

# Evaluación fotogramétrica de la longitud del mesocótilo de híbridos de maíz para su utilización en modelos de simulación

A. D. Blasón, A. Mollá Kralj, M. B. Barrios y R. O. Rodríguez

## RESUMEN

Durante la germinación del maíz (*Zea mays* L.) la porción media del embrión, conocida como mesocótilo, es la encargada de elevar al coleoptilo a la superficie. Para modelar este proceso durante el subperiodo germinación-emergencia es necesario asumir que la plántula incrementa el largo del mesocótilo en función de la temperatura, la humedad del medio y de su longitud previa antes de agotar sus reservas. El objetivo planteado es conocer si la longitud embrional del mesocótilo del maíz, o longitud inicial de modelado, presenta diferencias significativas intra e inter híbridos comerciales, en procura de mejorar el modelamiento de la etapa inicial del cultivo. Se indagó sobre la población de híbridos comerciales en Argentina durante el periodo 1964 al 2019, tomando aleatoriamente una muestra representativa sobre la que se realizó el estudio de la longitud mediante una técnica fotogramétrica. Resultó destacable que la longitud embrional del mesocótilo del maíz puede considerarse como una magnitud significativamente invariable de 1,78 mm (+/- DE = 0,01). Emplear una longitud de mesocótilo seminal constante simplifica su aplicación en modelos de simulación de cultivos, y evita incorporar la información particular de cada híbrido.

**Palabras clave:** Embrión, medición, modelamiento, fotografía digital.

A. D. Blasón, A. Mollá Kralj, M. B. Barrios and R. O. Rodríguez, 2020. Photogrammetric assessment of the mesocotyl length of corn hybrids for use in simulation models. RADA XI: 63-70

## SUMMARY

During the germination of corn (*Zea mays* L.) the middle portion of the embryo, known as mesocotyle, is responsible for raising the coleoptyle to the land surface. To model the germination-emergence sub-period process, it is necessary to assume that a seedling increases its elongation as a function of temperature, humidity of the medium and its previous length before it exhausted its reserves. The aim of this investigation is to know if the embryonic length of the maize mesocotyle, or initial modeling length, presents significant differences between intra and inter commercial hybrids, in view of improve over the initial modeling of the crop. The population of commercial hybrids in Argentina was investigated during the period 1964 to 2019, taking from it a representative random sample on which the length study was carried out using

a photogrammetric technique. The embryonic length of the maize mesocotyle can be considered as a significantly invariant magnitude of 1.78 mm ( $\pm$  SD = 0,01). Using this value as a constant in crop simulation models simplifies its application, avoiding the incorporation of this particular information for each hybrid.

**Key words:** Mesocotyle, length, hybrids, modeling, photogrammetry.

A. D. Blasón y R. O. Rodríguez: *Cátedra de Agrometeorología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ruta 4, km. 2, Llavallol (1836), Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. Tel. 0114 2826263/7905.* A. Mollá Kralj: *Cátedra de Ecología y Fitogeografía.* M. B. Barrios: *Cátedra de Edafología. Correspondencia a: adblason@yahoo.com*

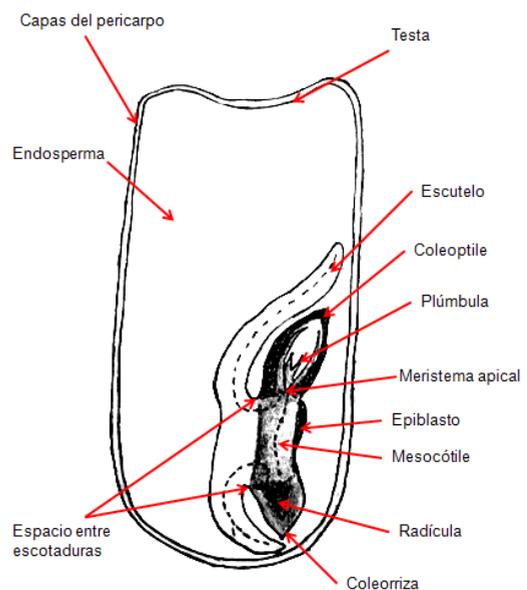
El maíz (*Zea mays* L.) presenta un alto potencial de crecimiento y rendimiento, pero con restringida elasticidad frente a factores ambientales de estrés. Por este motivo, el cultivo cuenta con una gran capacidad de respuesta biológica a un manejo adecuado, como el riego y la aplicación de fertilizantes e insumos en general (Andrade, 1996).

El grano de maíz, botánicamente considerado cariopse, presenta formas variadas dependiendo de su ubicación en la espiga y a la raza a la cual pertenezca. A pesar de esto, en todos los frutos de una misma inflorescencia, el embrión no muestra variaciones en su tamaño (Andrade, 1996). En la porción media del embrión y coincidente en longitud al espacio entre escotaduras, encontramos al mesocótilo (Figura 1); órgano encargado, al momento de la germinación, de elevar al coleoptilo a la superficie.

El alargamiento del mesocótilo desde germinación a emergencia, es dependiente de su tasa de elongación; la cual se ve influenciada principalmente por su desarrollo previo y por la condición de temperatura y humedad del suelo en que transcurre.

Del ambiente térmico a nivel de energía bioquímica como cofactor de procesos, en tanto que la nueva plántula responde en función de la temperatura circundante (Blasón *et al.*, 2002/03), para su modelamiento se puede considerar mediante un índice en relación a las temperaturas cardinales del cultivar y del propio medio de siembra.

La influencia de naturaleza hídrica resulta del contenido de agua disponible del suelo circundante a las raíces y pelos absorbentes de la plántula, por



**Figura 1:** Estructura del embrión de maíz.

donde deberá ser absorbida para cumplir con los procesos metabólicos de división y de turgencia celular fundamental durante su elongación.

La longitud del mesocótilo comienza a incrementarse desde un valor inicial ( $i_0$ ) que se corresponde anatómica y fisiológicamente con el tamaño alcanzado por el mesocótilo del embrión dentro del grano embebido previo al proceso de germinación.

La modelación del proceso anteriormente mencionado asume que una plántula durante el

subperíodo germinación-emergencia incrementa su elongación según la temperatura y humedad del medio en función de su longitud antes de agotar sus reservas, sin considerar en este caso la impedancia del suelo (Blasón, datos no publicados).

Los modelos de simulación de cultivos han ganado prestigio y utilización en los últimos años (Archontoulis *et al.*, 2014; Battisti *et al.*, 2018; Hoogenboom *et al.*, 2019; etc.), debido a la simplificación experimental que brindan en relación a las buenas estimaciones logradas al evaluar diferencias producidas sobre el rendimiento y sus causas, como consecuencia del ambiente y el manejo como variables.

Las diferencias entre los modelos utilizados para representar el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo del maíz en particular, pero que alcanzan en forma similar a todos los cultivos, se basan en el tipo y complejidad de los procesos agrometeorológicos evaluados y representados numéricamente por cada uno de ellos. Entre los mismos, se destacan sistemas como el DSATT (Jones *et al.*, 2003), que cuenta con el modelo CERES-*maize* específico para maíz (Jones y Kiniry, 1986), siendo uno de los más completos y ampliamente conocido. Otros modelos de simulación son el EPIC (Williams *et al.*, 1989), RZWQM (Ahuja *et al.*, 2000), APSIM (Keating *et al.*, 2003), AQUA-CROP (Steduto *et al.*, 2009), MONICA (Nendel *et al.*, 2011), etc. Todos ellos con mayor o menor difusión son utilizados y se encuentran en continua evolución.

Por otra parte, en los últimos años con los notables avances tecnológicos se observó una enorme disponibilidad de mediciones digitales y registro de grandes volúmenes de información. En el dominio de la histología y la fenometría vegetal, diversas magnitudes como el color, forma, tamaño, etc. de diversos órganos y tejidos resultan ser determinaciones rutinarias en los trabajos de investigación. Las técnicas de medición tradicionales en general revisten un elevado grado de complejidad y laboriosidad; siendo en ocasiones costosas debido al equipamiento necesario.

El gran desarrollo en captura y procesamiento digital de imágenes, provee actualmente de nuevas herramientas de interpretación aplicables sobre fotografías digitales generadas con cámaras de uso corriente (de la Casa *et al.*, 2010 a,b; Purcell, 2000). La utilización de imágenes digitales para el análisis y el registro de datos, ofrece una alternativa viable, relativamente accesible y de fácil aplicación, conservando a su vez la posibilidad

de re-análisis de las muestras. A partir del uso de cámaras digitales, la fotogrametría permite la obtención de la información utilizada en los estudios fenológicos (fenoscópicos y fenométricos) y bioclimáticos, como así también para desarrollar modelos de crecimiento y desarrollo (Serritella *et al.*, 2014). Adicionalmente, la utilización de técnicas fotogramétricas en histología resulta de gran valor, debido a que permite aumentar la velocidad de medición y procesamiento, mientras que se reducen errores sistemáticos como la deshidratación de los tejidos en contraposición a las técnicas tradicionales.

La modelización de cultivos y en especial de aquellos que revisten mayor importancia económica, resulta una herramienta fundamental para llevar a cabo una apropiada planificación agrícola. El modelo como representante de una infinitamente compleja realidad nos resume adecuadamente según su enfoque y detalle las variables e interacciones de mayor influencia de esa realidad en el proceso que se esté considerando.

Para el caso de la modelación del nacimiento del cultivo de maíz, Blasón, *et al.*, 2002/03; hallaron experimentalmente que durante la fase de germinación la temperatura base y el tiempo térmico se mantienen constantes al evaluar distintas profundidades de siembra, resultando en promedio de 5,4 °C con un c.v. de 2,3 % y de 35,6 °Cd con un c.v. de 0,7 % para el híbrido ensayado. Por el contrario, en el sub período germinación-emergencia, la temperatura base, el tiempo térmico y la tasa térmica de elongación mostraron un incremento no lineal con la profundidad; lo que evidencia la falta de representación del modelo lineal al variar las constantes térmicas. Esto implica que esta etapa se cumple aceleradamente al menos cierto tiempo en el intento de la plántula por alcanzar la superficie para pasar a ser autótrofa y garantizar su supervivencia. Considerar esto hace posible introducir una mejora en la etapa inicial, comprendida en el sub período siembra-emergencia, pero resulta sensible a errores de pronóstico si el valor inicial no resulta correcto al aplicarlo a un modelo no lineal acumulativo.

La longitud del mesocótilo embrional es un valor inicial apropiado para este modelamiento, esto hace necesario y justifica caracterizar correctamente su valor medio y su variabilidad. Conocer si se comporta como constante o variable entre las semillas de un híbrido o entre híbridos es crucial dado que una pequeña variación en ella puede provocar un gran cambio en la predicción de longitud final de la plántula, lo cual se refleja principalmente en errores de pronóstico

para el momento de emergencia. De resultar constante el largo del mesocótilo embrional entre híbridos, implicaría una simplificación al modelar constante esta característica del maíz, en general consideradas como coeficientes genéticos (Jones y Kiniry, 1986; Boote, 1999).

Para que el estudio propuesto en este trabajo resultara verdaderamente representativo, se indagó sobre la población de híbridos comerciales disponibles en Argentina, utilizando para ello la base de datos del catálogo nacional de cultivares del Instituto Nacional de Semillas (INASE) durante su mayor periodo registrado (01/01/1964 al 31/07/2019), hallándose 1.367 híbridos de maíz, siendo el más antiguo precedente del año 1980.

Definida así la población a considerar, se procedió a realizar un muestreo aleatorio simple en dos pasos. En primer lugar, se sortearon entre el total antes mencionado 20 híbridos para confeccionar una pre muestra poblacional y posteriormente se procedió al ajuste del tamaño muestral ( $n$ ), representativo de toda la población, mediante la correspondiente ecuación 1.

Para estimar al total de la población:

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad (1)$$

Donde:  $n_0 = \left(\frac{t \cdot S}{d}\right)^2$

Siendo:

$n$  = tamaño mínimo muestral para estimar una población ajustada por su  $N$ .

$n_0$  = tamaño mínimo muestral para estimar una población desconociendo su tamaño.

$N$  = tamaño de la población

$t$  = valor tabular de la distribución  $t$  de Student, con grados de libertad igual al divisor de  $S^2$  y con  $(1-\alpha/2)$  como nivel de probabilidad.

$S$  = desvío estándar obtenido de muestreos previos de la misma población.

$d$  = margen de error permitido en la estimación, fijado por el experimentador. En este caso medio intervalo de confianza al 1%, expresado en mm (Pereyra *et al.*, 2003).

Las muestras de semillas obtenidas para su análisis no se encontraban calibradas por tamaño de siembra, por lo tanto, también representan las variaciones morfológicas existentes en los distintos estratos de las espigas de maíz.

Para realizar las mediciones se practicaron entre 70 y 90 cortes longitudinales de cariopses

por cada híbrido evaluado. Posteriormente observados con lupa manual, fueron separados 30 cortes por híbrido que mostraran claramente las estructuras a evaluar, eligiendo preferiblemente aquellos en donde los embriones se encontraban en la posición longitudinal óptima para su estudio. Debido a la dureza del pericarpo, fue necesario realizar un ablandamiento previo a la realización de los cortes, pero considerando que la imbibición no pusiera en marcha el proceso de germinación; para ello la técnica apropiada consistió en sumergir a los cariopses en agua en ebullición (aproximadamente 100 °C) durante 20 minutos.

Sobre las muestras a medir, se realizó una tinción directa y sin lavado posterior con "fast-green" diluido al 50% con agua desionizada (D'Ambrogio, 1986). Los tejidos embrionales conformados por pared primaria, adquirieron con esta técnica una coloración celeste-verdosa presentando el contraste necesario para ser fotografiados y medidos, ejemplo de esto puede ser apreciado en la Figura 2. Para minimizar el efecto de deshidratación desigual entre las muestras y la consecuente modificación de longitudes en el embrión, se realizaron simultáneamente el corte, la coloración y la captura digital de a diez frutos a la vez (Figura 3).



**Figura 2:** Cariopse luego de la tinción.



**Figura 3:** Toma de imagen de muestras simultaneas.

Las imágenes se tomaron utilizando una cámara digital sin zoom de 29 mm de distancia focal y con una resolución de 6,0 Mp (2112 x 2816 pixeles). Se sujetó la cámara a un soporte posicionando su lente hacia abajo paralela al plano horizontal a una distancia de 100 mm respecto a las muestras. En la misma condición se fotografió la escala (0 -150 mm) de un calibre tipo "Vernier o Pie de Rey" normalizado, la cual posteriormente se utilizó como referencia fotogramétrica para las mediciones sobre las fotografías de los cortes en la misma escala. Para ello habiendo tomado todas las fotografías de las muestras con un mismo instrumento y a distancia fija, se realizó en la misma condición las fotografías correspondientes al patrón. Esto último, permitió establecer la relación entre la unidad física de longitud y el número de pixeles, lo cual permitió medir rápidamente y con precisión todos los embriones. Por otra parte, se tomaron cinco fotografías adicionales al calibre durante distintos momentos del procesamiento de las muestras. Dicho procedimiento se realizó para corroborar que la escala se mantuvo invariable, garantizando así la estabilidad de la cámara fotográfica y la uniformidad de las imágenes obtenidas.

Las imágenes digitales fueron obtenidas originalmente en formato tipo JPEG, y posteriormente convertidas al formato RST, a los efectos de su análisis mediante el software IDRISI (Eastman, 1993). Utilizando la herramienta de medición de longitud "measure length" del software, se procedió a medir la longitud de los mesocótilos, trazando un vector por sobre el espacio correspondiente a la escotadura embrional de cada corte (Figura 4).



**Figura 4:** Medición fotogramétrica del mesocótilo embrional en un caripose de maíz.

Los análisis estadísticos fueron realizados con el software Infostat versión 2018 (Di Rienzo *et al.*, 2018).

La muestra poblacional resultó en el listado de 20 híbridos presentados en la Tabla 1, evaluando 30 cortes por híbrido para totalizar 600 casos observados.

**Tabla 1:** Nombre de los híbridos analizados.

Nº	Semillero	Híbrido	Origen
1	Cargill	Cargill 260	Argentina
2	Pioneer	35R58	Estados Unidos
3		BG6502Y	Argentina
4	Nidera	Nidera AX882HCL	Argentina
5		Nidera AX 7761 VT3P	Argentina
6		Nidera AX887GA21	Argentina
7	M.S. Technologies	STINE 9808E-20	Estados Unidos
8	Dow	Dow 2E464MXRR2	Argentina
9		F6050	Argentina
10	Syngenta	DUO 565PW	Argentina
11		126 TG PLUS	Brasil
12		SY900 VIPTERA3	Argentina
13	Pannar	PAN 6220 CL	Sudáfrica
14	Illinois	I-550VT3P	Argentina
15		799VT3P	Argentina
16	Tropicorn	AGRI-201	Argentina
17	Monsanto	DKB 390 YG	Brasil
18	Limagrín	LGSA 30853 VT3P	Argentina
19	Quimarsem	QUIMARSEM 518BT	Argentina
20	Dekalb	DK 648	Argentina

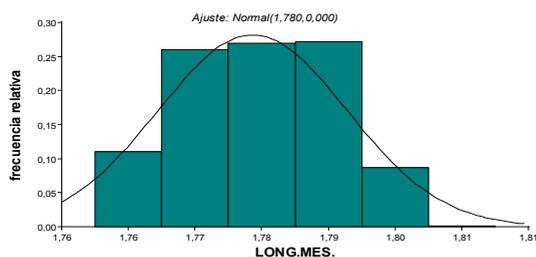
Dicha muestra resultó suficiente y mayor al tamaño mínimo representativo según fue estimado con la ecuación (1); el reducido tamaño muestral requerido fue debido a la muy baja variabilidad entre los valores observados; los parámetros de su cálculo son presentados en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Parámetros utilizados para el ajuste del muestreo poblacional.

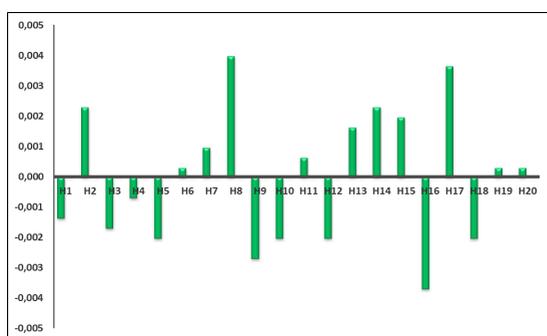
N	t (0,05)	S	d	n <sub>0</sub>	n
1367	2,10982	0,011556	0,01	5,944731	5,91899

El análisis de las medidas generales, arrojó un promedio igual a la mediana de la longitud embrional del mesocótilo del maíz de 1,78 mm; con un CV  $\leq$  0,65 %, entre un valor mínimo de 1,76 y máximo de 1,81 mm., la frecuencia relativa para cada valor es presentada en la Figura 5.

Por otra parte, las medidas particulares por híbrido pueden observarse en la Tabla 3; y las diferencias existentes entre los promedios de cada híbrido y el promedio general se presentan en la Figura 6.



**Figura 5:** Frecuencia de las longitudes de los mesocótilos observados, y su ajuste teórico a una distribución normal con los parámetros calculados.



**Figura 6:** Gráfico de las diferencias de longitud del mesocotile embrional del maíz en milímetros para cada híbrido evaluado respecto de la media general del experimento (eje abcisas).

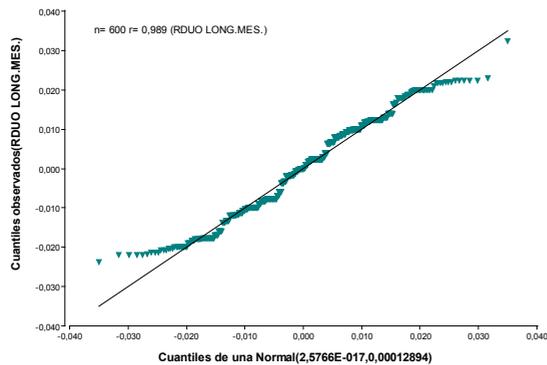
El análisis de la varianza es sensible a las propiedades estadísticas de los términos de error aleatorio del modelo lineal. Los supuestos tradicionales del ANOVA implican errores independientes, normalmente distribuidos y con varianzas homogéneas para todas las observaciones (Balzarini, 2008). Bajo estos supuestos, se realizó el test de Shapiro-Wilks, arrojando un valor  $W^* = 0,97$  por lo que se acepta la normalidad de los datos. Un análisis más detallado que permite observar el alejamiento de cada dato respecto a su valor normalizado es presentado en la Figura 7, correspondiente a la gráfica de cuantiles de una normal. El cumplimiento de este supuesto para los datos muestrales obtenidos aleatoriamente, resulta importante pues garantiza robustez en el análisis de modelos de efectos aleatorios (modelo 2), los cuales nos habilitan a concluir sobre la totalidad de la población.

Para la validación del supuesto de homocedasticidad entre los híbridos se utilizó la prueba de Levene que arrojó un  $p$ -valor = 0,7053 indicando que los residuos absolutos de la longitud de los mesocótilos resultaron con varianzas homogéneas.

Al cumplirse con los supuestos planteados como requisitos necesarios para la robustez de resultados, permitió realizar un análisis de varianza para testear la hipótesis nula de igualdad de longitud entre los híbridos, no resultando rechazada, esto

**Tabla 3:** Medidas resumen particulares por Híbrido.

HIB.	Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	Mediana
1	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,6E-04	0,71	1,76	1,80	1,77
2	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,2E-04	0,61	1,76	1,80	1,78
3	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,8E-04	0,74	1,76	1,80	1,78
4	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,1E-04	0,60	1,76	1,80	1,78
5	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,4E-04	0,67	1,76	1,81	1,78
6	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,7E-04	0,74	1,76	1,80	1,78
7	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,2E-04	0,62	1,76	1,80	1,78
8	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,1E-04	0,60	1,76	1,80	1,79
9	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,4E-04	0,66	1,76	1,80	1,78
10	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,2E-04	0,62	1,76	1,80	1,78
11	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,3E-04	0,65	1,76	1,80	1,78
12	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,1E-04	0,59	1,76	1,80	1,78
13	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,6E-04	0,70	1,76	1,80	1,78
14	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,5E-04	0,70	1,76	1,80	1,78
15	LONG.MES.	30	1,78	0,01	9,0E-05	0,53	1,76	1,80	1,78
16	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,2E-04	0,62	1,76	1,79	1,78
17	LONG.MES.	30	1,78	0,01	8,5E-05	0,52	1,77	1,80	1,79
18	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,4E-04	0,66	1,76	1,80	1,78
19	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,7E-04	0,74	1,76	1,80	1,78
20	LONG.MES.	30	1,78	0,01	1,2E-04	0,63	1,76	1,80	1,78



**Figura 7:** Q-Q plot entre los cuantiles de una normal y de los residuos de los valores observados. La recta representa normalidad teórica.

indica que el largo de los mesocótilos evaluados no difieren significativamente entre sí. Los resultados obtenidos en este análisis son presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
LONG.MES.	600	0,03	2,3E-03	0,65

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2,7E-03	19	1,4E-04	1,07	0,3759
HIB	2,7E-03	19	1,4E-04	1,07	0,3759
Error	0,08	580	1,3E-04		
Total	0,08	599			

La longitud de los mesocótilos embrionales provenientes de una muestra aleatoria, no mostró diferencias significativas intra e inter híbridos estudiados, lo que permite generalizar este resultado a todos los materiales comerciales disponibles. En concordancia con lo anteriormente dicho, la longitud del mesocótilo del maíz puede considerarse como un valor aproximadamente invariable de 1,78 mm (+/- DE = 0,01). La posibilidad de emplear este valor como constante, para los futuros modelos de simulación que consideren de forma exponencial el crecimiento durante el subperíodo siembra-emergencia, simplificará la aplicación de los mismos.

La utilización de fotogrametría en estudios histológicos, resulta fiable ya que no altera las proporciones del material en estudio. Adicionalmente, es importante resaltar que, al contar con las imágenes de las muestras en formato digital, es factible volver a re analizarlas las veces que resulte necesario.

Por otra parte, la fotogrametría permite obtener y conservar varios datos al mismo tiempo, reduciendo así errores sistemáticos y aumentando la eficiencia del muestreo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahuja, L.R.; K.W. Rojas, J.D. Hanson, M.J. Shaffer, and L. Ma, editors, 2000. The root zone water quality model. Water Resources Publ., Highlands Ranch, CO. <https://books.google.es/books> (Consultada el 19/08/2020).
- Andrade, F.; A. Cirilo, S. Uhart y M. Otegui, 1996. *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*; La Barrosa.
- Archontoulis, S.V.; F.E. Miguez, and K.J. Moore, 2014. Evaluating APSIM Maize, Soil Water, Soil Nitrogen, Manure, and Soil Temperature Modules in the Midwestern United States Agron. J. 106:1025–1040. doi:10.2134/agronj2013.0421
- Balzarini, M.G.; L. Gonzalez, M. Tablada, F. Casanoves, J.A. Di Rienzo, y C.W. Robledo, 2008. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Battisti, R.; P.C. Sentelhas; K.J. Boote, 2018. Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. *Int J Biometeorol.* 62(5):823-832. doi:10.1007/s00484-017-1483-1
- Blasón, A. D., N. R. Fernández y R. O. Rodríguez. 2002/03. Duración térmica siembra-emergencia para un maíz híbrido en ensayos a campo sin limitación hídrica. *Rev. Arg. de Agrometeorología*, 2 (2): p.119-123.
- Blasón, A. D., N. R. Fernández y R. O. Rodríguez. 2008. Influencia del manejo sobre temperatura y humedad edáfica en relación a la emergencia de maíz. XII Reunión Argentina de Agrometeorología. San Salvador de Jujuy, Argentina. Trabajo n° 141. CD-Actas de la Reunión.
- Boote, K.J. 1999. Concepts for calibrating crop growth models. In: GY Tsuji et al., editor, DSSAT Version 3.5. Vol. 4–6. International benchmark sites network for agrotechnology transfer. Univ. of Hawaii, Honolulu. p. 179–200.
- D'Ambrogio de Argüeso, A.; 1986. Manual de Técnicas en Histología Vegetal; Cátedra de Botánica Agrícola; Facultad de Agronomía, U.B.A.; Hemisferio Sur.
- De la Casa, A.; G. L. Ovando, J. Martínez y A. Rodríguez, 2010a. Evaluación de la heterogeneidad de la cobertura del follaje en un lote de papa y su influencia sobre la productividad en: XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología. 2010. Bahía Blanca. Arg. Actas: pp.69.
- De la Casa, A.; G. L. Ovando, J. Martínez y A. Rodríguez, 2010b. Determinación de la fracción de suelo cubierta con el follaje de papa a partir del cociente entre

- bandas de fotografías digitales. En: XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología. 2010. Bahía Blanca. Arg. Actas: pp. 160.
- Di Rienzo, J.A.; F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo, InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Eastman, J.R., 1993. IDRISI: A Grid Based Geographic Analysis System, Version 4.1, Clark University Graduate school of Geography, Worcester, Massachusetts.
- Hanks, J. and J. T. Ritchie, 1991. Modelling Plant and Soil Systems; Library of Congress; American Society of Agronomy.
- Hoogenboom, G., C.H. Porter, V. Shelia, K.J. Boote, U. Singh, J.W. White, L.A. Hunt, R. Ogoshi, J.I. Lizaso, J. Koo, S. Asseng, A. Singels, L.P. Moreno, and J.W. Jones. 2019. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7 ([www.DSSAT.net](http://www.DSSAT.net)). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
- Jones, C.A. and K.R. Kiniry. 1986. CERES-Maize, A simulation model of maize growth and development. 1st ed. Texas Univ. Press, College Station.
- Jones, J.W.; G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor and L.A. Hunt, 2003. DSSAT Cropping System Model. *Eur. J. Agron.* 18:235–265. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7 <https://www.sciencedirect.com/science/article> (Consultada el 19/08/2020).
- Keating, B.A.; P.S. Carberry, G.L. Hammer, M.E. Probert, M.J. Robertson and D. Holzworth, 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18:267–288. doi:10.1016/S1161-0301(02)00108-9
- Nendel, C; M. Berg, K.C. Kersebaum, W. Mirschel, X. Specka, M. Wegehenkel, K.O. Wenkel and R. Wieland, 2011. The MONICA model: testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*, 222, 1614–1625. <https://www.sciencedirect.com/science/article> (Consultada el 19/08/2020).
- Pereyra, A. M.; N.N. Abbiati y E.N. Fernández, 2003. *Manual de estadística para proyectos de investigación*. Lomas de Zamora, Argentina: Universidad Nacional de Lomas de Zamora
- Purcell, L. C.; 2000. Soybean Canopy coverage and light interception measurements using imagery. *Crop science* 40:834-837. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2135/cropsci2000.403834x> (Consultada el 19/08/2020).
- Schneider, E.C., and S.C. Gupta. 1985. Corn emergence as influenced by soil temperature, matric potential and aggregate size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:415-422. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1985.03615995004900020029x> (Consultada el 19/08/2020).
- Serritella, D. A.; A. D. Blasón, N. R. Fernández y R.O. Rodríguez, 2014. Medición Fotogramétrica de Plántulas de Maíz. XIV Reunión Argentina de Agrometeorología, Malargüe, Mendoza, Argentina. 17 al 19 de Octubre de 2012. Actas de la XIV Reunión, Pág. 121.
- Steduto, P.; T.C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres, 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I Concepts and underlying principles. *Ag. Journal* 101: 426-437. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2008.0139s> (Consultada el 19/08/2020).
- Williams, J.R.; C.A. Jones, J.R. Kiniry and D.A. Spanel, 1989. The EPIC Crop Growth Model. *Transactions of the ASAE*, vol 32, n° 2, pp:497-511. [https://www.researchgate.net/profile/James\\_Kiniry/publication/243782683\\_EPIC\\_crop\\_growth\\_model](https://www.researchgate.net/profile/James_Kiniry/publication/243782683_EPIC_crop_growth_model) (Consultada el 19/08/2020).