

Influence of climate on corn (*Zea mays*) yield in the center of Buenos Aires province, Argentina

Influencia del clima en el rendimiento de maíz (*Zea mays*) en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina

María C. Miranda del Fresno¹ and Adriana Confalone²

¹*Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA-CICPBA), Facultad de Ciencias Humanas, UNCPBA. Paraje Arroyo Seco s/n, 7000 Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina*

²*Núcleo de Estudios en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático (NAACCE), Facultad de Agronomía, UNCPBA. Av. República de Italia 780, 7300 Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina*

Email: cmdelfresno@fch.unicen.edu.ar; aec@faa.unicen.edu.ar

María C. Miranda del Fresno: <https://orcid.org/0000-0002-6088-9759>

Adriana Confalone: <https://orcid.org/0000-0003-3402-3537>

The crop yield is the result of the interactions of the continuum soil-plant-atmosphere in the time. The understanding of these interactions and the description of climate effects on the yield requires a constant effort to reduce the negative effects of the climatic changes. The objective of this study was to determine the influence of agroclimatic variables on the increase of corn (*Zea mays*) yield for the last decades in Azul municipality, Buenos Aires province, Argentina. The yield series of Ministerio de Agricultura was compared, where a tendency to the increase was observed, with a yield series corrected through a fit equation, to which the technology effect and two yield series simulated in the program Decision Support System for Agrotechnology: "potential yield" and dry "potential yield" for an agricultural soil were take off. These results were linked with agroclimatic variables of maximum and minimum temperature, rainfalls and global radiations. It could verified that when the technology effects disappear, decrease yield (30 %). The increase of potential yield (6.20 %) is associated with the increase of global radiation and temperature. The decrease of rainfalls in the last decade (30 %) cause the fall of the corrected yield series (11 %) and the dry potential yield series (25 %). It is concluded that the climate has a negative effect on yield, but the technology hide it. The decrease of rainfalls in the spring-summer months is the most influence element in the yield.

Key words: *crop, agroclimatic variables, technology, Decision Support System for Agrotechnology Transfer.*

The pampas agroecosystems record deep changes since some decades, resulted in an expansion to more dry areas, mainly due to economic, institutional and climatic conditions, and also to the incorporation of new technologies (Bert *et al.* 2021). The increase of international prices of raw matters, in special soybean (Zorzoli 2018), had motivated the production of certain crops. In Argentina, Uruguay and the southeastern of Brazil, had been recorded the highest climate changes worldwide in the last decades of 20th century. Especially, in the pampas area increased the spring- summer rainfalls, the minimum temperatures increased and the maximum decreased (Magrín *et al.* 2005 and Camillioni and Barros 2020).

El rendimiento de un cultivo resulta de las interacciones del "continuum" suelo-planta-atmósfera en el tiempo. La comprensión de esas interacciones y la descripción de los efectos del clima en el rendimiento demandan un esfuerzo constante para reducir los efectos negativos de la variabilidad climática. El objetivo de este estudio fue determinar la influencia de las variables agroclimáticas en el aumento del rendimiento del maíz (*Zea mays*) para las últimas décadas en el municipio Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. Se comparó la serie de rendimiento del Ministerio de Agricultura, donde se observó una tendencia al aumento, con una serie de rendimiento corregida mediante una ecuación de ajuste, a la que se le quitó el efecto de la tecnología, y dos series de rendimiento simuladas en el programa Decision Support System for Agrotechnology: 'rendimiento potencial' y 'rendimiento potencial de secano' para un suelo agrícola. Estos resultados se vincularon con variables agroclimáticas de temperatura máxima y mínima, precipitaciones y radiación global. Se pudo constatar que al eliminar el efecto de la tecnología, el rendimiento disminuye (30 %). El aumento del rendimiento potencial (6.20 %) se asocia al incremento de la radiación global y la temperatura. La disminución de las precipitaciones en la última década (30 %) provoca la caída de la serie rendimiento corregida (11 %) y del rendimiento potencial de secano (25 %). Se concluye que el clima ejerce un efecto negativo en el rendimiento, pero la tecnología lo enmascara. La merma en las precipitaciones en los meses primavera-estivales es el elemento que más influye en el rendimiento.

Palabras clave: *cultivo, variables agroclimáticas, tecnología, Decision Support System for Agrotechnology y Transfer.*

Los agroecosistemas pampeanos registran profundos cambios desde hace algunas décadas, traducidos en una expansión hacia áreas anteriormente más secas, debido principalmente a condiciones económicas, institucionales y climáticas, y también a la incorporación de nuevas tecnologías (Bert *et al.* 2021). El incremento de los precios internacionales de las materias primas, en especial la soja (Zorzoli 2018), ha motivado la producción de ciertos cultivos. En Argentina, Uruguay y el sudeste de Brasil, se han registrado los mayores cambios en el clima a nivel mundial en las últimas décadas del siglo XX. Particularmente, en la región pampeana aumentaron las lluvias de primavera-verano, las temperaturas mínimas subieron y las máximas se redujeron (Magrín *et al.* 2005

The Azul municipality is located in Buenos Aires province, Argentina, to 300 km of the southwest of Buenos Aires city. Approximately, 50% of this municipality, center and north area has livestock talent, while the south area has better conditions for agriculture. In agreement with Requesens (2011), livestock had been moving to lands with higher edaphic restrictions and the agriculture has advancing in livestock places, with an important role of soybean among summer crops. Particularly, the corn (*Zea mays*) is one of the summer crops most important in Azul municipality. It is a crop that could play an important function from the environmental point of view, due to its contribution to atmospheric carbon capture and to the recovery of the soil organic matter, in accordance with its high productivity and stubble volume (Bocchio *et al.* 2019).

When consider the climate changes in the pampas area during spring and summer (Magrín *et al.* 2005), in addition of above mentioned, it is of interest to evaluate a summer crop as a corn with respect to the climate effects. This evaluation can provide valuable information that contributes to increase yields and mitigate the consequences of climate variability, when develop adaptation strategies to climatic changes (Zhou *et al.* 2017, Meira *et al.* 2019 and Bassu *et al.* 2021).

Materials and Methods

In order to determine the influence of agroclimatic variables on the increase of corn yield in the last decades in Azul municipality, the agroclimatic requirements of this crop with respect to the agroclimatic variables of Azul municipality were analyzed.

The daily agrometeorological data with their standard deviation were obtained, which include maximum and minimum temperatures, total rainfalls and global radiation of the center area from Azul municipality, recorded by Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía (CRAGM) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). A climatic series of 30 years (1988-2018) was obtained. A total of three decades were considered because with relation to agrometeorological data in climatology, 30 years is the minimum data set that allow defining the climate of a place. From them, the monthly average values were analyzed, from November to March, because they are the most important month in the corn growth. The 2009-2018 decade and the date set of the two previous decades (the last 10 years with the previous 20) were compared, since a decade is a recommended period to study the climate variability in this type of study.

Later, the corn yield was obtained, according to the data of Estimaciones Agrícolas del Sistema Integral de Información Administrativa del Ministerio de

y Camillioni y Barros 2020).

El municipio de Azul se encuentra en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, a 300 km al sudoeste de la ciudad de Buenos Aires. Aproximadamente, 50 % de este municipio, zona centro y norte, posee aptitud ganadera, mientras que el sector sur tiene mejores condiciones para la agricultura. De acuerdo con Requesens (2011), la ganadería se ha ido corriendo a tierras con mayores restricciones edáficas y la agricultura ha avanzado en sitios ganaderos, con protagonismo de la soja entre los cultivos de verano. En particular, el maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos de verano más importantes en el municipio de Azul. Se trata de un cultivo que podría desempeñar una función relevante desde el punto de vista ambiental, por su aporte a la captación de carbono atmosférico y a la recuperación de la materia orgánica del suelo, en virtud de su elevada productividad y volumen de rastrojo (Bocchio *et al.* 2019).

Al considerar las evidencias de cambios en el clima de la región pampeana durante la primavera y el verano (Magrín *et al.* 2005), además de lo antes mencionado, es de interés evaluar un cultivo de verano como el maíz con respecto a los efectos del clima. Esta evaluación puede aportar información valiosa que contribuya a incrementar los rendimientos y mitigar las consecuencias de la variabilidad del clima, al desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático (Zhou *et al.* 2017, Meira *et al.* 2019 y Bassu *et al.* 2021).

Materiales y Métodos

Para determinar la influencia de las variables agroclimáticas en el aumento del rendimiento del maíz en las últimas décadas en el municipio de Azul, se analizaron los requerimientos agroclimáticos de este cultivo con respecto a las variables agroclimáticas del municipio de Azul.

Se obtuvieron los datos agrometeorológicos diarios con su desviación estándar, que comprendieron temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones acumuladas y radiación global de la zona centro del municipio de Azul, registrados por el Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía (CRAGM) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). Se completó así una serie climática de 30 años (1988-2018). Se consideraron tres décadas porque en relación con los datos agrometeorológicos, en climatología, 30 años es el mínimo conjunto de datos que permite definir el clima de un lugar. A partir de ellos, se analizaron los valores promedios mensuales, de noviembre a marzo, por ser los meses más importantes en el crecimiento del maíz. Se comparó la década 2009-2018 con el conjunto de datos de las dos décadas previas (los últimos 10 años con los 20 anteriores), puesto que una década es un período indicado para el estudio de la variabilidad del clima en estudios de este tipo.

Posteriormente, se obtuvo el rendimiento del maíz, según los datos de las Estimaciones Agrícolas del Sistema Integral de Información Administrativa del

Agricultura (MinAgri), named 'MinAgri yield', for the period 1988-2018.

The MinAgri yield series at first was fitted to different linear and non linear models using the year as independent variable to separate the technology effect. Different authors suggest that when there is a positive tendency in the data (after linear and non linear fit), is associate to technology progress (new hybrids, improvements in fertilization levels, sowing systems, pests and diseases control, among others). In this way the relation with agroclimatic variables were analyzed. In addition, as do not superseded the non linear models of the linear model performance, it was chose this fit through the program Curve Expert v. 1.40 (Hyams 2009) to obtain the term used in equation 1, proved in Miranda del Fresno *et al.* (2017), which allow the series correction. "The corrected MinAgri" was obtained:

$$Rc_i = R_i - [R(x_i) - R(x_0)] \quad (1)$$

Rc_i = corrected yield in the year i

R_i = original yield of the year i

$R(x_i)$ = yield of the estimated year (i) by linear or non linear fit

$R(x_0)$ = yield of the initial year (0) estimated by linear or non linear fit

Later, two yield series were simulated with the program Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) v.4.6, which include 16 crops models of economic importance and allow simulating their growth, when provide true estimates of the crops performance, according to different management strategies and environmental conditions (Hoogemboom *et al.* 2019).

This simulation was use to eliminate the effects of different technologies, sowing dates and soils, in order to determine the "potential yield"(without nutritional deficiency and irrigation) and the "dry potential yield" (without nutritional deficiency with the water contribution that comes from the rainfalls).

The Weather Man tool from the DSSAT program was used, adding the Ceres-corn model (Hoogemboom *et al.* 2019):

a) climate: maximum and minimum temperature, rainfalls and global radiation, with daily data from CRAGM-UNCPBA (1988-2018)

b) soil: chemical and physical properties of each horizon of the profile, with actual profiles (Pazos 2009)

c) management: waste, sowing dates (November 1st), fertilization, irrigation.

d) genetic coefficient of cultivars: species, ecotype and cultivar, obtained from the calibration performed by Confalone *et al.* (2016) for Azul municipality.

Finally, the five months of agrometeorological data were averaged and related with the corrected MinAgri

Ministerio de Agricultura (MinAgri), denominado 'rendimiento MinAgri', para el período 1988-2018.

La serie de rendimiento MinAgri se ajustó en un inicio a diferentes modelos lineales y no lineales, usando el año como variable independiente para separar el efecto de las tecnologías. Distintos autores sugieren que cuando se observa una tendencia positiva en los datos (luego del ajuste lineal o no lineal), se asocia a los avances de la tecnología (nuevos híbridos, mejoras en niveles de fertilización, sistemas de siembra, control de plagas y enfermedades, entre otros). De esta forma se pudo analizar la relación con las variables agroclimáticas. Además, al no superar los modelos no lineales el desempeño del modelo lineal, se optó por este ajuste mediante el programa Curve Expert v. 1.40 (Hyams 2009) para obtener los términos utilizados en la ecuación 1, probada en Miranda del Fresno *et al.* (2017), que permitieron la corrección de la serie. Se obtuvo así el rendimiento 'MinAgri corregido':

$$Rc_i = R_i - [R(x_i) - R(x_0)] \quad (1)$$

Rc_i = rendimiento corregido en el año i

R_i = rendimiento original del año i

$R(x_i)$ = rendimiento del año estimado (i) por ajuste lineal o no lineal

$R(x_0)$ = rendimiento del año inicial (0) estimado por ajuste lineal o no lineal

Luego, se simularon dos series de rendimientos con el programa Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) v.4.6 o Sistema de Apoyo de Decisiones para la Transferencia de la Agrotecnología, que incorpora 16 modelos de cultivos de importancia económica y permite simular su crecimiento, al proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos, según diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales (Hoogemboom *et al.* 2019).

Esta simulación se utilizó para eliminar los efectos de diferentes tecnologías, fechas de siembra y suelos, a fin de determinar el rendimiento denominado 'rendimiento potencial' (sin deficiencia nutricional y regado) y el 'rendimiento potencial de secano' (sin deficiencia nutricional con el aporte de agua que proviene de las precipitaciones).

Se utilizó la herramienta Weather Man del programa DSSAT, incorporando al modelo Ceres-maíz (Hoogemboom *et al.* 2019):

a) clima: temperatura máxima y mínima, precipitaciones y radiación global, cargados con datos diarios del CRAGM-UNCPBA (1988-2018)

b) suelo: propiedades físicas y químicas de cada horizonte del perfil, cargado con perfiles reales (Pazos 2009)

c) manejo: residuos, fechas de siembra (1 de noviembre), fertilización, riego.

d) coeficientes genéticos de los cultivares: especie, ecotipo y cultivar, obtenidos de la calibración realizada por Confalone *et al.* (2016) para el municipio de Azul.

yield, estimating the average and the variation coefficient ($VC = \text{standard deviation} / \text{average}$ for the last decade and the previous years and the correlation between each climatic variable and the yield. The corrected yield series was contracted with the variability of the agroclimatic elements.

Results and Discussion

The corn is the third crop most important of Azul municipality, after the soybean and wheat, taking into account the sown surface. Between 1988/89 and 2007/08 were sown as average 23 745 ha, and 31 159 ha between 2008/09 and 20017/18 respectively.

In relation to the agroclimatic requirements, as being a C₄ species, the corn is demanding regarding temperature. This is the main controller factor of growing and development of this crop, whenever there was an adequate humidity (Fassio *et al.* 2018). The mean minimum temperature of the soil for germination should be of 8-9 °C, with 23 °C as optimum and maximum 30 °C and sufficient humidity to germination takes place. The different phenological stages have different heat requirements, but generally are accepted that the basic temperature be 8 °C, the optimum from 30 to 34 °C, and the maximum from 40 to 44 °C (Andrade *et al.* 1996).

In Azul municipality, corn may growth between November and March, when global radiation is of wide availability. From halfway through October to halfway through March, receive 22 MJ/m²d or more, low limit for high cereal productions (Navarro Duymovich *et al.* 2011). The annual mean temperature is 13.61 °C. The maximum varies from 28 to 29 °C in January, and from 12 to 13 °C in June. The minimum range between 13° and 15 °C in January, and between 0 to 2 °C in June without reach as average less than 9 °C between November and March, which gave acceptable conditions for the growing and development of corn in the municipality.

Regarding rainfalls, from the sowing to maturity, the corn needs of 500 to 800 mm, with daily requirement of 5 mm, that could varies during the phenological stages. The sensitivity considering the lack of water increases from the differentiation of the male flower in the meristematic tissue, and have a maximum in the flowering, which is the critical period, in the maturity stage the required water decrease (Llano and Vargas 2015). For Azul region, the pattern of distribution of rainfalls is more or less constant in the year, with an average of 802 mm annual. Rainfalls are more abundant in summer months. In October – March period exceeded the 400 mm, this can be a limiting element in the crop development in the region.

The corn crop is very sensitive to frosts. Even, the later frosts can caused the plants loses and the senescence of emerged leaves. The earliest, at the end of the cycle, can shorten the grain filling (Martínez

Finalmente, se promediaron los cinco meses de datos agrometeorológicos y se les relacionó con el rendimiento de MinAgri corregido, estimando el promedio y el coeficiente de variación ($CV = \text{desviación estándar} / \text{promedio}$) para la última década y los años previos y la correlación entre cada variable climática y dicho rendimiento. La serie de rendimiento corregida se contrastó con la variabilidad de los elementos agroclimáticos.

Resultados y Discusión

El maíz es el tercer cultivo más importante del municipio de Azul, después de la soja y el trigo, en cuanto a la superficie sembrada. Entre 1988/89 y 2007/08 se sembraron como promedio 23 745 ha, y 31 159 ha entre 2008/09 y 20017/18 respectivamente.

En relación con los requerimientos agroclimáticos, al ser una especie C₄, el maíz es exigente en cuanto a la temperatura. Este es el factor principal controlador del crecimiento y desarrollo de este cultivo, siempre que haya una humedad adecuada (Fassio *et al.* 2018). La temperatura mínima media del suelo para la germinación debe ser de 8-9 °C, con una óptima de 23 °C y máxima de 30 °C y humedad suficiente para desencadenar la germinación. Las distintas etapas fenológicas tienen diferentes requerimientos térmicos, pero generalmente se acepta que la temperatura base sea de 8 °C, la óptima de 30 a 34 °C, y la máxima de 40 a 44 °C (Andrade *et al.* 1996).

En el municipio de Azul, el maíz suele crecer entre noviembre y marzo, cuando la radiación global es de amplia disponibilidad. De mediados de octubre a mediados de marzo, recibe 22 MJ/m²d o más, límite inferior para altas producciones cerealeras (Navarro Duymovich *et al.* 2011). La temperatura media anual es de 13.61 °C. La máxima varía de 28 a 29 °C en enero, y de 12 a 13 °C en junio. La mínima oscila entre 13° y 15 °C en enero, y entre 0 a 2 °C en junio sin alcanzar como promedio menos de 9 °C entre noviembre y marzo—, lo que otorgaría condiciones aceptables para el crecimiento y desarrollo del maíz en el municipio.

En cuanto a las precipitaciones, de la siembra a la madurez, el maíz necesita de 500 a 800 mm, con requerimiento diario de unos 5 mm, que pueden variar en el transcurso de las etapas fenológicas. La sensibilidad ante la falta de agua aumenta a partir de la diferenciación de la flor masculina en el tejido meristemático, y presenta un máximo en la floración, que es el período crítico, ya que en la etapa de maduración el agua requerida disminuye (Llano y Vargas 2015). Para la región de Azul, el régimen es de tipo “isohigro” (es decir, con una distribución más o menos uniforme en el año), con un promedio de 802 mm anuales. Las precipitaciones son un poco más abundantes en los meses estivales. En el período octubre-marzo superan apenas los 400 mm, lo que puede ser un elemento limitante en el desarrollo del cultivo en la región.

El cultivo de maíz es muy sensible a las heladas. Incluso, las heladas tardías pueden provocar la pérdida de algunas plantas y la senescencia de hojas emergidas. Las

Álvarez 2015). In Azul region, the average date of the first frost is on May 30, with a free period of 202 days (Navarro Duymovich *et al.* 2011). It means that, if corn is sowing at the beginning of November, the later frosts dates had been passed and for the earliest the crop had been harvested.

Table 1 shows the monthly average of the four considered agroclimatic variables and their standard deviation for November to March period, among 1988-2008 and 2009-2018 decades.

tempranas, al final del ciclo, pueden acortar el llenado de granos (Martínez Álvarez 2015). En la región de Azul, la fecha media de la primera helada es el 30 de mayo, con un período medio libre de 202 días (Navarro Duymovich *et al.* 2011). Esto quiere decir que, si se siembra maíz a comienzos de noviembre, las fechas de heladas tardías ya habrían transcurrido, y para las tempranas el cultivo habría sido cosechado.

La tabla 1 muestra el promedio mensual de las cuatro variables agroclimáticas consideradas y su desviación

Table 1. Agroclimatic variables, monthly average and standard deviation (November to March) for 1998-2008 and 2009-2018 decades

| | Months | November | December | January | February | March |
|-----------|--|----------|----------|---------|----------|--------|
| 1988-2008 | Maximum temperature, °C | 23.57 | 27.08 | 28.74 | 27.29 | 25.16 |
| | Standard deviation | 2.14 | 1.60 | 1.37 | 1.43 | 1.33 |
| | Minimum temperature, °C | 9.71 | 12.51 | 14.10 | 14.03 | 12.29 |
| | Standard deviation | 1.32 | 1.23 | 0.94 | 1.46 | 1.50 |
| | Rainfalls, mm | 74.70 | 96.44 | 109.22 | 90.18 | 111.98 |
| | Standard deviation | 53.59 | 56.87 | 62.26 | 62.59 | 70.26 |
| | Global radiation, MJ/m ² .d | 24.23 | 25.59 | 25.82 | 23.41 | 17.91 |
| | Standard deviation | 2.14 | 2.31 | 1.56 | 2.36 | 2.08 |
| 2009-2018 | Maximum temperature, °C | 24.26 | 28.81 | 29.82 | 27.49 | 24.88 |
| | Standard deviation | 1.54 | 1.52 | 1.30 | 1.60 | 1.32 |
| | Minimum temperature, °C | 10.69 | 13.53 | 14.98 | 14.73 | 11.79 |
| | Standard deviation | 1.86 | 0.94 | 0.38 | 1.36 | 1.60 |
| | Rainfalls, mm | 72.25 | 39.42 | 72.44 | 80.38 | 72.36 |
| | Standard deviation | 45.56 | 49.73 | 68.44 | 61.16 | 37.03 |
| | Global radiation, MJ/m ² .d | 24.89 | 27.46 | 27.16 | 23.38 | 18.89 |
| | Standard deviation | 1.27 | 1.78 | 1.77 | 2.32 | 2.64 |

As shown in the table, global radiation, as the climate main element, increase 4.12 % as average. December and January have high difference: 1.87 and 1.34 MJ/m².d, respectively.

The maximum temperature increase 2.59 % as average. It was positive from November to February with high difference in December (1.73 °C) and negative in March (-0.28 °C). Minimum temperature increase 4.89 %, as same as maximum temperature which was positive from November to February, with higher difference in November and December (1 °C in both months). It was negative in March (-0.50 °C).

Regarding the rainfalls, they decreased 30.19 % as average, with negative differences in all months, but more marked in January (-36.78 mm) and March (-36.62 mm).

Table 2 show the average and variation coefficient of the four yield series.

The outlets of the Ceres- corn potential model and dry potential model allow verifying the yields differences, whose values exceeded those of MinAgri and corrected MinAgri (table 2), as being a synthetic series without the technology interferences that

estándar para el período de noviembre a marzo, entre las décadas de 1988-2008 y 2009-2018.

Como se puede ver en la tabla, la radiación global, como el elemento principal del clima, aumenta 4.12 % como promedio. Diciembre y enero son los meses que presentan mayor diferencia: 1.87 y 1.34 MJ/m².d, respectivamente.

La temperatura máxima aumentó 2.59 % como promedio. Fue positiva de noviembre a febrero con mayor diferencia en diciembre (1.73 °C) y negativa en marzo (-0.28 °C). La temperatura mínima aumentó 4.89 %, al igual que la temperatura máxima positiva de noviembre a febrero, con mayor diferencia en noviembre y diciembre (1 °C en ambos meses). Fue negativa en marzo (-0.50 °C).

Con respecto a las precipitaciones, disminuyeron 30.19 % como promedio, con diferencias negativas en todos los meses, pero más notorias en enero (-36.78 mm) y marzo (-36.62 mm).

En la tabla 2 se presenta el promedio y el coeficiente de variación de las cuatro series de rendimiento.

Las salidas del modelo Ceres-maíz potencial y potencial de secano permiten contrastar las brechas de rendimiento, cuyos valores superan a los de MinAgri y MinAgri corregido (tabla 2), por tratarse de una

Table 2. Corn yield of the four series for 1998-2008 and 2009-2018 decades

| Period | Yield, kg/ha | | | | |
|--------------------------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------|----------|
| | MinAgri | Corrected MinAgri | Ceres-Corn model potential | Ceres-Maíz model dry potential | |
| Average 1988-2018 | 5032.10 | 3523.67 | 16673.73 | 11601.40 | |
| Variation coefficient, % | 27.25 | 34.51 | 10.97 | 37.67 | |
| 1988/89 to 2007/08 | Average | 4645.85 | 3657.57 | 16336.15 | 13043.05 |
| Variation coefficient, % | 22.98 | 23.47 | 10.93 | 29.19 | |
| 2008/09 to 2017/18 | Average | 5804.60 | 3255.87 | 1815.15 | 8718.10 |
| Variation coefficient, % | 28.08 | 53.98 | 10.46 | 47.43 | |

are in MinAgri series. The difference between the dry potential yield and the MinAgri series is 6569.30 kg/ha for all the period. It means, in Azul municipality, the true yield is 56.63 % less than the reached limit. In the last decade, due to the technology progress and the decrease of the dry potential yields, the difference was of 33.42 % (2913.50 kg/ha).

As figure 1 show, the technology progress (MinAgri series) increases the yield 25 % in the last decade. In turn, in the corrected MinAgri series, in the last decade, the yield decrease 11 % and the variability increase from 23.47 % to 53.98 %. When comparing the two series, there was a general difference of 30 %, 43.91 % in the last decade and 21.27 % in the previous two, which showed that the linear fits between the two are expanded when years passes. The original data of the yield series of corn turned off the correction with the fit:

$y = 3367.9 + 100.1x$ ($r^2 = 0.80$; standard error of the model = 870.5)

The outlet of the Ceres-corn model (table 2 and figure 2) show that the potential yield increase 6.20 % in the last decade. However, under dry potential conditions, decrease 33.16 % and the variability increase. It also

serie sintética sin las interferencias de la tecnología que se observan en la serie MinAgri. La brecha entre el rendimiento potencial de secano y la serie MinAgri es de 6569.30 kg/ha para todo el período. Es decir, en el municipio de Azul, el rendimiento real está 56.63 % por debajo del límite alcanzable. En la última década, debido al avance tecnológico y a la disminución de los rendimientos potenciales de secano, la brecha fue de 33.42 % (2913.50 kg/ha).

Como se puede ver, el avance en la tecnología (serie MinAgri) incrementa el rendimiento en 25 % en la última década. En cambio, en la serie MinAgri corregida, en la última década, los rendimientos disminuyeron 11 % y la variabilidad aumentó de 23.47 % a 53.98 %. Al comparar las dos series, se observa una diferencia general de 30 %, 43.91 % en la última década y 21.27 % en las dos anteriores, lo que evidencia que los ajustes lineales entre las dos se amplían con el transcurrir de los años. Los datos originales de la serie de rendimiento de maíz resultan de la corrección con el ajuste:

$y = 3367.9 + 100.1x$ ($r^2 = 0.80$; error estándar del modelo = 870.5)

La salida del modelo Ceres-maíz (tabla 2 y figura 2) deja ver que el rendimiento potencial aumenta

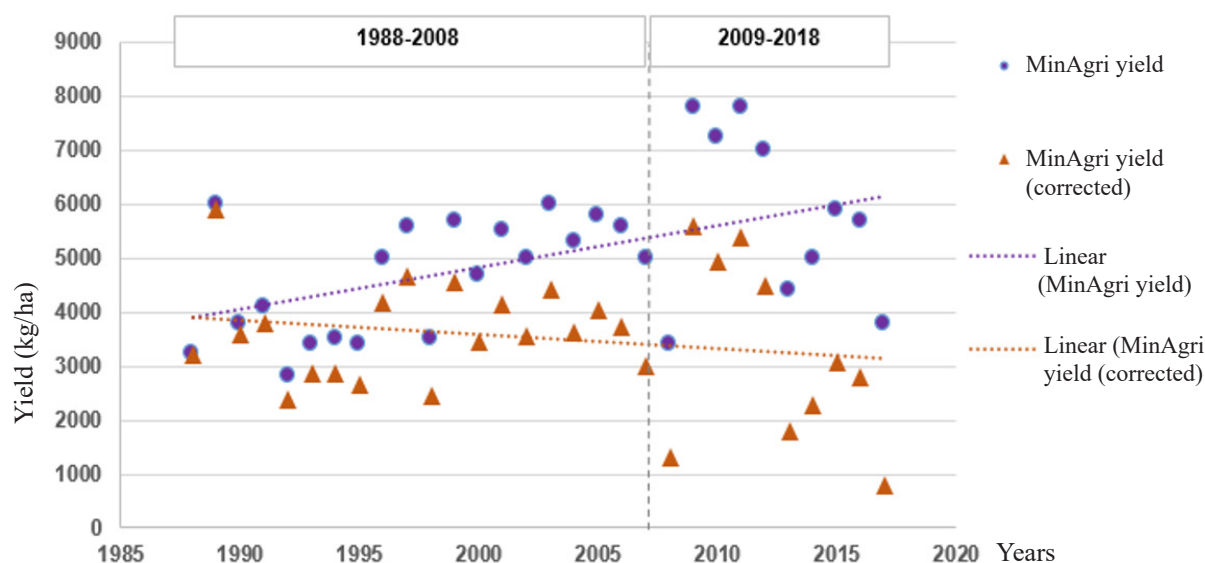


Figure 1. Yield of corn MinAgri and corrected MinAgri and tendency lines between 1998 and 2018

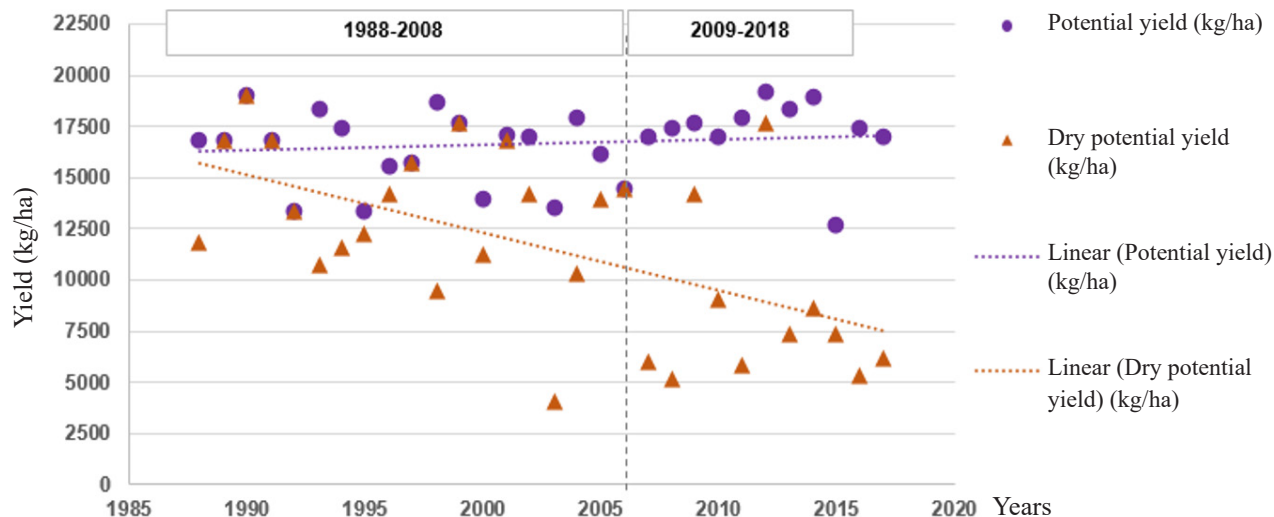


Figure 2. Yield of the corn (Ceres-corn) potential and dry and tendency lines of the compared series 1998 and 2018

increases the differences between both series (49.75 % in the last decade).

According with the results of table 1, rainfalls decrease in the last decade. While, global radiation and temperatures increase, which make possible beneficial conditions for a C₄ tropical grass, like corn. There is an increase of potential yield (6.20 %) by the radiation increase, because the amount of fixed grains is positively associated with the incident energy (Otegui and López Pereira 2003).

In accordance with these results, Zhou *et al.* (2017) showed that the variations of temperature and radiation were the main factors that influence on the grain weight of the corn and on its filled indicators. So, it is concluded that the variation in these climatic variables greatly affected the growth rate, the time of the grain filled, its weight and corn yield. The increase in the yield also depends on the temperature. That is why it is beneficial the temperature increase when there is not water stress, according to the phenological stage (Confalone *et al.* 2017).

In the last decade, the dry potential cultivation differ in 49.75 % of potential yields, because of rainfalls decrease. While, in the previous decades the water effect only explained 20.16 %. If the data of corrected MinAgri yields and dry potential have wide differences under dry conditions, it was showed in both series decrease of the last decade values. Test show that rainfalls explain the high incidence of this environmental factor on yield, under dry conditions. This is because when the water in not a limitation, have low incidence on the results. (Fassio *et al.* 2018).

The inclusion of corn in an agronomic project that includes strategies adapted to each environment could has more available water in the water balance of the soil, which allow higher production of grains, biomass and carbon, and favors the systems sustainability (Bocchio *et al.* 2019).

As table 3 show, the average of MinAgri yield decreased and the variability increased. While, the

6.20 % en la última década. Sin embargo, en condiciones potenciales de secano, disminuye 33.16 % y aumenta la variabilidad. También se incrementa la brecha entre ambas series (49.75 % en la última década).

De acuerdo con los resultados de la tabla 1, las precipitaciones disminuyen en la última década. Mientras, la radiación global y las temperaturas aumentan, lo que hace que se disponga de condiciones beneficiosas para una gramínea tropical C₄, como el maíz. Se produce así aumento del rendimiento potencial (6.20 %) por el incremento de la radiación global, ya que que la cantidad de granos fijados está positivamente asociada con la energía incidente (Otegui y López Pereira 2003).

En consonancia con estos resultados, Zhou *et al.* (2017) señalan que las variaciones de temperatura y radiación fueron los factores principales que influyeron en el peso del grano del maíz y en los indicadores de su llenado. Por tanto, se concluye que las variaciones en estas variables climáticas afectaron notablemente la tasa de crecimiento, la duración del llenado de granos, su peso y rendimiento del maíz. El aumento en el rendimiento también depende de la temperatura. Por tanto, resulta beneficioso el incremento de la temperatura en ausencia de estrés hídrico, según la fase fenológica (Confalone *et al.* 2017).

En la última década, el cultivo potencial en secano se aleja en 49.75 % de los rendimientos potenciales, lo que se explica por la disminución de las precipitaciones. Mientras, en las décadas anteriores, el efecto del agua solo explicó 20.16 %. Si bien los datos de los rendimientos de MinAgri corregido y el potencial de secano poseen amplias diferencias en condiciones de secano, se evidenció en ambas series disminución de los valores de la última década. Ensayos demuestran que el régimen pluviométrico explica la alta incidencia de ese factor ambiental en el rendimiento, sobre todo en condiciones de secano. Y esto se explica porque cuando el agua no es una limitante, tiene baja incidencia en los resultados (Fassio *et al.* 2018).

La inclusión de maíz en un esquema agronómico que contemple estrategias adaptadas a cada ambiente puede

agroclimatic data refers to energy, global radiation, maximum temperature and minimum temperature, increased in the last decade. The rainfalls, decreased in its cumulative values with respect to 1988-2008 period. Related to variability, there was increase of the maximum temperature in the last decade, and decrease of other variables. In study by Rizzo *et al.* (2022), it was found that 48 % of the yield gain was associated with a decennial climatic tendency: 39 % with agronomic improvements and only 13 % with improvements in the genetic yield potential. It means, the future production gains will depend more on the yield gains of the improvements agronomic experiences.

contribuir a contar con mayor cantidad de agua disponible en el balance hídrico del suelo, lo que permite mayor generación de granos, biomasa y carbono, y favorece la sostenibilidad de los sistemas (Bocchio *et al.* 2019).

Como muestran los datos de la tabla 3, el promedio del rendimiento MinAgri disminuyó y la variabilidad aumentó. Mientras, los datos agroclimáticos que se refieren a la energía, radiación global, temperatura máxima y temperatura mínima, aumentaron en la última década. La precipitación, en cambio, disminuyó en sus valores acumulados con respecto del período 1988-2008. En cuanto a la variabilidad, hubo aumento de la temperatura máxima en la última década, y disminución de otras variables. En un estudio de Rizzo *et al.* (2022), se

Table 3. MinAgri yields and agroclimatic variables for 1998-2008 and 2009-2018 decades

| Periods | | Yields , kg/ha | | Agroclimatic variables | | |
|------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|
| | | Corrected MinAgri | Maximum temperature, °C | Minimum temperature, C | Rainfalls, m | Global radiation, MJ/m ² d |
| 1988/89 to | Average | 3657.57 | 26.38 | 12.53 | 482.52 | 23.39 |
| 2007/08 | Variation coefficient, % | 23.47 | 2.72 | 6.06 | 33.09 | 5.19 |
| 2008/09 to | Average | 3255.87 | 27.07 | 13.14 | 336.84 | 24.37 |
| 2017/18 | Variation coefficient, % | 53.98 | 3.06 | 5.49 | 28.57 | 3.16 |

The comparison of the correlations between each climate element (climatic variables) and the yield of MinAgri series show that there are significant ($P < 0.001$), only for the cumulative rainfall from November to March (Pearson coefficient = 0.249).

The performed analysis between the corn yield and the agroclimatic variables showed the relations between climate and corn yield, whose study allows understanding those relations and take decisions in consequence. In studies where the corn growth under future climatic conditions was formed, the relation with the climatic variables had been proved. In those studies it is concluded that losses only could partially compensate, by changes in the phenology and sowing dates (Bassu *et al.* 2021). It has been state that to modify the sowing date has effect on yield (Zhou *et al.* 2017, Fassio *et al.* 2018 and Zhai *et al.* 2022).

Conclusions

It is concluded that in Azul municipality the climate tendencies in the last years exerts a negative effect on the corn yield, although technology hide it, since when the effects is get off (corrected MinAgri) the yield decrease.

The climate influence increase in the last years of the series. This can be observing from the rainfalls decrease of the last decade, when the yield values decrease in the corrected series. The fall of rainfalls in the spring – summer months is the most influence

halló que 48 % de la ganancia de rendimiento se asociaba con una tendencia climática decenal: 39 % con mejoras agronómicas y solo 13 % con mejoras en el potencial de rendimiento genético. Es decir, las futuras ganancias de producción dependerán cada vez más de las ganancias de rendimiento de las prácticas agronómicas mejoradas.

La comparación de las correlaciones entre cada elemento del clima (variables climáticas) y el rendimiento serie MinAgri muestra que son significativas ($P < 0.001$), solo para la precipitación acumulada de noviembre a marzo (coeficiente de Pearson= 0.249).

El análisis realizado entre el rendimiento del maíz y las variables agroclimáticas evidenció las estrechas relaciones entre el clima y los rendimientos del maíz, cuyo estudio permite comprender mejor esos vínculos y tomar decisiones en consecuencia. En trabajos donde se modeló el crecimiento del maíz en condiciones climáticas futuras también se ha documentado la relación con las variables climáticas. En dichos estudios se concluye que las pérdidas solo se podrían compensar, parcialmente, por cambios en la fenología y fechas de siembra (Bassu *et al.* 2021). Se ha constado que modificar la fecha de siembra repercute en el rendimiento (Zhou *et al.* 2017, Fassio *et al.* 2018 y Zhai *et al.* 2022).

Conclusiones

Se concluye que en el municipio de Azul las tendencias del clima en los últimos años ejercen un efecto negativo en el rendimiento del maíz, aunque

element in the yield, which shows the marked difference in the series under dry conditions and water contribution.

Acknowledgments

Thanks to Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía (CRAGM) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) for providing the agroclimatic data to this study.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest among them.

Author's contribution

María C. Miranda del Fresno: Original idea, analysis of data and writing.

Adriana Confalone: Original idea, conducting of the investigation, analysis of data and review.

la tecnología lo enmascara, pues al quitarle su efecto (MinAgri corregido) el rendimiento disminuye.

La influencia del clima se incrementa en los últimos años de la serie. Esto se puede observar a partir de la disminución en las precipitaciones de la última década, al provocar la caída de los valores de rendimiento en la serie corregida. La disminución de las precipitaciones en los meses primavera-estivales es el elemento que más influye en el rendimiento, lo que pone en evidencia la diferencia notoria en las series en condiciones de secano y con aporte de agua.

Agradecimientos

Se agradece al Centro Regional de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía (CRAGM) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) por brindar los datos agroclimáticos para este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses entre ellos.

Contribución de los autores

María C. Miranda del Fresno: Idea original, análisis de datos y escritura del manuscrito.

Adriana Confalone: Idea original, conducción de la investigación, análisis de datos y revisión del manuscrito.

References

- Andrade, F., Cirilo, A., Uhart, S. & Otegui, M. 1996. "Ecofisiología del cultivo de maíz". 1ra. ed. Argentina: Editorial la Barrosa.
- Barros, V. & Camilloni, I. 2020. "La Argentina y el cambio climático: de la física a la política". Eudeba. 1ra. ed. Argentina: Eudeba. ISBN: 978-950-23-3097-6.
- Bassu, S., Fumagalli, D., Toreti, A., Ceglar, A., Giunta, F., Motzo, R., Zajac, Z. & Niemeyer, S. 2021. "Modelling potential maize yield with climate and crop conditions around flowering". *Field Crops Research*, 271, 108226: 1-12, ISSN: 0378-4290. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108226>.
- Bert, F., de Estrada, M., Naumann, G., Negri, R., Podestá, G., de los Milagros Skansi, M., Spennemann, P. & Quesada, M. 2021. "The 2017-18 drought in the Argentine Pampas—Impacts on Agriculture". United Nations Office for Disaster Risk Reduction. GAR Special Report on Drought. <https://www.preventionweb.net/files/78456_cs1.14laplataargentinafin al20210215.pdf> [Consulted: February 28, 2022].
- Bocchio, V., Requesens, E. & Mestelan, S. 2019. "Tendencias y equitatividad de los principales cultivos extensivos en el centro de la provincia de Buenos Aires". *Ediciones INTA. RIA 45(2)*: 196-203, ISSN: 1669-2314. ISSN: 0325-8718.
- Confalone, A., Vilatte, C. A., Aguas, L. M., Barufaldi, M. S., Eseiza, M. F. & Ponce, G. D. 2017. "Efecto biofísico del cambio climático en el rendimiento de cultivos de verano". *Cuban Journal of Agricultural Science*, 51(2): 249-259, ISSN: 2079-3480.
- Confalone, A., Vilatte, C., Lázaro, L., Roca, N., Mestelan, S., Aguas, L., Navarro, M. & Sau, F. 2016. "Parametrización del modelo CROPGRO-soybean y su uso como herramienta para evaluar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de soja". *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 48(1): 49-64. ISSN: 1853-8665.
- CRAGM. "Boletín Agrometeorológico del Centro-Sur de la Prov. de Bs. As. 1988-2018". Facultad de Agronomía. Azul. Bs. As.
- Fassio, A., Ibañez, W., Fernández, E., Cozzolino, D., Pérez, O., Restaino, E., Pascal A., Rabaza C. & Vergara, G. 2018. "El cultivo de maíz para la producción de forraje y grano y la influencia del agua". *Serie técnica*, (239), ISBN: 978-9974-38-390-6. [Consulted: July 01, 2022].
- Hyams, D. G. 2009. "Curve Expert 1.3: A comprehensive curve fitting system for Windows". <<http://s91928265.onlinehome.us/curveexpert>> [Consulted: October 01, 2019].
- Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Shelia, V., Wilkens, P.W., Singh, U., White, J.W., Asseng, S., Lizaso, J.I., Moreno, L.P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L.A., Tsuji, G.Y. & Jones, J.W. 2019. "El ecosistema de modelado de cultivos DSSAT". En: Boote, K.J. (ed.) *Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture*. Cambridge, Reino Unido: Burleigh Dodds Science Publishing. pp. 173-216. <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10>. [Consulted: July 01, 2022].
- Llano, P. & Vargas, W. 2015. "Climate characteristics and their relationship with soybean and maize yields in Argentina, Brazil and the United States". *International Journal of Climatology*, 36(3): 1471-1483, ISSN: 1097-0088. <https://doi.org/10.1002/joc.4439>.
- Magrín, G., Travasso, M., López, G., Rodríguez, G. & Lloveras, A. 2005. "Vulnerabilidad de la producción agrícola en la

- región pampeana argentina". Informe Final. 2da Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático. Componente B3. Available: <<http://www.ecopuerto.com/bicentenario/informes/VulnerabilidadProdAgr.pdf>> [Consulted March 01, 2022].
- Martínez Álvarez, D. 2015. "Ecofisiología del cultivo de maíz. En: Garay, J. A. y Colazo, J. C. (eds.). El cultivo de maíz en San Luis. Argentina. INTA Ediciones Información Técnica. pp. 7-31. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_maizensanluis.pdf> [Consulted: February 28, 2022].
- Meira S., Rodríguez Baide, J. M., Confalone A., Fatecha Fois, D.A., Fernandes J. M., Pérez González O. & Van den Berg, M. 2019. "Modelación del cultivo de soja en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización", EUR 29057 ES, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-77709-7. ISSN: 1831-9424. <https://doi.org/10.2760/639226>. [Consulted February 28, 2022].
- Miranda del Fresno, M. C., Aguas, L., Bongiorno, F., Vilatte, C. & Confalone, A. 2017. "Cambios en el clima y rendimiento de maíz en Azul, provincia de Buenos Aires. Repositorio Digital CICPBA", IV Congreso Anual Científico y Tecnológico, CICPBA. Available: <<https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6715>> [Consulted March 01, 2022].
- Navarro Duymovich, M., Confalone, A., Vilatte, C. & Aguas, L. 2011. "Características agroclimáticas para la sustentabilidad agropecuaria en el Partido de Azul". In: Requesens, E. (coord.). Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul. Argentina: Docuprint S.A. pp. 29-60. ISBN: 978-950-658-269-2. <http://www.faa.unicen.edu.ar/archivos/Bases_Agroambientales.pdf> [Consulted February 28, 2022].
- Otegui, M. E. & López Pereira, M. 2003. "Fecha de siembra". In: Satorre, E., Benech, R., Slafer, G., De La Fuente, E., Miralles, D., Otegui, M. & Savin, R. (eds.). Producción de cultivos de granos: bases funcionales para su manejo. Argentina: Editorial Facultad de Agronomía. pp. 260-272.
- Pazos, M. S. 2009. "Los *Phaeozem pampeanos* en la WRB 2006". Geociencias. Asociación de ciencias geológicas y del medio natural, (16): 19-22, ISSN: 1699-9053.
- Requesens, E. 2011. "Integración agroecológica del partido de Azul. En: Requesens, E. (coord.). Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul. Argentina": Docuprint S.A. pp. 117-136. ISBN: 978-950-658-269-2. <http://www.faa.unicen.edu.ar/archivos/Bases_Agroambientales.pdf> [Consulted February 28 2022].
- Rizzo, G., Monzon, J. P., Tenorio, F. A., Howard, R., Cassman, K. G., & Grassini, P. 2022. "Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments". Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(4): 1-6. ISSN: 1091-6490. <https://doi.org/10.1073/pnas.2113629119>. [Consulted July 01, 2022].
- Sistema Integral de Información Administrativa (SIIA). "Estimaciones Agrícolas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca". Disponible <http://www.siiia.gob.ar/sst_pcias/estima/estima.php> verificado 15/jul/2018> [Consulted February 28, 2022].
- Zhai, L., Zhang, L., Yao, H., Zheng, M., Ming, B., Xie, R., Zhang, J., Jia, X. & Ji, J. 2022. "The Optimal Cultivar × Sowing Date × Plant Density for Grain Yield and Resource Use Efficiency of Summer Maize in the Northern Huang-Huai-Hai Plain of China". Agriculture, 12(1): 7. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010007>.
- Zhou, B., Yue, Y., Sun, X., Ding, Z., Ma, W. & Zhao, M. 2017. "Maize kernel weight responses to sowing date-associated variation in weather conditions", The Crop Journal, 5(1): 43-51, ISSN: 2214-5141. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.07.002>.
- Zorzoli, F. 2018. "¿Límites ecológicos y fronteras tecnológicas en el negocio agrícola? Agricultura y ambiente en los sectores agrarios medios del noroeste argentino". Población & Sociedad, 25(1): 163-195, ISSN: 1852-8562. <https://doi.org/10.19137/pys-2018-250106>.

Received: April 27, 2022

Accepted: July 30, 2022