

MI PRIMER ARTÍCULO

ING. AGR. JOHN SCANLAN
jscanlanarg@gmail.com

Meta-Análisis Estadístico de la Fertilización Foliar en maíz

INTRODUCCIÓN

En Argentina la fertilización foliar ya cuenta con años de estudio: la deficiencia de micronutrientes en varias zonas de la pampa húmeda ha sido demostrada y ya se han comprobado situaciones en las que la productividad de los cultivos se ve incrementada. A pesar de esto su práctica no ha tenido la difusión que goza en otros países y los productores no la han adoptado con la fuerza que lo han hecho con otras técnicas. Es por ello que hace falta generar más información e integrarla para poder apreciar con más detalle el resultado productivo que esta práctica verdaderamente tiene.

Los ensayos realizados en la materia hasta el momento muestran respuestas positivas de rendimiento que en algunos casos es significativa pero en su mayoría no (de los 108 tratamientos evaluados solamente un 6,4% eran señalados en sus ensayos como tratamientos con efectos significativos sobre el testigo). Esto sugiere que la potencia estadística de los ensayos con pocas repeticiones no es suficiente para detectarla ya que se puede observar una tendencia positiva en el efecto de la fertilización foliar (Figs. N° 1 y 2). Esta situación crea la necesidad de realizar un trabajo que revise una cantidad importante de ensayos realizados sobre el tema e intente encontrar un valor medio global de respuesta de rendimiento.

El meta-análisis es un método cuantitativo para integrar ensayos en donde estudios independientes se combinan

para estimar el efecto de un tratamiento y su variabilidad, determinando si la tendencia observada es significativa o no. Se logra así mayor potencia para detectar diferencias entre tratamientos. Es una herramienta estadística ampliamente utilizada en otros campos de estudio como la medicina, pero es totalmente novedosa para las ciencias agronómicas en la Argentina e incluso en los Estados Unidos.

El objetivo de este trabajo es la evaluación cuantitativa del impacto de la fertilización foliar como técnica para incrementar los rendimientos en cultivos de maíz. Se intenta responder a las siguientes preguntas: ¿aumentan los fertilizantes foliares los rendimientos en maíz? y ¿en qué medida promedio lo hacen? No es el objetivo explicar en un modelo la variación que puede tener esta respuesta y cómo predecir la magnitud de la respuesta en casos puntuales, ya que implicaría la construcción de un modelo matemático con múltiples variables que contemple: el producto utilizado, dosis, precipitaciones en el ciclo, momento de aplicación, fertilización de base, etc. Con ese fin se elaboró un meta-análisis estadístico, el cual pretende cuantificar la respuesta en rendimiento que tiene esta técnica de fertilización mediante la integración estadística de la mayor cantidad de ensayos posibles realizados en la pampa húmeda. Se obtuvo así una tentativa de respuesta "promedio" de esta técnica para esta zona y se determinó si esta respuesta es significativa o no. Se cuantificó la variabilidad de esta respuesta y se examinaron posibles factores que puedan explicar parte de la misma.

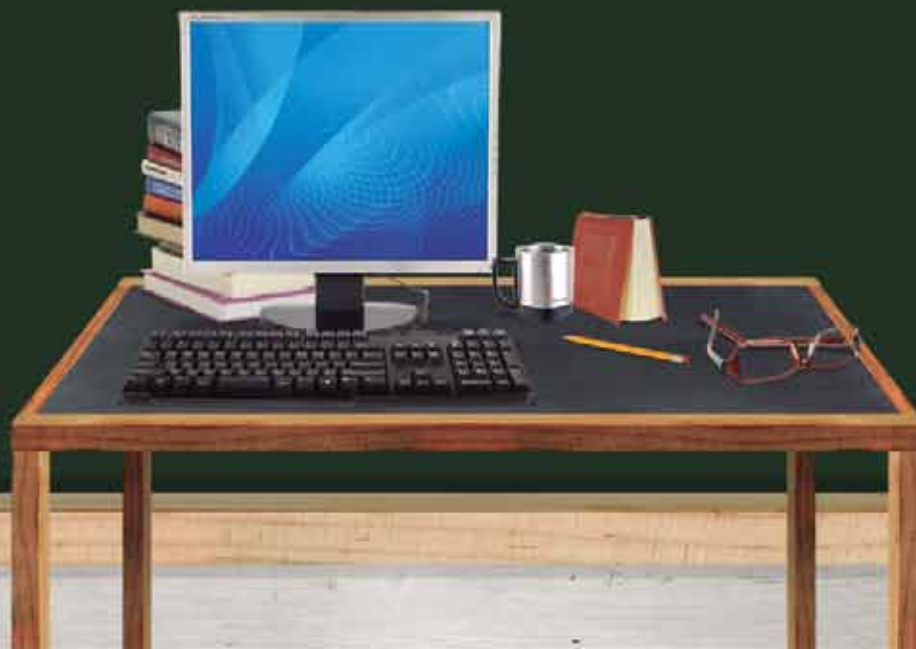


Tabla 1. Efecto de la fertilización sobre híbridos y líneas endocriadas según meta-análisis.

	Híbridos	Líneas Endocriadas
N (sin contabilizar testigos)	69	39
Testigos: Rendimiento promedio (kg/ha)	9064	4188
Tratamientos: Diferencia ponderada (kg/ha)	518	160
Tratamientos: Diferencia ponderada (%)	5,7%	3,8%
Error Estándar (kg)	75,3	40,2
P	< 0,0001	< 0,0001
Intervalos de Confianza de 95% (kg/ha)	370 kg/ha - 665 kg/ha	81 kg/ha - 239 kg/ha

MATERIALES Y MÉTODOS

El meta-análisis fue realizado siguiendo los procedimientos sugeridos por Cooper et. al (2009). Se realizó una búsqueda de la mayor cantidad posible de ensayos de fertilización foliar en la pampa húmeda. Se consultó a organismos independientes que puedan haber realizado ensayos en la materia (INTA y CREA); en bases de datos electrónicas (EBSCO y MINCYT); Google Academic Search y ensayos propios.

Se seleccionaron únicamente los ensayos que: (i) se hayan realizado en la región pampeana; (ii) no hayan sido conducidos por empresas que comercialicen fertilizantes; (iii) incluyan alguna medida de variabilidad interna. Se han seleccionado así 26 trabajos de investigación con 29 testigos y 108 tratamientos de fertilización foliar.

Se han seguido todos los pasos necesarios y generación de variables intermedias para validar las respuestas obtenidas. En cada uno de estos pasos hay ecuaciones involucradas que se seleccionan según los tipos de ensayos que se incluyen en el meta-análisis, las variables utilizadas, etc., existiendo también ecuaciones que validan dichas selecciones:

- Unificar un estimador para todos los ensayos.
- Utilizar una única medida de variabilidad para todos los ensayos (ya que estos los reportan de distintos modos).
- Obtener el mejor estimador de un parámetro poblacional θ que es en este caso el efecto del tratamiento con fertilizantes foliares.
- Ponderar este estimador mediante “pesos” que otorguen mayor relevancia a los ensayos realizados con mayor exactitud.
- Hallar la varianza condicional de cada ensayo acorde a la medida elegida para realizar el meta-análisis.
- Definir si el meta-análisis debe seguir un modelo de efectos fijos o uno de efectos aleatorios (punto clave del meta-análisis).
- Analizar la homogeneidad de los datos, mediante la utilización de distintos índices.
- Analizar la normalidad de los datos.
- Cuantificar la varianza del resultado global, reflejando la varianza dentro de los ensayos y entre los mismos. Esto también requiere del cálculo de valores y estimadores intermedios. El meta-análisis arroja conclusiones conservadoras mediante la inclusión de toda esta variabilidad, determinando de este modo con seguridad si la

respuesta a los tratamientos existe o no, y qué magnitud promedio presenta.

- Terminar de corroborar la significancia de la respuesta hallada calculando intervalos de confianza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó estadísticamente que existe heterogeneidad (media a alta) entre los ensayos incluidos en el estudio, es decir, que los tratamientos tienen efectos distintos sobre el cultivo. El ideal sería en este punto intentar explicar la variabilidad existente entre los ensayos. Esto implica la construcción de un modelo matemático con múltiples variables que contemple: el producto utilizado, dosis, precipitaciones en el ciclo, momento de aplicación, fertilización de base, etc.; que queda propuesta como línea de investigación a seguir en este tema. Este trabajo intenta simplemente contestar si los fertilizantes foliares aumentan o no los rendimientos, en qué medida promedio lo hacen, y no predecir la magnitud de la respuesta en casos puntuales. Igualmente se explorarán algunas de estas posibles fuentes de variabilidad.

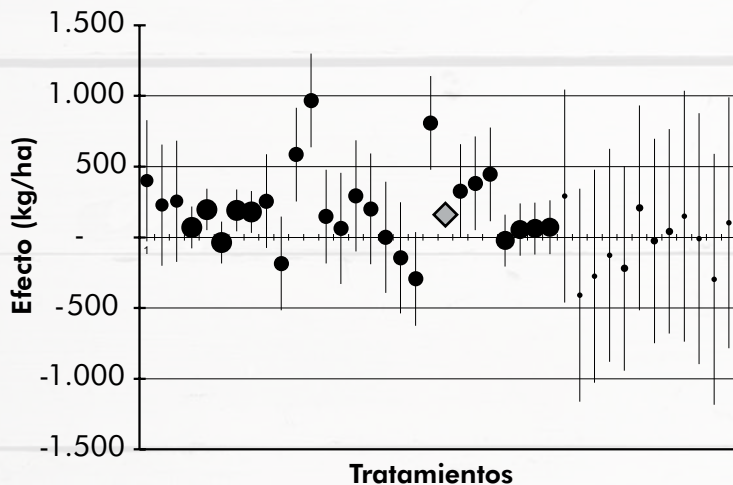
Indagando sobre las posibles fuentes de variación se analizó la posible diferencia en la respuesta que podrían tener híbridos y líneas endocriadas. Los híbridos podrían tener mayor respuesta principalmente por dos motivos: (i) si se espera la misma respuesta en términos porcentuales, es lógico que los híbridos tengan una mayor respuesta en kilos que las líneas endocriadas; (ii) se planteó una hipótesis en la que se obtiene una mayor respuesta por parte de los híbridos debido a que al rendir más, es más probable que encuentren una limitante que pueda ser corregida mediante la fertilización foliar antes que las líneas endocriadas que cubren sus requerimientos con lo disponible en el suelo en la gran mayoría de los casos (esto daría mayores respuestas porcentuales para los híbridos). Por otra parte los cultivos de maíz híbrido y de líneas endocriadas destinadas a la producción de semilla híbrida difieren no solamente en aspectos técnicos sino también económicos. Estos conceptos sugieren realizar una división de los datos según genética (híbridos y líneas endocriadas) realizando dos meta-análisis por separado.

Aunque existe un aumento significativo en kilos para todos los ensayos sin discriminar genética, la respuesta es distinta no solo en kilos sino también en porcentaje de aumento si se tratan por separado los híbridos y las líneas endocriadas (Tabla N° 1). Los incrementos reportados son los promedios ponderados en el meta-análisis, donde los ensayos más precisos (menor varianza) poseen mayor peso.

Meta-análisis para Líneas endocriadas

Se obtuvo media a alta variabilidad en las respuestas dentro de las líneas endocriadas, aún después de la división de datos. Esta elevada variabilidad es marcada en las líneas endocriadas debido probablemente a la inestabilidad intrínseca que las líneas poseen. Se aplicó un modelo de efectos aleatorios debido a los coeficientes de heterogeneidad obtenidos, introduciendo de este modo la variación entre ensayos en las

Figura 1. Forest-Plot perteneciente a las líneas endocriadas, donde el tamaño del punto indica el peso del tratamiento dentro de la ponderación y las barras indican el intervalo de confianza del 95%. Efecto promedio en forma de rombo.



ecuaciones. Los resultados del meta-análisis para las líneas endocriadas se observan en la Tabla N° 1. El valor obtenido no es para nada desechable si se tiene en cuenta el alto valor de lo producido en este caso (semilla híbrida).

La interpretación visual clásica de los meta-análisis consiste en el llamado Forest-Plot, en el cual cada tratamiento figura como un punto cuyo tamaño varía de acuerdo al peso que posee en la ponderación (Fig. N° 1). Los ensayos más precisos poseen mayor peso en la ponderación del promedio final que se realiza en el meta-análisis y por lo tanto el punto que los representa es mayor. Se agregan también los intervalos de confianza del 95% de cada ensayo en forma de líneas verticales que atraviesan el punto. Se puede apreciar cómo la mayoría de los ensayos poseen un efecto positivo, pero no significativo (que queda ilustrado en el hecho que las líneas verticales atraviesan el eje x). El valor medio final figura en forma de rombo, demostrando su significancia al no atravesar el eje x.

Meta-análisis para Híbridos

Se obtuvo una variabilidad calificada entre media y baja, quedando aún trabajo para elaborar modelos matemáticos que expliquen los factores de estas variaciones en las respuestas. Se aplicó al igual que con las líneas endocriadas un modelo de efectos aleatorios. Se observan los resultados del meta-análisis en la Tabla N°1, mostrando la elevada significancia del aumento. El efecto visual se observa en el Forest-Plot (Fig. N° 2).

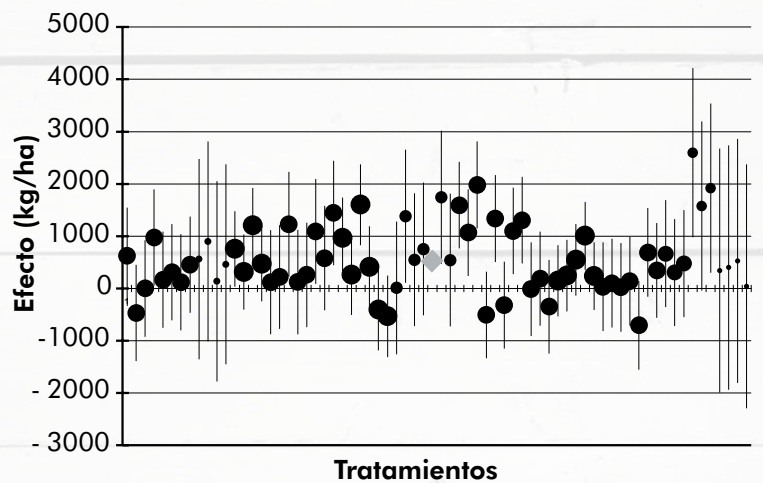
Los resultados obtenidos resaltan al meta-análisis como una poderosa herramienta estadística para otorgar validez a un gran número de ensayos sin significancia estadística.

Efecto del ambiente como modulador de la respuesta.

Se elaboró una hipótesis que establece que a mayores rendimientos de

maíz (mejor ambiente), la respuesta al tratamiento de fertilización foliar es mayor no solamente en kg/ha sino también en porcentaje (aumentos más que proporcionales). La causa podría ser que probablemente a mayores rendimientos (mejor ambiente), el maíz pasa a tener otras limitantes diferentes al agua, que es la principal, cobrando importancia los micro-nutrientes o los macro-nutrientes aplicados en momentos críticos, lo que aumentarían los rendimientos en mayor medida en los ambientes de alto potencial que en los de bajo potencial.

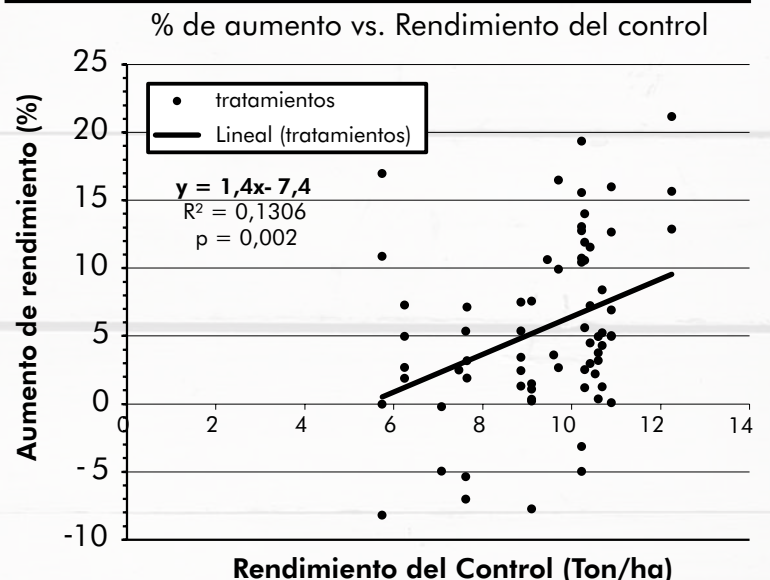
Figura 2. Forest-Plot perteneciente a los híbridos, donde el tamaño del punto indica el peso del tratamiento dentro de la ponderación, las barras indican el intervalo de confianza del 95% y el rombo el efecto promedio.



Se decidió realizar un análisis de regresión que permitiese relacionar el % de aumento de rendimiento con el rendimiento del control. Dentro del grupo de los híbridos se encontró una relación significativa en la cual a mayores rendimientos del control (mejor ambiente), mayores respuestas tanto en kg/ha como en porcentaje (Fig. N° 3).

Esta relación encontrada exige un estudio más amplio pero la ecuación de la recta que estima el incremento en rendimiento es $y = 1,4x - 7,4$, estando x expresada en toneladas e y en porcentaje ($p = 0,002$). Por ejemplo, en un ambiente de 10 Tn/ha la respuesta esperada es de 6,6%, es decir 660 kg/ha. Hay que recordar aquí que esta ecuación es una

Figura 3. % de aumento del rendimiento vs. rendimiento del control en híbridos.



aproximación debido a que restan por explicar varios factores como lo son el producto a aplicar, dosis, etc.

El análisis de regresión que relacionó el % de aumento del rendimiento con el rendimiento del control para líneas endocriadas dio como resultado un modelo no significativo. Esto no implica que los rendimientos no se han incrementado debido al uso de fertilizantes foliares, ya que esto quedó demostrado en el meta-análisis correspondiente a líneas endocriadas. El significado de este resultado es que la respuesta de las líneas endocriadas al uso de fertilizantes foliares no se ve afectada por el rendimiento de los testigos, es decir, por ambientes de mayor o menor rendimiento potencial.


CONCLUSIONES

- El Meta-análisis constituye una poderosa herramienta estadística que le permite al investigador resumir y dar significado estadístico a una gran cantidad de ensayos que, estando aislados, fueron no significativos estadísticamente. Además otorga mayor alcance a las conclusiones comparado con el análisis de ensayos individuales. No obstante cabe señalar que debe ser utilizada cuidadosamente a efectos de evitar sacar conclusiones equivocadas o apresuradas.
- Se hallaron evidencias de que la utilización de fertilizantes foliares en maíz aumenta significativamente el rendimiento en promedio. A nivel del meta-análisis, se encontró una diferencia en el aumento del rendimiento entre los híbridos y las líneas endocriadas. El efecto sobre los híbridos fue un aumento promedio de 518 kg/ha con un intervalo de confianza del 95% de [370 kg/ha - 665 kg/ha], implicando un aumento promedio del 5,7%. El aumento sobre las líneas endocriadas fue de 160 kg/ha en promedio, con un intervalo de confianza del 95% de [81 kg/ha - 239 kg/ha], equivalente a un 3,8 %.

- En híbridos de maíz, a mayores rendimientos (mejores ambientes) la respuesta en rendimiento de los fertilizantes foliares no solo es mayor en kilos sino también en porcentaje. La ecuación de la recta que estima el incremento en rendimiento es $y = 1,4x - 7,41$, estando x expresada en toneladas del testigo e y en porcentaje. Esto probablemente se deba a que el maíz pasa a tener otras limitantes diferentes al agua, que es la principal, cobrando importancia los micronutrientes o los macro-nutrientes aplicados en momentos críticos mediante fertilizaciones foliares.
- En líneas endocriadas, la respuesta en % de aumento del rendimiento por el uso de fertilizantes foliares no se relacionó significativamente con el ambiente a diferencia de los híbridos.
- Los análisis de homogeneidad sugirieron que los tratamientos evaluados son distintos entre sí y tienen efectos diferentes sobre el cultivo. Este punto sugiere una línea de estudio para la elaboración de un modelo matemático que explique la variación en la magnitud de las respuestas mediante factores tales como el producto utilizado, dosis, precipitaciones en el ciclo, momento de aplicación, fertilización de base, etc.
- Este trabajo le permite al productor analizar a la fertilización foliar en maíz como una alternativa para incrementar los rendimientos del maíz disminuyendo la incertidumbre que existía previamente debido a la elevada cantidad de ensayos con resultados no significativos.

AGRADECIMIENTOS

Ing. Agr. (M Sc.) **Gustavo Ferraris** / Lic. **Adriana Pérez** / Ing. Agr. **Fernando Miguez** / Ing. Prod. Agr. **Joaquín Kukla**.



EL META-ANÁLISIS COMBINA ESTADÍSTICAMENTE UN GRAN NÚMERO DE ENSAYOS PARA ESTIMAR EL EFECTO GLOBAL DE UN TRATAMIENTO.