

PONDERACIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD FISIOLÓGICA PARA LA MEDICIÓN DEL VIGOR EN SEMILLA DE MAÍZ

PONDERATION WEIGHT OF PHYSIOLOGICAL QUALITY VARIABLES TO MEASURE VIGOR IN CORN SEED

J. Arahón Hernández Guzmán¹, Aquiles Carballo Carballo¹, Adrián Hernández Livera¹ y Félix Valerio González Cossío¹

RESUMEN

Con el propósito de discriminar entre variables de calidad fisiológica utilizadas para la medición del vigor en semilla de maíz (*Zea mays* L.), en 1997-1998, en Montecillo, México, se evaluaron diferentes materiales, utilizando en laboratorio la prueba de germinación estándar y en microtúnel con arena de río y tezontle como sustratos a las profundidades de siembra de 5 y 10 cm. Se determinó la asociación de las variables de calidad, medidas en laboratorio y microtúnel, con el vigor de la semilla, en función del establecimiento de plántulas en campo. Se encontró relación en la expresión del vigor de los materiales de maíz evaluados en laboratorio y microtúnel con el comportamiento mostrado en condiciones favorables e intermedias de campo sólo si los materiales fueron de buena calidad; sin embargo, en la condición desfavorable todos los tratamientos presentaron el mismo nivel de vigor. En laboratorio, el análisis multivariable otorgó la mayor ponderación al peso seco de la parte aérea para la medición del vigor; esta variable explicó 49 y 75% del establecimiento para la condición favorable e intermedia de suelo, y fue la única significativa en la predicción del establecimiento del maíz en campo. En microtúnel, la combinación de arena y profundidad de siembra de 5 cm fue más eficiente al permitir la asociación con mayor significación estadística del peso de la parte aérea y de la raíz con el establecimiento en campo; el peso seco de la parte aérea contribuyó a explicar 49 y 66% del establecimiento en la condición favorable e intermedia de suelo, y el peso seco de la raíz lo explicó

81 y 77%, respectivamente. Dependiendo de la combinación de sustrato y profundidad de siembra utilizada en la evaluación en microtúnel, las variables más importantes para predecir el establecimiento fueron el peso seco de la parte aérea, el peso seco de la raíz y la velocidad de emergencia.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES

Zea mays L., calidad de semilla, análisis multivariable, establecimiento en campo.

SUMMARY

To discriminate among physiological quality variables used in corn (*Zea mays* L.) seed to measure vigor, in 1997-1998, at Montecillo, Mexico, different materials were evaluated using the standard germination test in laboratory and in microtunnel, using river sand, and porous building stone as substratum with seeding depths of 5 and 10 centimeters; it was determined the relationship among the quality variables measured in both conditions and seed vigor, in function of field seedling establishment. There was a relationship in the vigor expression of corn materials evaluated in laboratory and microtunnel with that showed in the field under favorable and intermediate conditions, when materials were of good or poor quality; however, under unfavorable condition, all treatments showed similar vigor level. In laboratory, multivariate analysis gave the main ponderation weight to aerial dry weight; 49 and 75% of the variation of establishment in favorable and intermediate soil conditions was explained for this variable, which was the only significant one to predict field corn establishment. In microtunnel, sand bed and 5 cm seeding depth was the most efficient combination allowing the strongest association of aerial and root

¹ Colegio de Postgraduados. Carretera Federal México- Texcoco, Km 36.5. C.P. 56230. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Tel. (595) 20200, Ext. 1552.

Fecha de Recepción: 17 de Noviembre de 1998.

Fecha de Aprobación: 21 de Septiembre del 2000.

dry weight with field establishment aerial dry weight explained 49 and 65% of the variation in the establishment in favorable and intermediate soil conditions, while root dry weight explained 81 and 77%. Under microtunnel condition, depending on the substratum and seeding depth, the most important variables to predict field establishment were aerial dry weight, root dry weight and emergence velocity.

ADDITIONAL INDEX WORDS

Zea mays L, seed quality, multivariate analysis, field establishment.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del vigor, como componente de la calidad fisiológica de la semilla, es importante para garantizar densidades de población óptimas, a fin de maximizar rendimiento y/o calidad de la producción (Hampton y Coolbear, 1990); se utiliza para explicar las diferencias en comportamiento de distintos lotes de semilla (Perry, 1983); y bajo condiciones de tensión en el suelo, lotes de alto vigor se establecen mejor que los de bajo vigor, aun cuando la germinación en laboratorio entre lotes sea similar (ISTA, 1995).

La calidad de la semilla se puede evaluar mediante variables de calidad física, como el contenido de humedad, el peso de mil semillas y el peso volumétrico, entre otras; o de variables de calidad fisiológica, como son la velocidad de emergencia, y los porcentajes de viabilidad y germinación. La mayoría de estas variables generalmente se cuantifican fácilmente, pero pueden o no estar asociadas al vigor. Así, la disminución en el porcentaje de viabilidad de la semilla es usualmente precedida por la pérdida de vigor (Basu, 1995); sin embargo, la viabilidad generalmente no se relaciona con el establecimiento de plántulas en el campo, ya que solamente expresa el grado en el cual las semillas están vivas, son metabólicamente activas y poseen

enzimas capaces de catalizar reacciones necesarias para la germinación y crecimiento de las plántulas, pero pueden contener tanto tejido vivo como muerto, por lo que no hay garantía para su germinación (Copeland y McDonald, 1995).

El porcentaje de germinación al cuarto día de establecida la prueba es una de las formas indirectas más antiguas para medir el vigor; aunque se ha desacreditado por las dificultades para la estandarización y sólo se considera útil cuando las condiciones son cuidadosamente controladas (Perry, 1981). Se sugiere, por ejemplo, adecuar la duración de la prueba de germinación a las características y niveles de calidad fisiológica de los materiales genéticos sometidos a evaluación (Hernández y Carballo, 1997).

Las clasificaciones visuales y el grado de desarrollo son buenos estimadores del vigor de plántula, por lo que son recomendables para caracterizar lotes de semilla o para seleccionar plántulas que expresen su genotipo en relación a esta característica (Virgen, 1983); sin embargo, la separación de las plántulas normales en dos categorías adicionales (vigorosas y débiles) es una tarea sutil, que al depender para su evaluación de la apreciación del investigador, representa una fuente adicional de variación (Copeland y McDonald, 1995). Por el contrario, algunos investigadores consideran que las variables relacionadas con el peso seco producido por las plántulas, son los mejores indicadores de vigor (Villaseñor, 1984; Sandoval, 1995).

Debido a la existencia de numerosas variables de calidad fisiológica utilizadas para la medición del vigor y considerando que no se ha logrado definir la más apropiada, los objetivos de esta investigación fueron evaluar la calidad fisiológica en semilla de diferentes materiales de maíz, en condiciones de laboratorio, microtúnel y campo e identificar

variables de calidad fisiológica que permitan estimar mejor el vigor, en términos del establecimiento de plántulas en campo. Se partió de los supuestos de que existe relación en la expresión de la calidad fisiológica de materiales de maíz evaluados en ambientes contrastantes, y que hay atributos de la calidad fisiológica de la semilla, con mayor contribución en la medición del vigor en maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se efectuó durante 1997 y 1998, en la Especialidad de Postgrado en Producción de Semillas del Colegio de Postgraduados (CP), ubicado en Montecillo, Municipio de Texcoco, México. Se utilizaron tres orígenes del híbrido trilineal de maíz CP-HS2; dentro de cada origen se clasificó la semilla en plano-chico (PCH) y plano-grande (PGR), considerando como PGR la semilla retenida por una criba con perforaciones redondas de 8 mm de diámetro (C1), que posteriormente se pasó a través de una criba con perforaciones oblongas de 5.75x19.05 mm (C2) y finalmente se retuvo en una criba oblonga de 4.75x19.05 mm (C3). La semilla tipo PCH fue la que tamizó a través de C1 y C3, pero que se mantuvo sobre la criba oblonga de 4.00x19.05 mm. Con lo anterior se generaron los tratamientos T95PCH y T95PGR de Tecamac-95, M95PCH y M95PGR de Montecillo-95, así como T97PCH y T97PGR de Tocuila-97; buscando garantizar la expresión diferencial del vigor entre tratamientos, sin importar, para los fines del presente estudio, la evaluación individual del efecto del tamaño, la forma o el origen de la semilla. Además se incluyeron el híbrido simple HS-EXP-22x21 y el híbrido trilineal HT-EXP-87x88, que mostraron bajo vigor en un experimento previo a la evaluación de los tratamientos planteados; del primero se utilizó semilla tipo bolachico (BCH) de origen Montecillo 95

(M95BCH) y del segundo semilla PGR de origen Montecillo 97 (M97PGR), en ambos casos el tamaño y la forma de la semilla dentro de cada genotipo mostró relativa uniformidad, razón por la cual la clasificación se realizó visualmente. Todos los materiales genéticos fueron proporcionados por la Especialidad de Postgrado en Producción de Semillas del CP.

La calidad fisiológica se evaluó en laboratorio mediante la prueba de germinación estándar. Por tratamiento se prepararon seis repeticiones de 50 semillas y cada repetición se dividió en dos muestras de 25 semillas. Se utilizó el método "entre papel" recomendado por la International Seed Testing Association (ISTA), el cual consiste en extender dos toallas previamente humedecidas con agua destilada sobre una superficie plana, sobre las cuales se colocaron las 25 semillas distribuidas en cinco columnas y cinco hileras; posteriormente se cubrieron con otras dos toallas húmedas y se enrollaron en forma de "taco", para después ponerlas a germinar, acomodando los "tacos" en forma vertical en bolsas de plástico. La distribución de los tratamientos en la cámara de germinación fue en un diseño de bloques completos al azar. Durante la prueba se mantuvieron constantes los niveles de agua y la temperatura de 25 °C. Los caracteres evaluados fueron: porcentaje de germinación al cuarto (PG4D) y séptimo día (PG), con base en plántulas que tenían raíz y plúmula bien desarrolladas, sanas y sin deformaciones; porcentaje de viabilidad (PVI), que incluyó plántulas normales y anormales; peso seco en gramos de la parte aérea (PSA) y de la raíz (PSR), del total de plántulas después de secadas a 75 °C durante 72 horas (ISTA, 1993).

Para el estudio de la calidad fisiológica en microtúnel se incluyeron sólo las seis variantes del CP-HS2, existiendo la posibilidad de que al eliminar el efecto de genotipos, sea

más factible seleccionar variables que permitan medir diferencias en vigor aun poco perceptibles. Se realizó la siembra a profundidades de 5 y 10 cm, utilizando como substratos arena de río y tezontle no esterilizados, por su bajo costo y alta disponibilidad en la región; ambos substratos se tamizaron a través de una malla de alambre de 2 mm². Se utilizó el factorial 6x2x2, en un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas subdivididas y seis repeticiones. La unidad experimental se formó por dos surcos de 15 semillas, con distancias entre surcos y semillas de 7.5 y 4.0 cm, respectivamente. La siembra se efectuó en semilleros de madera de 210x210x20 cm; con el substrato correspondiente se prepararon camas de siembra de 8 y 13 cm, sobre las cuales se colocó verticalmente la semilla, dejando descubierta la corona. Se cubrió con los substratos y se niveló con razadores de madera de 2 cm, obteniéndose así las profundidades deseadas. Se aplicó un riego al momento de la siembra y después cada tercer día para mantener húmedo el substrato. Los semilleros se colocaron bajo un invernadero móvil tipo "túnel", con estructura metálica y cubierta de polietileno. Las variables estudiadas en esta prueba fueron: porcentaje de establecimiento (PE) al momento en que la emergencia permaneció constante, PVI, PSA, PSR y velocidad de emergencia (VE), calculada mediante la fórmula propuesta por Maguirre (Citado por Copeland y McDonald, 1995):

$$VE = \frac{X_1}{C_1} + \dots + \frac{X_r}{C_r}$$

donde:

X_1 = Número de plántulas emergidas el día del primer conteo.

X_r = Número de plántulas emergidas el día del conteo final.

C_1 = Días transcurridos de la siembra al primer conteo.

C_r = Días transcurridos de la siembra al conteo final.

En campo se evaluaron los ocho materiales, en un diseño de bloques completos al azar con 10 repeticiones y una unidad experimental de dos surcos de 25 semillas; la distancia entre surcos fue de 80 cm y de 22 cm entre semillas. La siembra se realizó en suelo seco y de inmediato se aplicó un riego por gravedad para propiciar la germinación; se aplicaron dos riegos más, distanciados ocho días entre ellos. Este experimento se estableció en un suelo agrícola; el cual, con base a su historial agronómico, presenta un gradiente en su nivel de salinidad, buscando con ello generar las condiciones de suelo favorable, intermedia y desfavorable. No se cuantificó la concentración salina, ya que sólo se buscó una condición que afectara la capacidad de establecimiento y que permitiera la expresión diferencial del vigor entre los materiales estudiados, sin importar el ambiente causante de tal efecto; en este caso se estudió el porcentaje de establecimiento (PEC) a los 22 días después de la siembra, que fue cuando la emergencia de plántulas se mantuvo constante.

Para definir las condiciones de suelo con un criterio más objetivo, el PEC se sometió a la prueba de comparación de medias de Tukey (Cuadro 1), utilizando repeticiones como clases.

Las variables registradas en cada experimento se sometieron al análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$); así como a los análisis de varianza multivariado, de componentes principales, discriminante canónico y regresión lineal múltiple, utilizando los procedimientos ANOVA, MANOVA, PRINCOMP, CANDISC y STEPWISE del SAS.

Cuadro 1. Definición de ambientes de suelo con base al porcentaje de establecimiento de plántulas en campo.

Repetición	Ambiente de suelo	PEC ¹
1	Favorable	78 a ²
2	Favorable	70 ab
3	-	61 b
4	Intermedio	56 b
5	Intermedio	58 b
6	-	35 c
7	-	9 d
8	Desfavorable	14 d
9	Desfavorable	17 d
10	-	23 cd
Valor Tukey		16

¹ PEC = Porcentaje de establecimiento en campo.

² Medias con la misma letra para cada variable son iguales (Tukey, 0.05).

Cuadro 2. Comparación de medias y cuadrados medios para variables de calidad fisiológica de ocho materiales de maíz evaluados en laboratorio.

Material	PG4D ¹	PVI	PG	PSA	PSR
T95PCH	86 ab ²	95 b	88 ab	2.4 bc	1.1 d
T95PGR	83 ab	95 ab	84 ab	2.7 b	1.2 d
M95PCH	88 ab	96 ab	88 ab	2.3 bc	1.2 d
M95PGR	85 ab	98 ab	87 ab	2.7 b	1.6 b
T97PCH	85 ab	98 ab	87 ab	2.5 bc	1.2 cd
T97PGR	93 a	100 a	96 a	3.7 a	1.9 a
M95BCH	79 b	95 b	82 b	2.2 c	1.0 d
M97PGR	81 ab	98 ab	82 b	2.7 b	1.5 bc
Cuadrados medios	121 * ³	23 *	118 *	1.3 **	0.6 **
Valor Tukey	13	4	13	0.4	0.29

¹ PG4D = Porcentaje de germinación al cuarto día; PVI = Porcentaje de viabilidad; PG = Porcentaje de germinación al séptimo día; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz.

² Medias con la misma letra para cada variable son iguales (Tukey, 0.05).

³ * = p ≤ 0.05; ** = p ≤ 0.01.

Cuadro 3. Vectores propios y proporción de la varianza explicada por cada componente principal. Prueba de laboratorio.

Variable original	CP-1 (70 %)	CP-2 (14 %)	CP-3 (12 %)	CP-4 (4 %)
PVI ¹	0.445	0.865	- 0.232	- 0.033
PG4D	0.472	- 0.004	0.872 +	0.132
PSA	0.545	- 0.358	- 0.185	- 0.735 +
PSR	0.532	- 0.352	- 0.390	0.665

¹ PVI = Porcentaje de viabilidad; PG4D = Porcentaje de germinación al cuarto día; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz.

+ Variables descartadas por el criterio B2 de Jolliffe.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comparar las variables de calidad fisiológica evaluadas en el laboratorio (Cuadro 2), se encontró que la prueba de Tukey aplicada a PG4D, PVI y PG, discriminó similarmente a los tratamientos; mientras que para PSA y PSR las diferencias fueron más claras, lo que concuerda con lo encontrado por Villaseñor (1984) y Sandoval (1995), en el sentido de que las variables relacionadas con el peso seco producido por las plántulas, son los mejores indicadores de vigor.

La germinación al cuarto día (PG4D) se ha utilizado como prueba de vigor (Hernández y Carballo, 1997); sin embargo, al efectuar los análisis de varianza para el PG4D y el PG, se obtuvieron resultados similares, lo que sugiere la necesidad de definir con precisión el momento más oportuno para realizar el primer conteo. Gutormson (1991) propone la clasificación de plántulas normales o anormales en función del porcentaje del espacio del coleóptilo ocupado por hojas, a fin de lograr una mejor discriminación entre materiales con base en su vigor. Hernández y Carballo (1997) sugieren adecuar las reglas de la ISTA, para evaluar correctamente la calidad fisiológica de las semillas de los genotipos producidos en México.

En los análisis de varianza multivariados de componentes principales (ACP) y discriminante canónico (ADC) se excluyó al PG por presentar colinealidad con el PG4D. En el ACP (Cuadro 3), las dos primeras componentes explicaron el 84% de la varianza total, por lo que fueron retenidas. Con base al valor absoluto de los vectores propios, el PSA y el PSR en la componente principal 1 (CP-1), aunado a PVI en la componente principal 2 (CP-2), fueron las variables con mayor ponderación para diferenciar materiales.

Después de elevar al cuadrado el valor de los elementos de los vectores propios para obtener R^2 , se encontró que la CP-1 y la CP-2 explicaron conjuntamente el 95% del PVI, 43% del PSA y 41% del PSR; la proporción de la varianza no explicada está contenida en las componentes no retenidas. La CP-1 explicó el 30% del PSA y 28% del PSR, mientras que la CP-2 explicó 75% del PVI. Al aplicar el criterio B2 de Jolliffe para la selección de variables (Argüelles, 1990), se encontró que el PVI y el PSR medidos en el laboratorio, resultaron ser las variables con mayor ponderación en análisis de componentes principales.

En el análisis discriminante canónico (Cuadro 4), se observa que las dos primeras variables canónicas (VC1 y VC2) resultaron altamente significativas ($p \leq 0.01$) y juntas explicaron 96% de la varianza total de la muestra. Los coeficientes canónicos estandarizados, además de eliminar el efecto de la escala de medición de las variables originales, determinan la importancia de cada una en presencia de las demás; con base en su valor absoluto, al PSR en la VC1 y al PSA en la VC2 se les atribuyó la mayor importancia, lo cual concuerda con la ponderación realizada por la CP-1 en el análisis de componentes principales.

Para las variables de calidad fisiológica medidas en microtúnel, de las fuentes de variación del factorial solamente hubo diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre materiales para todas las variables (Cuadro 5). El PSA y el PSR discriminaron con mayor claridad, ubicando a los primeros tres materiales (T95PGR, T95PCH y M95PCH) en el grupo de menor calidad fisiológica; lo que resulta lógico, ya que estos tratamientos también fueron los de menor calidad física, al presentar altos porcentajes de semilla sin pedicelo. A T97PCH y T97PGR, de cosecha más reciente y semilla

Cuadro 4. Proporción de la varianza explicada, probabilidad y coeficientes canónicos estandarizados para las primeras variables canónicas. Prueba de laboratorio.

Variable canónica	Proporción de la varianza explicada	Valor de probabilidad	Coeficientes canónicos estandarizados			
			PVI ¹	PG4D	PSA	PSR
VC1	86 %	0.0001	0.43	- 1.27	1.19	2.11
VC2	10 %	0.0001	0.54	0.05	- 2.49	1.93

¹ PVI = Porcentaje de viabilidad; PG4D = Porcentaje de germinación al cuarto día; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz.

Cuadro 5. Comparación de medias y cuadrados medios para las variables de calidad fisiológica medidas en condiciones de microtúnel.

Material	PSD ¹	PVI	PE	PSA	PSR	VE
T95PGR	63	92 b ²	90 bc	2.9 c	1.0 c	3.8 cd
T95PCH	69	87 c	84 d	3.0 c	1.0 c	3.6 d
M95PCH	35	91 b	89 c	2.8 c	1.0 c	3.7 cd
M95PGR	22	97 a	94 ab	3.6 b	1.3 b	3.8 bc
T97PCH	0	97 a	94 a	4.0 ab	1.5 ab	4.0 ab
T97PGR	0	99 a	97 a	4.2 a	1.6 a	4.1 a
Cuadrados medios		506 ** ³	554 **	9.1 **	1.6 **	0.8 **
Valor Tukey		4.90	4.14	0.52	0.22	0.22

¹ PSD = Porcentaje de semilla sin pedicelo; PVI = Porcentaje de viabilidad; PE = Porcentaje de establecimiento; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz; VE = Velocidad de emergencia.

² Medias con la misma letra para cada variable son iguales (Tukey, 0.05).

³ ** = $p \leq 0.01$.

Cuadro 6. Vectores propios y proporción de la varianza explicada por cada componente principal. Prueba de microtúnel.

Variable original	CP-1 (68 %)	CP-2 (13 %)	CP-3 (12 %)	CP-4 (7 %)
PVI ¹	0.472	0.186	- 0.796 +	- 0.303
PSA	0.497	0.727	0.492	0.085
PSR	0.489	- 0.619	0.350	0.497
VE	0.539	- 0.234	- 0.311	- 0.809 +

¹ PVI = Porcentaje de viabilidad; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz; VE = Velocidad de emergencia.

+ Variables descartadas por el criterio B2 de Jolliffe.

físicamente íntegra, los ubicó como materiales de mejor calidad, sin lograr diferenciar entre ambos cuya semilla contrasta en tamaño.

Con excepción de PE, por problemas de colinealidad, el resto de las variables fueron analizadas usando componentes principales (Cuadro 6). Las dos primeras componentes retenidas contribuyeron con 81% de la varianza; la VE y el PSA sobresalieron con respecto a las demás variables dentro del CP-1, en tanto que el PSA lo hizo en el CP-2. El procedimiento de selección de variables de Jolliffe otorgó mayor importancia al PSA y al PSR, logrando explicar las dos componentes el 78 y 62% de la varianza total de estas variables, respectivamente.

En el análisis discriminante canónico (Cuadro 7), el valor absoluto de los coeficientes canónicos establece que PVI fue determinante en ambas variables canónicas. Esta variable medida en laboratorio no tuvo importancia para diferenciar materiales, lo cual puede obedecer a que las plántulas se desarrollan en condiciones artificiales, estandarizadas, con medios esencialmente estériles y en ambientes con temperatura y humedad controladas (Copeland y McDonald, 1995); por el contrario, en microtúnel existe menos control del ambiente y como la duración de la prueba es mayor, hay fluctuaciones en la temperatura y mejor calidad de la luz, lo que influye de manera diferencial sobre el desarrollo de las plántulas (Hernández y Carballo, 1997).

Con relación al porcentaje de establecimiento en campo (PEC) en tres ambientes de suelo (Cuadro 8), el origen T97PGR que fue el de mayor PG en laboratorio, tuvo el mayor PEC; esto significa que el PG puede tener relación con el establecimiento, cuando no existen condiciones limitantes. No obstante, en la condición desfavorable el PEC

para todos los materiales fue igual estadísticamente, indicando con ello que una condición de suelo muy desfavorable, no permite la expresión diferencial del vigor de la semilla. Esto concuerda con lo reportado por Perry (1981), quien asevera que en condiciones extremadamente adversas emergerán pocas plántulas sin importar el nivel de vigor de la semilla, sucediendo lo contrario en condiciones favorables, donde la emergencia puede correlacionar con la germinación y una prueba de vigor puede no representar ventaja alguna.

El análisis de correlación entre variables de calidad fisiológica medidas en laboratorio y el establecimiento de plántulas en el campo (Cuadro 9), reflejó que el PSA tuvo mayor asociación con el establecimiento en condiciones favorables e intermedias de suelo ($0.70 \leq r \leq 0.85$), contribuyendo a explicar el 49 y 75% del PEC en tales condiciones.

Como resultado de la regresión lineal múltiple (RLM) entre el PEC y las variables medidas en laboratorio, sólo el PSA fue significativo en la predicción del establecimiento en campo, obteniéndose las ecuaciones de regresión $PEC = 27.799$ (PSA) para la condición favorable y $PEC = 21.575$ (PSA) para la intermedia; en ambos casos el coeficiente de determinación fue altamente significativo ($R^2 = 0.98^{**}$).

Para el caso de la correlación entre variables evaluadas en microtúnel con el establecimiento de plántulas en campo, en el Cuadro 10 se indican exclusivamente los mayores coeficientes obtenidos. En la condición intermedia, el PSR mostró mayor consistencia en su respuesta ($0.75 \leq r \leq 0.83$), al correlacionar significativamente ($p \leq 0.05$) con el PEC en las dos profundidades de siembra cuando se utilizó arena como sustrato. El PSA también resultó significativo, sólo que mostró interacción con el sustrato y la pro-

Cuadro 7. Proporción de la varianza explicada, probabilidad y coeficientes canónicos estandarizados para las primeras variables canónicas. Prueba de microtúnel.

Variable canónica	Proporción de la varianza explicada	Valor de probabilidad	Coeficientes canónicos estandarizados			
			PVI ¹	PSA	PSR	VE
VC1	90 %	0.0001	1.08	0.89	0.64	- 0.97
VC2	9 %	0.0517	- 0.95	0.91	0.71	- 0.75

¹ PVI = Porcentaje de viabilidad; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz; VE = Velocidad de emergencia.

Cuadro 8. Porcentaje de establecimiento de ocho materiales de maíz en tres condiciones de suelo.

Material	PG ¹	Suelo favorable	Suelo intermedio	Suelo desfavorable
T95PCH	88 ab ²	69 abcd	56 ab	17 a
T95PGR	84 ab	83 ab	62 ab	20 a
M95PCH	88 ab	57 d	38 b	8 a
M95PGR	87 ab	67 bcd	49 b	11 a
T97PCH	87 ab	80 abc	64 ab	13 a
T97PGR	96 a	88 a	85 a	12 a
M95BCH	82 b	62 cd	42 b	5 a
M97PGR	82 b	86 ab	56 ab	21 a
Valor Tukey	13	20	32	28

¹ PG = Porcentaje de germinación.

² Medias con la misma letra para cada variable son iguales (Tukey, 0.05).

Cuadro 9. Correlación entre las variables de calidad fisiológica medidas en laboratorio y el porcentaje de establecimiento en tres condiciones de suelo.

Variable independiente	Favorable	Intermedio	Desfavorable
PVI ¹	0.60	0.65 * ²	- 0.32
PG4D	0.18	0.56	0.02
PSA	0.70 *	0.85 **	- 0.10
PSR	0.57	0.67 *	- 0.19

¹ PVI = Porcentaje de viabilidad; PG4D = Porcentaje de germinación al cuarto día; PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz.

² * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$.

fundidad de siembra ($0.75 \leq r \leq 0.81$); no obstante, cuando se utilizó arena y la profundidad de 5 cm, en la condición de suelo favorable e intermedia, respectivamente, 49 y 66% de la varianza en el PEC pudo explicarse por la variación en el PSA, mientras que para las mismas condiciones, la variación en el PSR explicó 49 y 69% del PEC. Milthorpe y Moorby (1982) consideran que la tercera parte de las reservas de la semilla son destinadas a satisfacer el crecimiento de la raíz, y con fines de comparación recomiendan considerar juntos el peso seco de la parte aérea como el de la raíz de las plántulas. Para la condición favorable se obtuvieron coeficientes de magnitud relevante ($0.64 \leq r \leq 0.70$), pero probablemente la falta de significación estadística se debió al reducido tamaño de muestra utilizado en el análisis.

En el Cuadro 11 se observa que independientemente del sustrato y utilizando la profundidad de siembra de 10 cm, es posible predecir el PEC para condiciones favorables e intermedias de suelo, mediante la medición de la VE o del PSR. El PSA, el PSR o la VE fueron las variables de microtúnel más apro-

piadas para predecir el establecimiento; la importancia de cada una estuvo en función del sustrato, de la profundidad de siembra y del ambiente de campo en que se realizó la siembra

CONCLUSIONES

Se encontró relación en la expresión del vigor de los materiales de maíz evaluados en laboratorio y microtúnel con su comportamiento mostrado en condiciones favorables e intermedias de campo, sólo cuando los materiales contrastaron en su calidad fisiológica; sin embargo, en la condición desfavorable, todos los tratamientos presentaron el mismo nivel de vigor.

En condiciones de laboratorio, el análisis multivariable otorgó la mayor ponderación al PSA para la medición del vigor. Esta variable explicó 49 y 75% del PEC para la condición favorable e intermedia de suelo, y fue la única significativa en la predicción del establecimiento del maíz en campo.

Cuadro 10. Correlación entre variables medidas en microtúnel y el porcentaje de establecimiento en campo en dos condiciones de suelo.

Ambiente en microtúnel	Variable independiente	Favorable	Intermedia
Arena y profundidad de 5 cm	PSA ¹	0.70	0.81* ²
Arena y profundidad de 5 cm	PSR	0.70	0.83*
Arena y profundidad de 10 cm	PSR	0.64	0.75*
Tezontle y profundidad de 10 cm	PSA	0.66	0.75*

¹ PSA = Peso seco de la parte aérea; PSR = Peso seco de la raíz.

²* = $p \leq 0.05$

Cuadro 11. Predicción del establecimiento en campo a partir de variables medias en microtúnel.

Ambiente en microtúnel	Ambiente en campo	Ecuación	R ²
Arena y profundidad de siembra de 5 cm	Favorable	PEC = 22.194 (PSA)	0.98 ** ¹
	Intermedio	PEC = 42.545 (PSR)	0.98 **
Arena y profundidad de siembra de 10 cm	Favorable	PEC = 20.087 (VE)	0.98 **
	Intermedio	PEC = 50.828 (PSR)	0.97 **
Tezontle y profundidad de siembra de 5 cm	Favorable	PEC = 18.115 (VE)	0.98 **
	Intermedio	PEC = 16.499 (PSA)	0.97 **
Tezontle y profundidad de siembra de 10 cm	Favorable	PEC = 21.300 (VE)	0.98 **
	Intermedio	PEC = 65.466 (PSR)	0.98 **

¹ ** = p ≤ 0.01.

En microtúnel, la combinación de arena y profundidad de siembra de 5 cm permitió la asociación con mayor significación estadística del PSA y del PSR con el PEC. El PSA contribuyó a explicar 49 y 66% del PEC en la condición favorable e intermedia de suelo, y el PSR lo explicó en 81% y 78%, respectivamente.

Dependiendo de la combinación de sustrato y profundidad de siembra utilizada en la evaluación en microtúnel, la variable más importante para la predicción del establecimiento en campo fue el PSA, PSR o VE.

BIBLIOGRAFÍA

- Argüelles C., J. H. 1990. Selección de variables en el análisis de componentes principales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 80 p.
- Basu, R. N. 1995. Seed viability. *In*: Seed quality; basic mechanisms and agricultural implications. A. S. Basra (ed.). Food Products Press, New York, USA. pp: 1-44.
- Copeland, L. O and M. B. McDonald. 1995. Principles of Seed Science and technology. Third edition. Chapman and Hall. New York, USA. 409 p.
- Gutormson, T. J. 1991. Seedling evaluation manual. Seed Testing Laboratory. University Extension, Iowa State University. Ames, Iowa. 24 p.
- Hampton, J. G and P. Coolbear. 1990. Potential versus actual seed performance -can vigour testing provide an answer? *Seed Sci. and Technol.* 18 (1): 215-228.
- Hernández L., A. y A. Carballo C. 1997. Pruebas de germinación y vigor en semillas de maíz de diferentes áreas de adaptación. *Agrociencia* 31 (4): 397-403.
- ISTA. 1993. International rules for seed testing 1993. *Seed Sci. and Technol.* 21, Supplement. 288 p.
- _____. 1995. Understanding seed vigour. Prepared by the ISTA Vigour Test Committee. Zurich, Switzerland. sp. 5 p.
- Milthorpe F., L. y J. Moorby. 1982. Introducción a la Fisiología de los Cultivos. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp: 141-157.
- Perry, D. A. 1981. Methodology and application of vigour tests. *In*: Handbook of vigour test methods. D.A. Perry (ed.). International Seed Testing Association. Zurich, Switzerland. pp: 3-7.
- _____. 1983. El concepto de vigor de la semilla y su relevancia con respecto a las técnicas de producción de semilla. *In*: Producción moderna de semilla. P.D. Hebblethwaite (ed.). Tomo II. Editorial Agropecuario Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay. pp: 693-701.

Sandoval Z., H. 1995. Agotamiento de sustancias de reservas: una prueba para medir el vigor de la semilla. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 34 p.

Villaseñor M., H. E. 1984. Factores genéticos que determinan el vigor en plántulas de maíz. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 149 p.

Virgen V., J. 1983. Evaluación del vigor en maíz (*Zea mays* L.) en base a características de semillas y plántulas. Tesis Profesional. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. México. 90 p.