germinación-VE, se reanuda la diferenciación de hojas en el meristema apical -1 y 2 hojas más- Luego de VE el proceso continúa en el ápice del tallo principal, hasta que el meristema apical cambia al estado reproductivo. A partir de los **meristemas axilares** también se diferencian estructuras vegetativas, por lo tanto, en muy poco tiempo el número de hojas potenciales diferenciadas es muy elevado. En cuanto a la diferenciación floral, la transición interna del estado vegetativo al reproductivo incluye dos eventos importantes: a) La iniciación floral (en un meristema axilar) y b) La transformación del ápice. Dentro del tallo principal, la diferenciación comienza en un nudo ubicado en una posición intermedia del tallo principal, y progresa hacia yemas axilares de nudos superiores e inferiores. En la etapa reproductiva coexisten órganos con diferente estado de desarrollo (flores, vainas y granos) de forma tal que la fase de floración (definida como el tiempo entre R1 y la apertura de la última flor) se superpone con la fase de fructificación (cuando se forman nuevas vainas) ([Kantolic, 2008](#))

A través de una curva sigmoidea puede representarse la acumulación de materia seca -crecimiento- y se la puede dividir en tres momentos: a) comienza con una etapa de **crecimiento vegetativo lento** hasta **R1**, donde predomina el desarrollo del área foliar; b) le sigue una etapa de **crecimiento lineal acelerado** hasta **R5**, y que corresponde a la formación de hojas, tallos, flores y vainas. A partir de R5 el **crecimiento vegetativo disminuye**, pero con un crecimiento reproductivo lineal que culmina con el amarillamiento y caída de hojas **-R7-**. En la etapa final de llenado de granos el crecimiento reproductivo se produce a menor tasa. (Fig. 10).

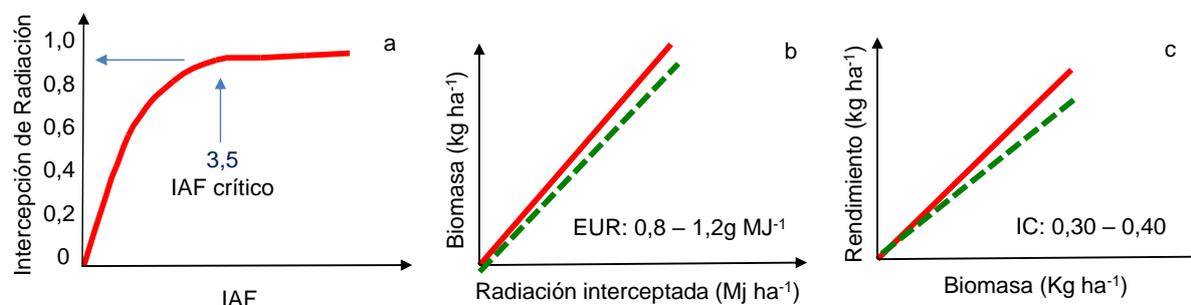


**Figura 10:** Acumulación de materia seca durante el ciclo. (Desde R5 la materia seca es planta + vainas y granos)

La asimilación del carbono, puede medirse mediante la acumulación de materia seca del cultivo, esto se denomina tasa de crecimiento del cultivo (TCC), generalmente solo se incluye la parte aérea, debido a las dificultades para medir las raíces, dicha TCC está estrechamente relacionada a la intercepción de radiación solar, la que a su vez depende del IAF.

La TCC aumenta a medida que aumenta el IAF hasta que alcanza un valor crítico capaz de interceptar el 95% de la radiación solar incidente, esto se conoce como **IAF crítico** y su valor promedio es de **3,5** (Fig. 11a) y depende de la estructura de la planta -cultivar-, que a su vez depende de la FS y el GM; la densidad de siembra y el espaciamiento entre surco son otras variables que influyen sobre la estructura final de la planta. La soja puede alcanzar IAF muy altos, sin embargo, la TCC no disminuye, (Baigorri, 1997) lo que significa que las hojas sombreadas no son parásitas para la planta. (Shibles et al., 1965).

Si el cultivo no logra alcanzar el IAF crítico en el período crítico de generación de rendimiento, la primera consecuencia es su menor eficiencia en la captación de la radiación, esto lleva a una menor radiación interceptada por lo tanto la biomasa disminuye (Fig. 11b). Con respecto a la relación entre rendimiento y biomasa, se la representa a través del índice de cosecha (IC) cuyos promedios se observan en la Fig. 11c, el mayor IC lo registran aquellos GM productivos sembrados en FS óptimas. La variación del IC va a depender del GM y la FS, por ejemplo.



**Figura 11:** a) Relación entre a) el Índice de área foliar (IAF) y la intercepción de radiación, b) la radiación interceptada y la Biomasa producida y c) Relación entre la biomasa producida y el rendimiento

## GENERACION DE RENDIMIENTO

Del total de recursos que se incorporan al sistema, una parte se destina a órganos vegetativos (raíces, tallos y hojas) y sólo una proporción de la biomasa, representada por el **IC**, es lo que finalmente compone el rendimiento. Estos conceptos se resumen en una **ecuación ecofisiológica**, que describe la relación entre generación del rendimiento y la captura y uso de recursos por parte del cultivo:

$$\text{Rendimiento} = \text{Rinc} \times \text{Ei} \times \text{EUR} \times \text{IC} \quad \text{o} \quad \text{Rendimiento} = \text{Biomasa} \times \text{IC}$$

Donde **Rinc** es la radiación incidente o disponible, **Ei** es la eficiencia de intercepción de la radiación fotosintéticamente activa y está condicionada por el IAF; **EUR** es la eficiencia de uso de la radiación y representa la capacidad de la planta de producir biomasa, por cada unidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada. Ambas eficiencias, principalmente **Ei**, está directamente ligada a la disponibilidad de agua y nutrientes, por lo tanto, las prácticas de manejo contribuyen principalmente al aumento de la cantidad de recursos disponibles para las plantas. Por otro lado, existe una **ecuación numérica** para definir el rendimiento y está formada por dos variables:

$$\text{Rendimiento} = \text{Número de granos por unidad de superficie} \times \text{Peso de granos (g)}$$

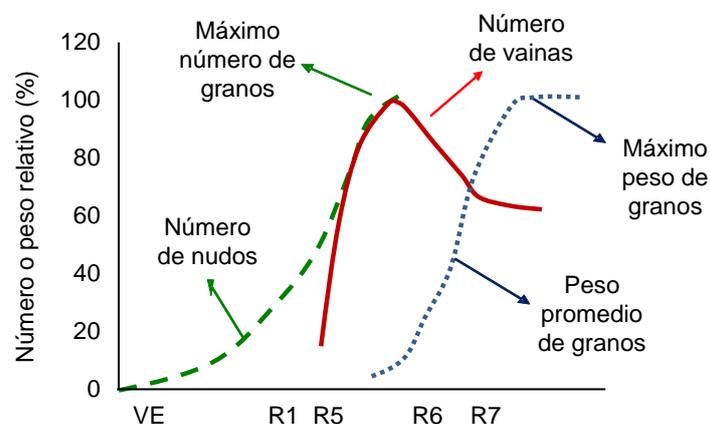
En la Fig. 12 se observa la evolución del **número de granos**, que según Kantolic et al., (2004) se divide principalmente en tres subcomponentes:

- a) **número de nudos:** que comienzan a definirse en el tallo principal desde VE y continua hasta luego de R1.
- b) **número de vainas por nudo:** que se inicia a partir de R3, continuando su desarrollo y crecimiento hasta su transformación en estructuras florales maduras, la fecundación y el cuaje.

- c) **número de granos por vaina:** dicho número es más estable que los demás subcomponentes ante variaciones ambientales, aunque uno o más granos de una vaina pueden abortar antes de ingresar en su fase de llenado efectivo, modificando el número de granos por vaina (Egli, 1998).

En resumen, a lo largo del ciclo se van generando secuencialmente dichos subcomponentes, los cuales están condicionados por TCC y la cantidad de asimilados disponibles (provenientes de la fuente fotosintética) los que, a su vez, están regulados por las condiciones ambientales (Kantolic et al., 2004).

Con respecto **peso de los granos** comienza a definirse en R5. Las principales diferencias de peso entre genotipos son atribuibles a diferencias en la tasa de crecimiento de los granos la cual es sensible a factores ambientales (Kantolic et al., 2004). Sin embargo, gran parte de las variaciones ambientales (como por ejemplo déficit hídrico) afectan el tamaño y no su tasa de crecimiento, debido a cambios en la duración del período efectivo de llenado (Egli, 1998). (Fig. 12)

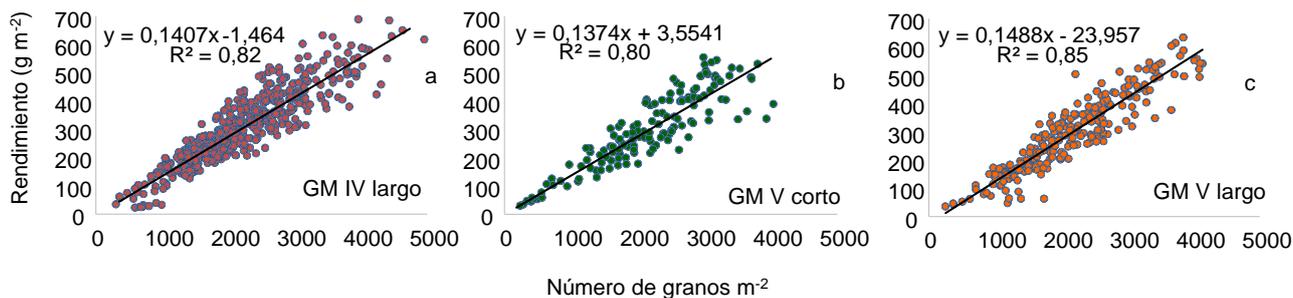


**Figura 12:** Evolución de los componentes del rendimiento. Fuente: Ergo, 2013.

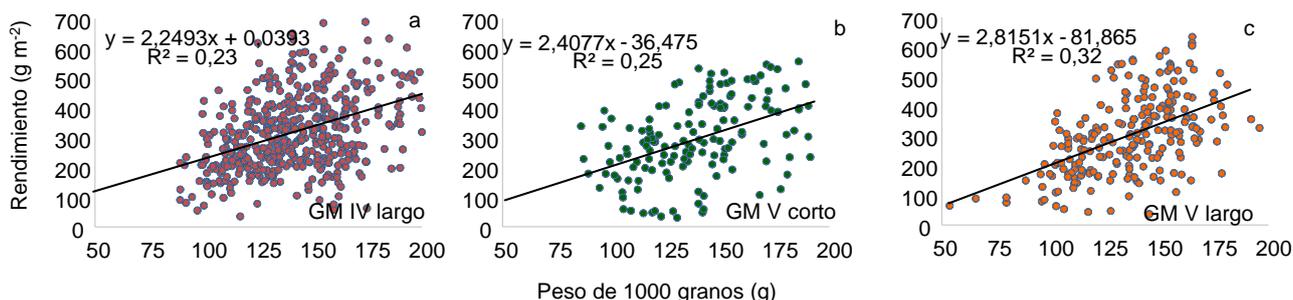
Si bien existen compensaciones entre estos componentes, guardan cierta independencia entre sí, que permite suponer, que un aumento en cualquiera de los dos componentes aumenta el rendimiento. Sin embargo, en un rango amplio de condiciones agronómicas, el **número de granos** es el que mejor explica las variaciones en la productividad.

Basado en una experiencia desarrollada en un lugar representativo del centro de Córdoba, se observa la interacción del rendimiento con sus componentes numéricos, donde para los GM analizados, la variación de la productividad está explicado por la modificación del número de granos en más de un 80%. El mayor porcentaje correspondió al GM V largo (Fig. 13a, 13b y 13c).

Con respecto al otro componente numérico del rendimiento, la influencia del peso de los granos influyó en porcentajes superiores al 20% en la productividad de los GM de estudio. El mayor porcentaje se observó en el GM V largo (32%) (Fig. 14a, 14b y 14c).



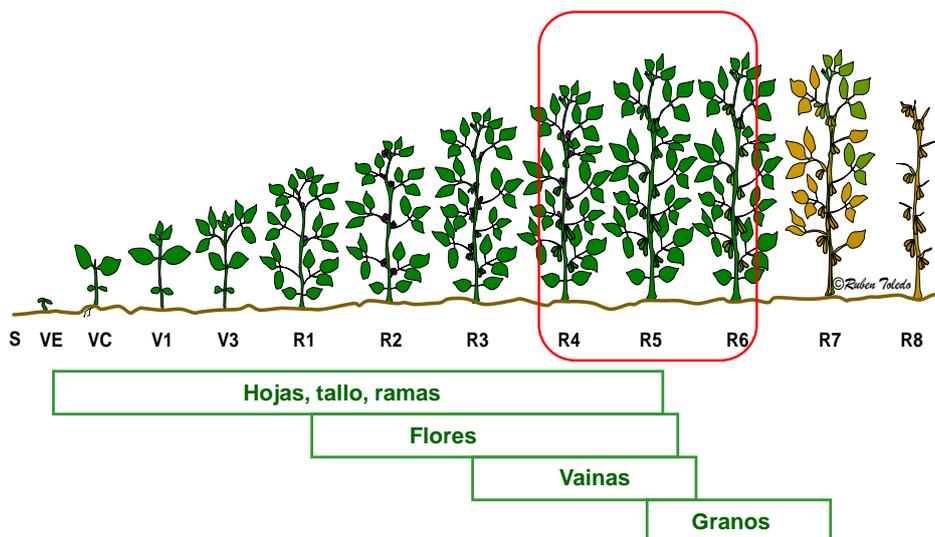
**Figura 13:** Relación del rendimiento y el número de granos  $m^{-2}$  en a) GM IV largo b) GM V corto y c) GM V largo durante las campañas 2002/03 al 2020/21. Campo Escuela, FCA-UNC. ( $31^{\circ}19'LS$ ,  $64^{\circ}13'LV$ ) Fuente: Toledo, 2021.



**Figura 14:** Relación del rendimiento y el peso de los granos en a) GM IV largo b) GM V corto y c) GM V largo durante las campañas 2002/03 al 2020/21. Campo Escuela, FCA-UNC. ( $31^{\circ}19'LS$ ,  $64^{\circ}13'LV$ ) Fuente: Toledo, 2021.

## PERÍODO CRÍTICO

Existe un período durante el ciclo del cultivo que, dependiendo del momento, intensidad y duración del estrés, afectará en mayor o menor grado, la definición final del rendimiento. Dicho período es denominado **periodo crítico** y se encuentra entre **R4 a R6**, es decir cualquier adversidad que ocurra alrededor de **R5** afectará el rendimiento. (Fig. 15)



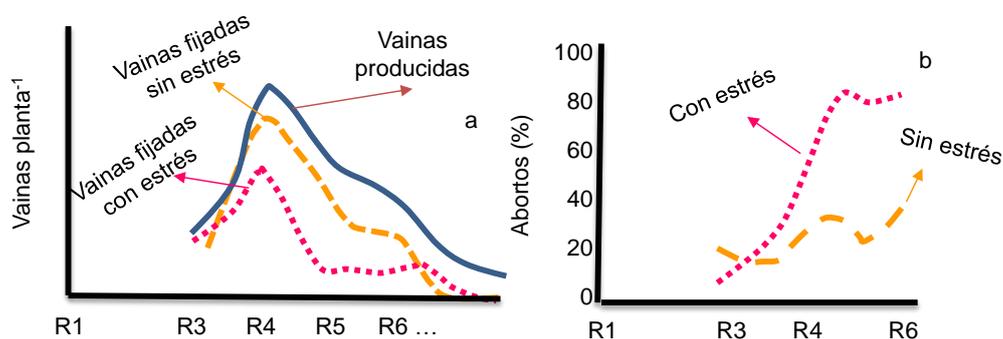
**Figura 15:** Esquema del ciclo ontogénico, señalando la “aparición” de las diferentes estructuras de la planta.

Según [Kantolic, \(2013\)](#), durante el período crítico:

- Finaliza la aparición de nudos y la expansión foliar.

- Aparecen flores.
- Las flores progresan en vainas o mueren.
- Las vainas jóvenes progresan o mueren.
- Se forman los granos, que progresan o mueren.
- Las vainas y granos crecen.

La evolución normal de vainas planta<sup>-1</sup> llega a su número máximo en R4, normalmente ocurre que un porcentaje de vainas abortan, sin que ocurra estrés, si este fuera térmico y ocurriera a partir de R4 (temperatura superior a 40°C, por ejemplo) disminuye el número de vainas por aborto, normalmente en promedio se produce un aborto del 20% de las vainas sin situación de estrés, pero cuando este ocurre puede llegar a un 80% de pérdida. (Fig. 16a y Fig. 16b)



**Figura 16:** a) Evolución del número de vainas planta<sup>-1</sup> a partir de las vainas producidas y su fijación con estrés y sin estrés durante el período crítico. b) % de aborto promedio ante una situación de estrés y sin estrés durante el período crítico. Fuente: [Kantolic, 2013](#)

Durante el período crítico, se maximiza la producción y se define la supervivencia de los subcomponentes del número de granos mencionado más arriba. Esta supervivencia, está íntimamente asociada a la disponibilidad de asimilados presentes en la fuente fotosintética de las plantas. Cuando ocurren variaciones en la fotosíntesis durante el período crítico puede existir un efecto compensatorio entre el peso de los granos y el número de los granos, si aún este último no está completamente establecido. (Kantolic et al., 2004). Sin embargo, a medida que se avanza en el ciclo ontogénico, particularmente durante el período de llenado de granos, el número de granos va siendo fijado y la capacidad de compensación frente a situaciones de estrés disminuye al mismo tiempo que las pérdidas de rendimiento se incrementan (Egli, 1998) Si luego de R5 mejoran las condiciones ambientales, el peso de los granos puede aumentar, pero las compensaciones son parciales y queda determinado un menor rendimiento.

## BRECHAS DE RENDIMIENTO

El **rendimiento potencial**, es el rendimiento sin limitantes de agua y el estrés biótico se controla eficazmente. Cuando se cultiva en condiciones que pueden alcanzar dicho rendimiento potencial, la tasa de crecimiento del cultivo está determinada solo por la radiación solar, la temperatura y el CO<sub>2</sub> atmosférico, y rasgos genéticos que gobiernan la duración del período de crecimiento y la interceptación de la luz. El rendimiento potencial es específico de un determinado ambiente no es estático ni atemporal, varía en el espacio (latitud, longitud y altitud de un lugar, con determinados valores promedio de radiación y temperatura) y en el tiempo (nuevos cultivares rinden más en función del progreso genético);

pero en teoría no depende de las propiedades del suelo, asumiendo que el agua y los nutrientes necesarios se pueden agregar mediante el manejo (lo que, por supuesto, no es práctico ni rentable en los casos en que las limitaciones importantes del suelo, como la salinidad o las barreras físicas a la proliferación de raíces -presencia de tosca-).

El rendimiento limitado por agua, equivale al **rendimiento potencial en seco**, cuya definición es similar al rendimiento potencial, pero el crecimiento del cultivo está limitado por el suministro de agua. El **rendimiento real** o alcanzado se define como el rendimiento realmente logrado por el productor, en una región geográfica definida (en espacio y tiempo) alcanzado bajo las prácticas de manejo más ampliamente utilizadas (FS, GM, arreglo espacial, manejo de plagas y malezas, correcto diagnóstico de los nutrientes, etc).(Fig. 17)

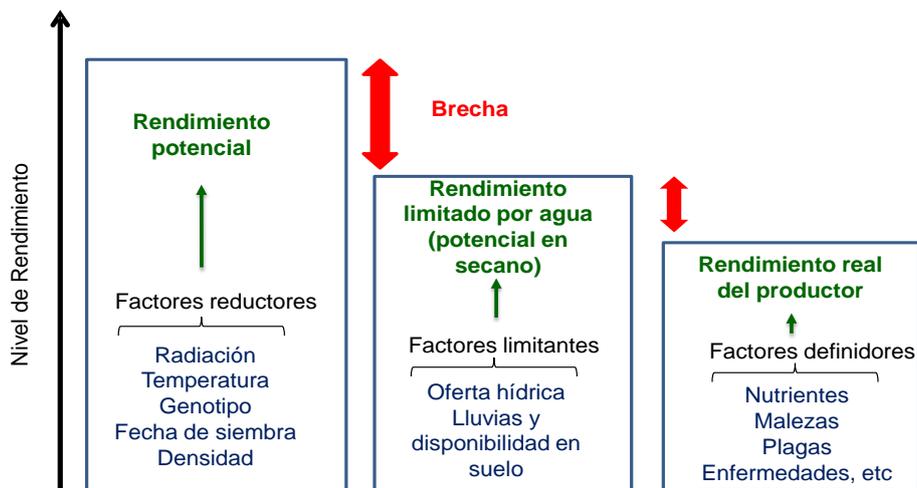


Figura 17: Diferentes niveles de producción determinados por factores que definen, limitan y reducen el crecimiento. Fuente: Van Ittersum, et al., 2013

En general, el impacto o influencia de una práctica de manejo agronómico será mayor, en la medida que la brecha de rendimiento sea mayor, esto ocurre cuando las brechas superan al 20%. Dichas brechas se pueden obtener:

$$\frac{(\text{Rendimiento potencial} - \text{Rendimiento potencial en seco})}{\text{Rendimiento potencial}}$$

$$0$$

$$\frac{(\text{Rendimiento potencial en seco} - \text{Rendimiento real})}{\text{Rendimiento potencial en seco}}$$

Finalmente se puede establecer que en Argentina el rendimiento potencial promedio de soja es de **62 qq ha<sup>-1</sup>**, el rendimiento potencial promedio en seco (limitante agua) es de **39 qq ha<sup>-1</sup>**, y el rendimiento real promedio es de **27 qq ha<sup>-1</sup>**.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Andrade, F. y Cirilo, A. (2000) Fecha de siembra y rendimiento de los cultivos. *Bases para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. F. Andrade y V. Sadras (Eds), Buenos Aires. pp 135-150.
- Baigorri, H. (1997) Ecofisiología del cultivo. *El cultivo de la soja en Argentina*. L. Giorda y H. Baigorri (Eds), Córdoba pp 31-49

- Baigorri, H. (2009) Manejo del cultivo de Soja. *Manual de manejo del cultivo de Soja*. 1<sup>ra</sup> edición. F. Garcia, I. Ciampitti y H. Baigorri (Eds) Buenos Aires. pp 17-32.
- Cober, E., Stewart, D. y Voldeng, H. (2001) Photoperiod and temperature responses in earlymaturing, near-isogenic soybean lines. *Crop Sci.* 41, 721-727
- Egli, D. and W, Bruening. 2006. Temporal profiles of pod production and pod set in soybeans. *Europ. J. Agronomy* 24: 11-18.
- Hicks, D. (1983) Crecimiento y desarrollo. *Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja*. Ed: Norman G. pp 19-43.
- Jones, J., Boote K. and Jagtapl, S. (1991) Soybean development. *Modelling plant and soil systems*. Hank, J. & Ritchie J. Madison (Eds) v.31, ASA, CSSA, SSSA, pp 71-90.
- Kantolic, A., Giménez, P. y De la Fuente E. (2004) Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad de soja. *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. 2<sup>da</sup> edición. A. Pascale (Ed) Buenos Aires. pp 167-195.
- Kantolic, A., y Satorre, E. (2004) Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. En: *Manual práctico para la producción de soja*. 1ra edición. M. Díaz Zorita y G. Duarte (Eds), Buenos Aires. pp 19-37.
- Miralles, D., Windauer, L. y Gomez, N. (2004) Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. 2<sup>da</sup> edición. A. Pascale (Ed), Buenos Aires. pp 60-70.
- Sadras, V., Ferreiro, M., Gutheim, F. y Kantolic, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. *Bases para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. F. Andrade y V. Sadras (Eds) Buenos Aires. pp 19-39.
- Salado Navarro, L. 2012. Ecofisiología de Soja. *El cultivo de soja en Argentina*. 1ra edición. H. Baigorri y L. Salado (Eds) Buenos Aires. pp 83-104.
- Salvagiotti, F. (2016) Rendimientos potenciales y brechas de rendimiento de soja en la campaña 2014-15. *Rev. Para mejorar la producción n°54*. INTA EEA Oliveros. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/53738/CONICET\\_Digital\\_Nro.ccf975e8-e815-4a60-925c-1761e7640c7c\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/53738/CONICET_Digital_Nro.ccf975e8-e815-4a60-925c-1761e7640c7c_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Whigham, D. and H. Minor. 1983. Características agronómicas en relación con el estrés ambiental. *Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja*. Norman G. Michigan (Eds) pp 79-119.