

## ¿Cómo decidir la fertilización nitrogenada en maíz en escenarios de incertidumbre?

Melchiori R.J.M.<sup>1</sup>, Maltese N.E.<sup>1,2,3</sup>, Correndo A.A.<sup>4</sup>, Novelli L.E.<sup>1,2,3</sup>, Caviglia O.P.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

<sup>1</sup>Estación Experimental Agropecuaria Paraná

<sup>1</sup>Departamento de Producción

<sup>2</sup>CONICET

<sup>3</sup>FCA – UNER

<sup>4</sup>Kansas State University

*La producción de maíz en Entre Ríos, se ha incrementado en los últimos años, impulsada, en parte, por cambios en las políticas económicas que permitieron que mejore su competitividad respecto al cultivo de soja. El incremento del área de siembra del cultivo de maíz es un aspecto clave que contribuye con la sustentabilidad de los agro ecosistemas, respondiendo además a satisfacer la creciente demanda local impulsada por las cadenas de producción animal. Sin embargo, la diferencia nutricional de los suelos condiciona los rendimientos alcanzables, y para trabajar bajo escenarios climáticos inciertos, como los pronosticados para el ciclo agrícola 2022/2023, resulta indispensable el uso de herramientas sólidas de análisis para el soporte de decisiones en la fertilización.*

### Maíz en Entre Ríos

Datos del Sistema Integrado para el Seguimiento y Estimación de la Producción de Cereales y Oleaginosas en el Territorio Entrerriano (SIBER) de la Bolsa de Cereales de Entre Ríos (BCER, 2022), muestran dos periodos en la evolución de la producción de maíz en la última década. Antes de 2016, se cultivaron alrededor de 180 mil ha de maíz, mientras que desde 2016 hasta la actualidad, el área cultivada creció en forma constante, alcanzando 461 mil ha en el último ciclo agrícola. En el mismo periodo, el rendimiento medio provincial fue cercano a 6 t ha<sup>-1</sup>, con un máximo de 8 t ha<sup>-1</sup> en 2018 y un mínimo de 3,2 t ha<sup>-1</sup> en el ciclo 2021/22. Una característica de este periodo, es que el rendimiento medio provincial varió fuertemente entre ciclos agrícolas, con incrementos de hasta 67 % y disminuciones de hasta 37 %, mostrando que la variación interanual promedio fue de 26 %.

En este contexto regional, es de interés re-evaluar la brecha de producción en maíz, es decir, la diferencia entre el rendimiento potencial limitado por agua y el rendimiento medio real alcanzado. Esta brecha puede aproximarse según estudios previos a nivel nacional, en el orden de las 5 t ha<sup>-1</sup> (Aramburu Merlos *et al.*, 2015). Esta situación sugiere que la producción provincial podría casi duplicarse si los rendimientos alcanzables (sólo limitados por agua) y reales fueran similares. Estimaciones más factibles, donde se podría reducir la brecha un 20 %, implican incrementar el rendimiento promedio provincial de 6 a 7 t ha<sup>-1</sup>. Esto implicaría, sobre la base de la superficie provincial sembrada con maíz en el último ciclo agrícola, cerca de medio millón más de toneladas, lo que contribuiría a satisfacer la creciente demanda provincial.

Dentro de los diversos factores que condicionan el rendimiento del maíz, la variabilidad en el régimen de lluvias es una de las causas principales que limita en forma directa la producción. Dicha variabilidad es, a la vez, condicionante en la toma de decisiones de prácticas de manejo sobre el cultivo, como la fecha de siembra, la dosis de fertilización y la densidad de plantas. Así, el rechazo al riesgo empresarial suele predominar y se utiliza como justificación en circunstancias de inestabilidad climática como la que anticipan los pronósticos de mediano plazo. A esto, también se suman factores del mercado, principalmente variaciones en precio de los granos y los fertilizantes.

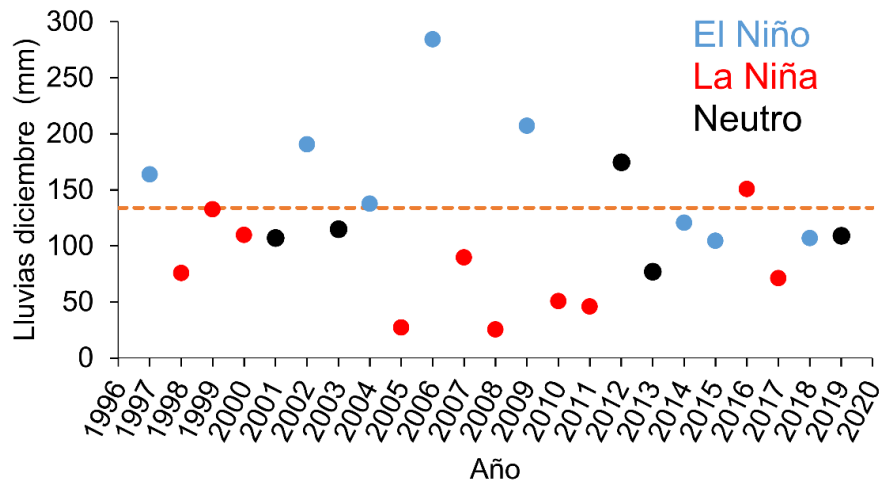
### La variabilidad climática en el centro oeste de Entre Ríos

En general, las lluvias medias para el cultivo de maíz de siembra temprana resultan adecuadas en la zona, ya que, entre septiembre y marzo, llueven en promedio 770 mm. Sin embargo, un aspecto que caracteriza el clima de nuestra región y que condiciona la productividad del maíz, es la alta variabilidad de las lluvias durante el periodo crítico a inicios del verano.

Particularmente, en el último ciclo agrícola se observó de manera marcada la afectación del rendimiento asociado a las escasas lluvias y olas de calor en el mes de diciembre e inicios de enero.

Reportes de la BCER indicaron que la lluvia promedio del mes de diciembre en Entre Ríos fue de 134 mm para el periodo 2004 – 2020, mientras que las lluvias en diciembre del 2021 fueron de 15 mm (una disminución del 89 %, respecto del promedio histórico mensual). Estas condiciones en el ciclo agrícola 2021/22, que ejemplifican la alta variabilidad de las lluvias, penalizaron fuertemente el rendimiento del maíz en seco, el cual registró el rendimiento medio a nivel provincial más bajo de los últimos 10 años (3,2 t ha<sup>-1</sup>).

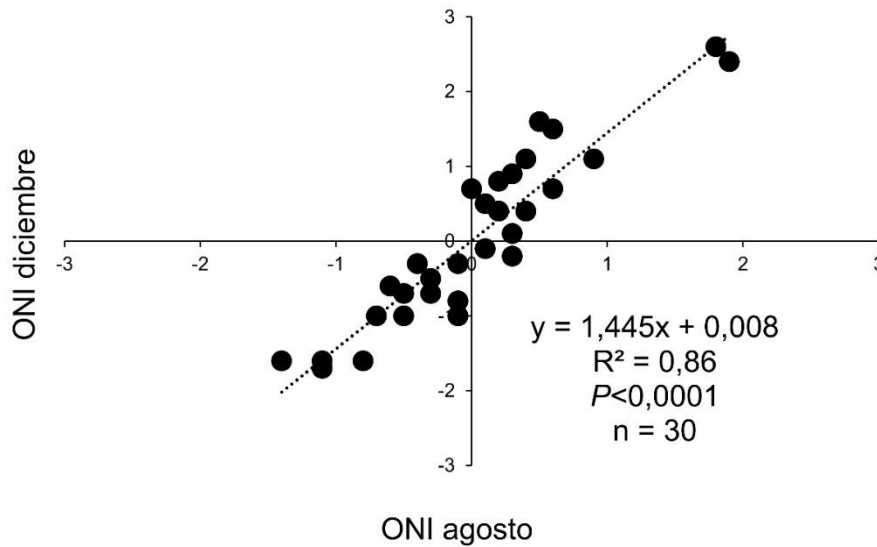
En términos generales, la floración del maíz para fechas de siembra de inicios de septiembre, se ubica entre el 20 de noviembre y el 10 de diciembre, según el ciclo del híbrido. Durante este periodo, las lluvias medias fueron de 80 mm para el periodo 2000-2021, con un rango entre 18 y 203 mm. Si se analiza diciembre (donde comúnmente ocurre el periodo crítico), los datos demuestran que en 6 de cada 10 años las lluvias se ubican por debajo del valor histórico de 134 mm (Fig. 1). En este sentido, teniendo en cuenta el fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENSO por sus siglas en inglés; Golden Gate Weather Services. 2022) y el pronóstico para diciembre durante el periodo 2000-2021, en los años Niña el promedio de lluvias en diciembre fue de 78 mm mientras que en los años Niño promedió 168 mm. Por esta razón, el rendimiento del cultivo de maíz temprano presenta una elevada variabilidad interanual.



**Fig. 1.** Evolución de las lluvias del mes de diciembre para el período 1997-2020 obtenidos del observatorio Agrometeorológico del INTA EEA Paraná. La línea horizontal naranja punteada indica el promedio histórico de lluvias para el mes de diciembre. La categorización de los años según fases del ENSO se realizó a partir de datos de Golden Gate Weather Services (2022) (<https://ggweather.com/enso/oni.htm>).

Actualmente, existen métodos de pronósticos que permiten anticipar los escenarios climáticos probables, lo que puede contribuir a la toma de decisiones, como el ajuste de prácticas de manejo del cultivo acorde a una condición climática esperada.

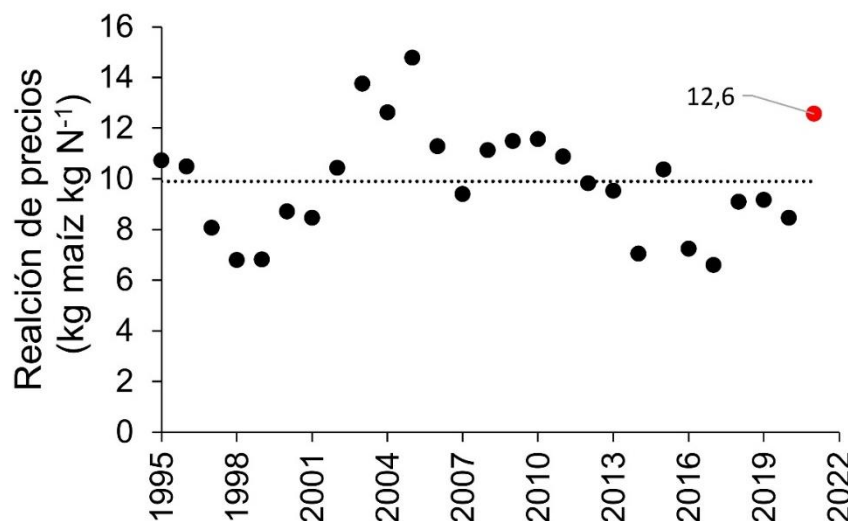
Una de las herramientas que se puede utilizar, corresponde al índice del niño oceánico (ONI por sus siglas en inglés). Analizando los valores de ONI para el mes de agosto, se ha establecido una relación positiva muy estrecha con los valores ONI de diciembre (Fig. 2; NOAA. 2022), lo cual evidencia su relevancia como un estimador probable de ocurrencia de períodos secos o húmedos durante la etapa de floración, de gran importancia para definir estrategias de “escape” (fecha de siembra, ciclo del híbrido) y/o estrategias que confieran tolerancia (tipo de híbrido, densidad de siembra) al estrés hídrico.



**Fig. 2.** Estimación del valor del índice Oceánico del Niño (ONI) en el periodo centrado en floración (diciembre) en función del índice ONI en agosto para el periodo 1990-2020, los valores corresponden a la media móvil de 3 meses centrado en los meses de interés para la región del Niño 3.4. La línea negra representa la función ajustada al set de datos. Fuente: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.

### Efectos de la variabilidad de precio de maíz, y costo de fertilizante sobre decisión de fertilización

Así como se ha demostrado que el clima presenta amplia variabilidad interanual, también puede demostrarse que la variación en las relaciones de precios es de gran magnitud (i.e. kg de maíz vs kg N de fertilizante), lo que resulta relevante al momento de decidir la dosis óptima económica de fertilización para los cultivos. Analizando el comportamiento de la relación de precios entre la urea y el grano de maíz para los últimos 25 años en la región, en promedio para el periodo analizado, se requirieron 9,9 kg de maíz para pagar 1 kg de N (Fig. 3), con variaciones entre 6,6 y 14,8 kg de maíz kg de N<sup>-1</sup> (Fig. 3). Si el rendimiento no varía, en la medida que ésta relación crece, se reduce el retorno del gasto en fertilizante. Las condiciones menos favorables (alta relación de precios) se registraron en 2003 y 2006, donde las relaciones insumo - producto fueron aún menos favorables para la fertilización que las del ciclo agrícola actual (2022).



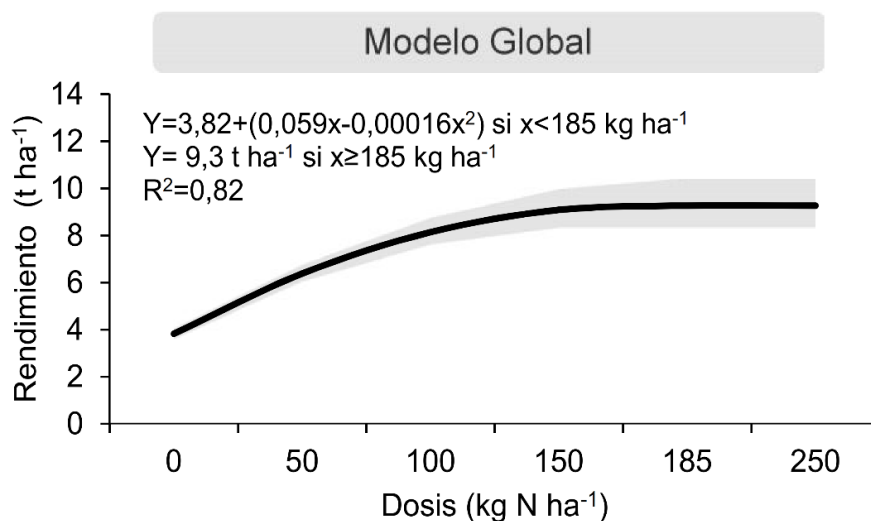
**Fig 3.** Relaciones de precio de kg de maíz por kg de N. Periodo 1995-2022. La línea horizontal negra representa la relación de precios promedio para el periodo analizado. El punto rojo representa la relación de precio actual. Fuente: Grupo Sistemas de Producción y Economía - INTA EEA Paraná.

## La decisión de fertilización del cultivo de maíz ante la incertidumbre climática, el costo del fertilizante y el precio de los granos

La estimación de la dosis de fertilización en maíz requiere de criterios de diagnóstico y modelos de recomendación. En el caso del manejo de la fertilización nitrogenada, la demanda de este nutriente por los cultivos depende del nivel de rendimiento esperado, mientras que la dosis óptima económica depende de la respuesta a la fertilización y de la relación de precios. Así planteado, es un problema con tres aspectos inciertos, aunque posibles de resolver a partir de estudios que los contemplen en forma conjunta. En este sentido, la incertidumbre reside en las siguientes preguntas: ¿cuál es el rendimiento esperable?, ¿cuál es el precio del maíz a cosecha?, y ¿cuál es el precio del fertilizante?

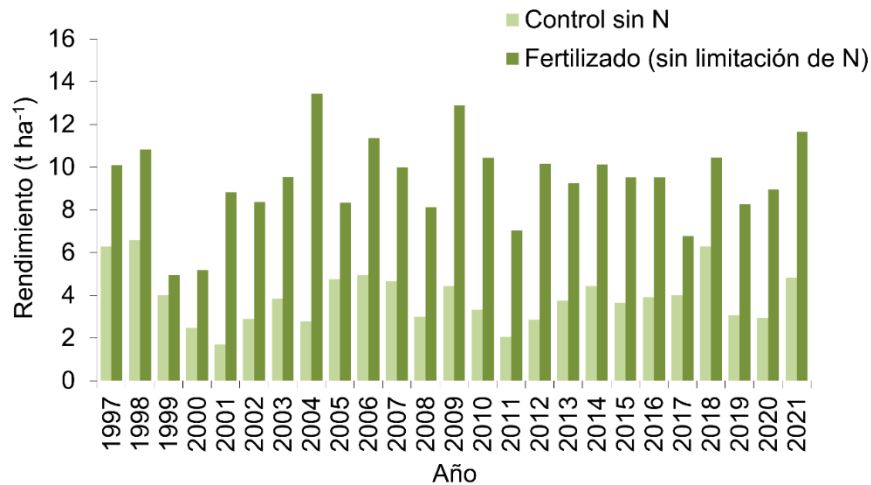
Bajo este contexto, datos provenientes de estudios de fertilización iniciados hace 25 años en INTA EEA Paraná, resultan promisorios para generar modelos de recomendación para nitrógeno (N) en maíz, integrando la variabilidad interanual de los tres aspectos descriptos.

En términos generales, los métodos de recomendación de fertilización se basan en curvas de respuesta promedio (ver Fig. 4). Por lo general, y bajo el criterio aceptado que la dosis de N depende del rendimiento del cultivo, se cuenta en el mejor de los casos, con modelos de recomendación para distintos niveles de rendimiento, aunque no se ha incorporado en este tipo de análisis, la variabilidad climática interanual predicha *ex ante*, ni los cambios en las relaciones de precio de granos y fertilizantes que modifican el retorno del gasto en fertilización. En este trabajo proponemos su análisis y el efecto de estos factores sobre las recomendaciones generales para la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz.



**Fig. 4.** Modelo general de respuesta a la fertilización nitrogenada para maíz para el Centro Oeste de la Provincia de Entre Ríos (INTA, EEA Paraná. Experimentos en el periodo 1995 – 2021).

El análisis de los resultados de fertilización a lo largo del periodo 1997-2021 muestra que el rendimiento promedio de maíz temprano sin limitación de N en Paraná fue de 9,2 t ha<sup>-1</sup> (Fig. 5). Sin embargo, es destacable mencionar que las variaciones entre años estuvieron en un rango de 5,1 y 13,4 t ha<sup>-1</sup>, lo cual evidencia la magnitud del efecto del ambiente (año climático). En efecto, la respuesta media a la fertilización fue de 5,1 t ha<sup>-1</sup> con una variación entre años del 38 % para una dosis óptima agronómica de 185 kg N ha<sup>-1</sup> (Fig. 4). De manera asociada a las variaciones en la respuesta a la fertilización, la eficiencia agronómica de uso del N, medida como los kg de maíz producidos por kg de N aplicado, mostró un valor medio de 40 kg de maíz por kg de N, con variaciones entre 32 y 48 kg de maíz por kg de N para un intervalo de confianza del 95 % de probabilidad.

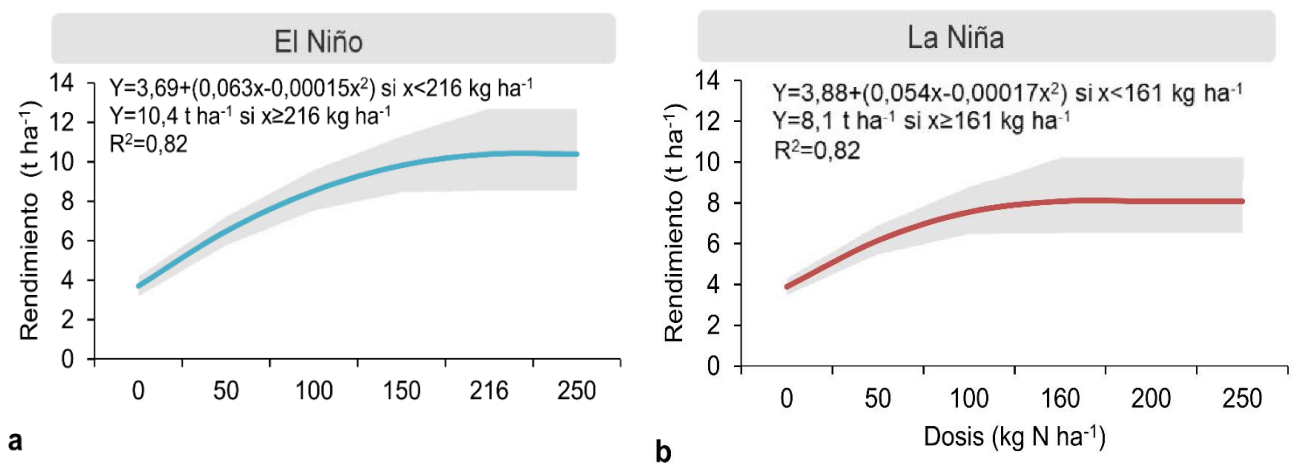


**Fig. 5.** Rendimiento medio del cultivo de maíz sin agregado de nitrógeno (control sin N) y fertilizado (sin limitación de N) para el Centro Oeste de la Provincia de Entre Ríos (INTA, EEA Paraná. Experimentos en el periodo 1997 – 2021).

En el mismo análisis, se determinó que la dosis óptima económica media (DOE) fue de 154 kg N ha<sup>-1</sup> y varió entre 130 y 180 kg N ha<sup>-1</sup>, para un intervalo de confianza de 95 % de probabilidad.

El estudio del manejo de la fertilización a través de una larga serie de años permite dimensionar la variabilidad interanual del rendimiento y los aspectos que afectan las recomendaciones de fertilización. Como se mencionó previamente, la disponibilidad hídrica es el factor de mayor peso en la determinación del rendimiento del maíz en condición de secano, y dado que los diagnósticos son predictivos, se propuso incorporar pronósticos climáticos en el análisis basado en el fenómeno ENSO, como los comúnmente denominados años Niño, Niña y Neutro. Sin detallar particularidades de cómo se generan estos pronósticos, se pueden obtener datos para el periodo pre siembra y ser utilizados para predecir las lluvias esperables en el periodo crítico y a partir de ello, ajustar el rendimiento acorde a la oferta ambiental esperada.

Utilizando el criterio de pronósticos (Niño, Niña y Neutro), se clasificaron los últimos 27 ciclos agrícolas en base a los datos reportados por Golden Gate Weather Services (<https://ggweather.com/enso/oni.htm>), y se generaron modelos de recomendación para cada conjunto de datos (Fig. 6). De acuerdo con lo anterior, los rendimientos medios para cada tipo de ciclo agrícola, para las condiciones de año Niño y Niña, respectivamente.



**Fig. 6.** Modelos de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz, para años Niño (a) y Niña (b) en el Centro Oeste de la Provincia de Entre Ríos (INTA, EEA Paraná. Datos del periodo 1995 – 2021).

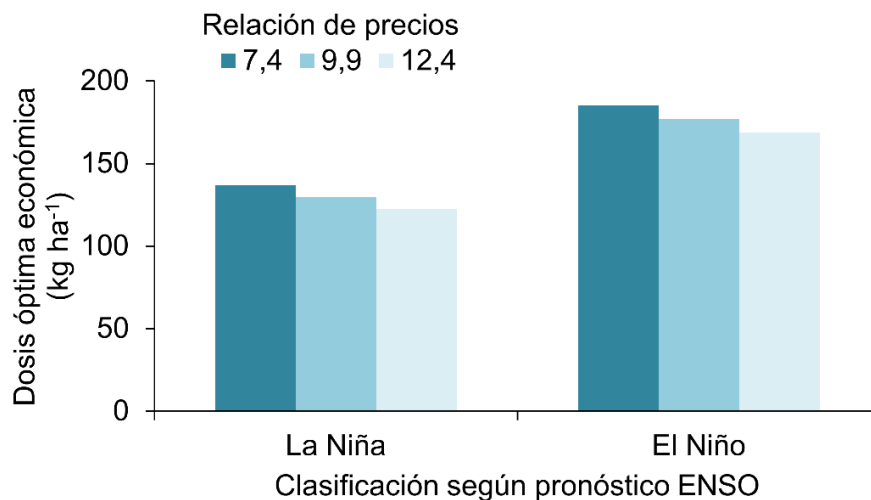
De acuerdo con lo señalado anteriormente, otro aspecto que varía de manera independiente es la relación de precios, de manera que, para decidir la fertilización, pueden considerarse las variaciones en rendimiento debidas al clima esperado y en las relaciones de precio, simultáneamente. Para el periodo analizado (1995-2022), la variación interanual de la relación de precios estuvo entre 8,5 y 11,3 para los valores correspondientes al 25 % inferior y 75 % superior de las relaciones de precios observadas en el periodo, respectivamente.

De esta forma pueden estimarse múltiples escenarios para el cálculo de la DOE a partir de los parámetros de las curvas cuadráticas ajustadas para los rendimientos alcanzables en los distintos tipos de años climáticos (Figs. 5 y 6) y las relaciones de precios particulares de cada situación de producción a partir de las ecuaciones descriptas a continuación:

$$\begin{aligned} \text{DOE} &= ((\text{RP}/1000) - 0,063032)/(2*(-0,00015)) && \text{(Ecuación para año Niño)} \\ \text{DOE} &= ((\text{RP}/1000) - 0,053981)/(2*(-0,00017)) && \text{(Ecuación para año Niña)} \\ \text{DOE} &= ((\text{RP}/1000) - 0,059505)/(2*(-0,00015)) && \text{(Ecuación para año Neutro)} \end{aligned}$$

Donde RP es la relación de precios kg de maíz kg de N<sup>-1</sup>.

En la Fig. 7 se puede observar que la DOE es mayor en años Niño que en Niña y que la misma disminuye con el incremento en la relación de precios. Sin embargo, el escenario climático es el factor que modifica en mayor medida los niveles de DOE.



**Fig. 7.** Dosis óptima económica de N para maíz en años Niño y Niña en el Centro Oeste de la Provincia de Entre Ríos (INTA, EEA Paraná. Datos del periodo 1995 – 2021) para tres relaciones de precios maíz/N fertilizante.

### ¿Qué aprendimos a partir de esta experiencia?

- La incertidumbre climática para el cultivo de maíz, es de media a alta, con 6 de cada 10 años, con lluvias menores a las normales para el mes donde transcurre el periodo crítico de maíces tempranos (diciembre), lo que anticipa el riesgo del cultivo a sufrir estrés hídrico y disminución de rendimiento.
- La variación de rendimiento del maíz para condiciones sin limitación de N (cultivos bien fertilizados), fue de 37 %, mientras que los tratamientos control sin fertilización variaron alrededor del 26 %.
- La relación media de precio de maíz y N es de 9,9 kg de maíz kg de N<sup>-1</sup>, siempre favorable en relación con las respuestas esperadas, y con variaciones más probables entre 6 y 12 kg de maíz kg de N<sup>-1</sup>.
- La predicción del clima, según el año Niño o Niña, y las relaciones de precios de maíz y N, se integran para proponer dosis óptimas de fertilización en escenarios de incertidumbre climática y de precios.
- La DOE media fue 177 kg de N ha<sup>-1</sup> en año Niño, y de 130 kg de N ha<sup>-1</sup> en año Niña. Con variaciones de 5 % en la DOE cuando la relación de precios varía ±25 %, lo cual indica que la dosis de fertilización cambia más por efecto del tipo de año que por la relación de precios.

### Para seguir leyendo...

BCER 2022. Bolsa de Cereales de Entre Ríos 2021. Evolución de la superficie sembrada con maíz en la provincia de Entre Ríos. <https://www.bolsacer.org.ar/Fuentes/siberd.php?Id=1276>. [Verificación: julio de 2022].

ARAMBURU MERLOS F., MONZON J.P., MERCAU J.L., TABOADA M., ANDRADE F.H., HALL A.J., JOBBAGY E., CASSMAN K.G. y P. GRASSINI 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. Field crop research 184, 145-154.

GOLDEN GATE WEATHER SERVICES 2022. Golden Gate Weather Services. <https://ggweather.com/enso/oni.htm>. [Verificación: septiembre de 2022].

NOAA 2022. National weather services – Climate prediction center. [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml). [Verificación: septiembre de 2022].

Para mayor información: [melchiori.ricardo@inta.gob.ar](mailto:melchiori.ricardo@inta.gob.ar)