

LA HUELLA DE CARBONO DEL MAÍZ COMO VÍNCULO ENTRE PRODUCCIÓN Y AMBIENTE

Rodolfo Bongiovanni ^{1*}, Leticia Tuninetti ², Gabriel Espósito ³, Silvina Fiant ⁴, Karen Ponienman ¹, Santiago Álvarez ⁴, Nicolás Chiappero ³, Nicolás Oliverio ³

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.

² Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina.

³ Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

⁴ Bolsa de Cereales de Córdoba, Argentina.

RESUMEN

La huella de carbono (HC) representa la sumatoria de gases de efecto invernadero emitidos por una persona, institución, programa o producto, y es la medida de uno de los impactos que provocan las actividades de la humanidad sobre el ambiente. El objetivo general de este trabajo fue estimar la HC del maíz producido en Córdoba, Argentina. El objetivo específico fue analizar la diferencia de HC a través de un manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada. La unidad declarada es: 1 t de grano en la puerta del campo. Los métodos utilizados siguen las normas ISO 14067 y las directrices del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se utilizó información provista por la Bolsa de Cereales de Córdoba y de un ensayo a campo en Alejandro Roca, Córdoba. La HC resultó en 156,5 kg CO₂ eq t⁻¹ de maíz, promedio ponderado por departamento de la provincia de Córdoba. En el ensayo a campo, la dosis variable de N permitió reducir un 21,45% la HC, de 150,75 kg CO₂ eq t⁻¹ a 124,13 kg CO₂ eq t⁻¹. Los resultados están en un rango bajo, con respecto a la bibliografía, utilizando los mismos métodos. Una posible explicación es el bajo nivel de insumos que se aplican al cultivo, en términos comparativos, como así también la siembra directa, con menor consumo de combustible. En el ensayo, se explica por un uso más eficiente del fertilizante.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida. Emisiones de GEI. Calentamiento global. Agricultura de Precisión.

CARBON FOOTPRINT OF CORN AS A LINK BETWEEN PRODUCTION AND THE ENVIRONMENT

ABSTRACT

The carbon footprint (CF) represents the sum of greenhouse gases emitted by a person, institution, project or product, and is a measure of one of the impacts on the environment caused by human activities. The general objective of this research was to estimate the CF of corn produced in Córdoba, Argentina. The specific objective was to analyze the difference in CF by using Precision Agriculture. The declared unit is 1 t of grain at the farmgate. The methods used follow the ISO 14067 standards and the Intergovernmental Panel on Climate Change guidelines. The information was obtained from the Córdoba Grain Exchange and from a field trial in Alejandro Roca, Córdoba. The CF resulted in 156.5 kg CO₂ eq t⁻¹ of corn, weighted average per department of the province of Córdoba. In the field trial, N variable rate allowed the CF to be reduced by 21.45%, from 150.75 kg CO₂ eq t⁻¹ to 124.13 kg CO₂ eq t⁻¹. The results are below the average reported in

* Autor de contacto:

bongiovanni.rodolfo@inta.gob.ar

Recibido:
03-04-23

Recibido con revisiones:
08-06-23

Aceptado:
14-06-23

the literature using the same methods. A possible explanation is the low level of inputs applied to the crop, in comparative terms, as well as the use of no-tillage which reduces fuel consumption. The lower impact observed in the field test was due to a more efficient use of fertilizer.

Keywords: Life cycle assessment. GHG emissions. Global warming. Precision Agriculture

INTRODUCCIÓN

La huella de carbono (HC) representa la sumatoria de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por una persona, institución, programa o producto y es la medida de uno de los impactos que provocan las actividades de la humanidad sobre el ambiente. En la HC se cuantifican las emisiones de GEI vinculadas a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, comenzando con la extracción y distribución de las materias primas que conforman los insumos, abarcando las demás etapas de la producción, consumo y residuos finales de la vida de un producto (IRAM-ISO 14067, 2019). Dichas emisiones de GEI contribuyen al cambio climático mediante la aceleración del calentamiento global (ISO, 2006). Por lo tanto, la declaración de las huellas de productos genera conciencia entre quienes producen, procesan, comercializan y consumen, ya que promueve nuevas tendencias de mercado vinculadas al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12: "Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles" planteado por Naciones Unidas (ONU, 2015).

En el mundo, de forma creciente, los consumidores exigen información sobre el impacto ambiental de los productos que adquieren para poder realizar una compra responsable (European Commission, 2020; Institute for Business Vale [IBM], 2020). A su vez, las empresas y gobiernos cada vez más solicitan una valoración de las emisiones producidas por la actividad empresarial para la compra y contratación. Consecuentemente, el cálculo de la HCP resulta de utilidad en la cadena de valor, porque: 1) brinda una visión ambiental integral, destaca qué etapas del ciclo de producción-consumo de un producto son las de mayor impacto (puntos críticos); 2) permite comunicar la imagen ambiental de un producto; 3) muestra posibles reducciones de costos a través del uso más eficiente de recursos energéticos y materiales; 4) propone argumentos y herramientas para la revalorización de subproductos y desechos a través del reciclado o la reutilización; y 5) permite comparaciones entre materias primas, embalajes, tecnologías, métodos de distribución, como así también entre productos y servicios sustitutos. La HC reviste importancia para la cadena de valor global del maíz porque los productos son comercializados mundialmente y las nuevas generaciones de consumidores comienzan a exigir información sobre métodos de producción sostenible.

En la campaña 2020-2021 se produjeron 23,7 millones de toneladas en Córdoba, un 21% más que en la campaña anterior y un 93% más que el promedio histórico. Esto se logró con un área sembrada de más de 3 millones de ha, un 60% mayor que el promedio histórico. El rendimiento superó en un 8% a la campaña anterior, llegando a 8,89 t ha⁻¹. La producción de maíz representó un valor bruto récord de 5.228 millones de USD, un 72% superior al valor bruto obtenido en la campaña anterior (Bolsa de Cereales de Córdoba [BCCBA], 2021).

La fertilización nitrogenada es un punto crítico en la HC del maíz. En Argentina, estudios recientes, utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) indicaron que la fase agrícola del etanol de maíz generó un 49% del total de GEI producidos durante toda la cadena de producción y, dentro de esta fase, la producción y el uso de fertilizantes nitrogenados fue el subproceso que más incidencia tuvo en el cálculo total de GEI (Bongiovanni y Tuninetti, 2021; Hilbert et al., 2021). La bibliografía reporta que los fertilizantes nitrogenados representan entre el 60 y el 70% de las emisiones de GEI del cultivo de maíz (Ma et al., 2012; Qi et al., 2018; Wang et al., 2015; Yan et al., 2015), tanto por su uso como por su producción, especialmente la urea, que es el fertilizante de mayor consumo en el mundo (International Fertilizer Association [IFA], 2019). La elaboración de fertilizantes nitrogenados, mediante el proceso Haber-Bosch, es altamente costoso en cuanto a utilización de energía fósil y, consecuentemente, en cuanto a emisiones de GEI (Andrade, 2021; Balafoutis et al., 2017; Kongshaug, 1998). Por otro lado, durante su uso, se generan pérdidas de nitrógeno por emisiones de óxido nitroso (N₂O) y monóxido de nitrógeno (NO) en el proceso de nitrificación del amonio, como así también pérdidas por lixiviación de nitratos (Morales-Morales et al., 2019; Thapa et al., 2016). Asimismo, las dosis de fertilización por arriba del óptimo pueden incrementar las emisiones de N₂O desde el suelo hacia la atmósfera (Alvarez et al., 2012); como también las pérdidas de nitrógeno por escorrentía superficial y a través del perfil por lixiviación. Esto impacta negativamente la calidad del agua y los suelos, generando potenciales déficits nutricionales en los cultivos de grano (Alvarez et al., 2012). Sin embargo, en la actualidad, el consumo de fertilizantes y particularmente el de fertilizantes nitrogenados,

es un factor clave para la obtención de elevados rendimientos en maíz (Adeyemi et al., 2020; Agyin-Birikorang et al., 2020; Seleiman et al., 2021). De esta manera, las técnicas de manejo del cultivo tienen un impacto importante en la HC, y en consecuencia una alta incidencia en la sostenibilidad del sistema de producción de maíz. En un estudio basado en los datos de una encuesta agrícola del este de China, se evaluaron las huellas de carbono de los tres principales cultivos de cereales (arroz, trigo y maíz) con una metodología de ACV y se concluyó que al aplicar dosis mayores a 300 kg N ha^{-1} no se reflejaban en mayores rendimientos, pero sí en el incremento de la HC (Yan et al., 2015). Por otra parte, Arrieta et al. (2018) estudiaron una fuerte correlación lineal entre rendimientos y eficiencias. Estos autores analizaron los cultivos de soja y maíz en la región pampeana y extra-pampeana de Argentina y detectaron mayores rendimientos de granos y eficiencias de GEI (t de grano producido por t de CO_2 eq emitida) en la región pampeana a pesar del mayor uso de insumos. Resultados similares encontraron Zhang et al. (2018) en China, donde el incremento en el consumo de electricidad y fertilizantes nitrogenados en el cultivo de maíz bajo riego generó 40% más emisiones que en el caso del maíz a secano. Sin embargo, el sistema que requirió mayor energía, fertilización y riego, también generó 2,1 veces mayor rendimiento en grano, por lo que la HC fue de $556 \text{ kg CO}_2 \text{ eq por t}$ de maíz, un 37% inferior que en la producción a secano ($877 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$). Los autores sugieren, además, que en ambos sistemas es posible reducir aún más la HC al optimizar íntegramente el manejo agrícola.

Zhang et al. (2021) demostraron que el tratamiento con la dosis óptima de N aumentó el rendimiento y redujo las emisiones de GEI por tonelada de grano, en comparación a tratamientos con dosis menores de nitrógeno. En el mismo sentido, Song et al. (2019) mostraron una relación inversa entre el rendimiento de grano y la HC, al optimizar la densidad de siembra, las variedades, las labores, y la estrategia de fertilización, incrementando los rendimientos en un 23,7%, mientras que disminuyeron su HC en un 34,3%.

El manejo sitio-específico del nitrógeno está indicado como una tecnología clave para la optimización ambiental y económica. Los rendimientos en maíz no solo están determinados por la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, sino que también dependen de otros factores que modifican la demanda y la capacidad de absorción de nitrógeno por la planta. Las diferencias en rendimientos y eficiencias entre regiones están influenciadas por el clima (Boone et al., 2016), particularmente por la precipitación media anual (Arrieta et al., 2018). En Argentina, la cantidad y distribución de las precipitaciones estivales es uno de los factores determinantes del rendimiento de maíz, ya que la mayoría del maíz se siembra a secano (Eyhérabide, 2012; Socchiuzzi et al., 2018). La oferta hídrica determina la cantidad de nutrientes demandados por el maíz y la capacidad de absorción de estos por el cultivo. Esta dependencia del clima, que determina la variabilidad temporal del rendimiento de maíz en diferentes campañas agrícolas, incrementa el riesgo al que se enfrentan los productores al decidir sobre la dosis y el momento de aplicación de fertilizantes (Espósito, 2013; Maestrini y Basso, 2018). Por otro lado, un estudio de China demostró que la heterogeneidad espacial de las condiciones ambientales determina las variaciones anuales de las emisiones de GEI y variaciones espaciales de la HC de los cultivos de arroz, trigo y maíz (Xu y Lan, 2016).

De la misma manera, existe evidencia de que los suelos de los lotes de producción agrícola típicamente presentan variabilidad espacial, tanto por diferencias asociadas al relieve y al movimiento superficial del agua como también a diferencias morfogénicas relacionadas al tipo de material original y los procesos de formación geológicos de suelos en cada posición topográfica (Bricchi et al., 2006). Esta heterogeneidad, a su vez, determina la variabilidad sitio-específica en los rendimientos del cultivo incluso a escala de intra-lote, lo cual genera posiciones altas y bajas dentro del mismo.

La intensificación sostenible de la agricultura busca satisfacer las altas demandas de commodities, optimizando el manejo agrícola y reduciendo el impacto ambiental, a través del aumento del rendimiento por unidad de área y tiempo. Estos objetivos requieren tecnologías que modifiquen la función de producción (Bongiovanni et al., 2006), implicando mayor o igual rendimiento con menor o igual nivel de insumos (Andrade, 2021; Pretty et al., 2018). En este contexto, se encuentra la Agricultura de Precisión (AP) como tecnología de procesos y conocimiento, la cual genera un nexo entre la producción agrícola y la sustentabilidad ambiental (Finger et al., 2019). De acuerdo a la Sociedad Internacional de Agricultura de Precisión (ISPA, 2020), la Agricultura de Precisión es "una estrategia de gestión que recoge, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales y los combina con otras informaciones para respaldar las decisiones de manejo de acuerdo con la variabilidad estimada, y así mejorar la eficiencia en el uso de recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agrícola". La AP tiene la particularidad de reducir la cantidad de insumos por medio de aplicaciones sitio-específicas con equipos de alta tecnología (Balafoutis et al., 2017). La dosis variable de fertilización nitrogenada es una tecnología de AP que permite

aplicar la dosis justa en cada sitio-específico, de forma de asociar los requerimientos de los cultivos a la oferta del suelo, con la consecuente reducción en las pérdidas de nutrientes al ambiente, y el incremento en el rendimiento agrícola y económico (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004). Por otra parte, Brown et al. (2015) demostraron que la aplicación de tecnologías de agricultura de precisión produce mayor retorno económico neto y menor HC. Estas reducciones en la HC reflejan disminuciones en las emisiones directas por la aplicación de insumos (herbicidas, insecticidas, fertilizantes, semillas) y utilización de combustible en dichas labores, y las indirectas emitidas aguas arriba durante su producción.

El estudio de las interacciones entre el clima, el suelo, la topografía y el manejo, y cómo estos factores y su variabilidad afectan el rendimiento de los cultivos, es de importancia tanto económica como ambiental, ya que con un mejor manejo agrícola es posible aumentar los rendimientos, reducir el uso de insumos y el impacto sobre el ambiente, o ambos a la vez (Maestrini y Basso, 2018; Xu y Lan, 2016). Al presente, algunas investigaciones están avanzando hacia la integración de estos factores en el desarrollo de modelos para predecir e interpretar el rendimiento de maíz y obtener recomendaciones más precisas sobre el uso de los fertilizantes nitrogenados (Correndo et al., 2021; Ransom et al., 2019).

El objetivo general de este trabajo fue estimar la HC del maíz de Córdoba, con la finalidad de identificar las actividades que generan los mayores impactos y que, a su vez, pueden ser mejorados. El estudio se realizó a nivel Departamento de la provincia de Córdoba, y los resultados se expresan tanto por tonelada de maíz, como por hectárea. Desde el punto de vista de la cadena, interesa la potencialidad de esta metodología para determinar puntos críticos y poder plantear alternativas tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia, bajo la mirada de la sostenibilidad.

El objetivo específico fue analizar los cambios en la HC del maíz generado por la aplicación de una estrategia de fertilización nitrogenada con manejo sitio-específico.

Las hipótesis son tres: 1) La HC de la producción local tiene valores inferiores al promedio mundial informado por la literatura, 2) Existe una relación inversa entre rendimiento y HC, y 3) Existe una relación directa entre la HC y la dosis de N.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo, se usaron los datos relevados por el Departamento de Información Agronómica (D.I.A.) de la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA). Estos se componen por 840 imágenes provistas por la Agencia Espacial Europea (ESA), provenientes del satélite Sentinel-2, fechadas entre los meses de enero y mayo del 2021. Se relevaron más de 11.000 lotes geoposicionados y se utilizaron datos zonales de rendimientos provistos por colaboradores calificados distribuidos en toda la geografía del área de influencia. Los datos fueron procesados en su totalidad por el equipo técnico del D.I.A. de la BCCBA. La adquisición y procesamiento de las imágenes satelitales fue realizada utilizando la plataforma Google Earth Engine (BCCBA, 2021).

Para la etapa de estimación de las huellas, este trabajo sigue el protocolo de la norma IRAM-ISO 14067 (2019), consistente con el Capítulo 11 del Volumen 4 de las Guías del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2019). Un componente fundamental del método ACV es el inventario ambiental, que consiste en una cuantificación de los ingresos al sistema (energía e insumos materiales), y de las emisiones al ambiente relacionadas con la creación del producto y su uso, es decir, todas las salidas (productos, subproductos, residuos, emisiones). Dicho inventario se construyó a partir de los planteos productivos brindados por la Bolsa de Cereales de Córdoba (Anexo). La unidad declarada de este estudio es 1 t de maíz a campo en la campaña 2020/2021. Como valor de referencia, también se expresa la huella por hectárea. Se incluyeron las emisiones derivadas de la producción y uso de semillas, fertilizantes, agroquímicos y combustibles para las labores agrícolas. Del mismo modo, se consideraron las emisiones derivadas por los residuos de cosecha. Los planteos técnicos por Departamento se presentan en el Anexo.

Para el estudio de caso, con respecto al análisis diferenciado de la HC bajo diferentes estrategias de manejo sitio específico de la fertilización nitrogenada, se usó un lote del establecimiento "La Fe" ubicado a 36 km al sur de la localidad Alejandro Roca, en el departamento Juárez Celman, Córdoba. Este lote no posee gran variación de altura, pero si tiene zonas con influencia de presencia de napa. En determinadas circunstancias y años, la napa puede alcanzar un ascenso cercano a la superficie, lo que genera problemas

de salinización en el perfil. Por lo tanto, las zonas de manejo se determinaron mediante la profundidad a la cual se encontraba la napa, su efecto sobre el cultivo y sobre el perfil de suelo.

Se diferenciaron tres zonas de manejo en las que se aplicaron distintas densidades de siembra (Figura 1). Si no se hubiese diferenciado zonas de manejo, se hubiera sembrado 65.000 semillas ha^{-1} , el planteo que venía usando tradicionalmente. Las zonas se clasificaron en: (1) Baja producción (BP) con densidad menor a 55.000 semillas ha^{-1} (57,44 ha); (2) Media producción (MP) con densidades de siembra entre 55.000 y 75.000 semillas ha^{-1} (96,1 ha); y (3) Alta producción (AP) con densidades mayores de 75.000 semillas ha^{-1} (44,4 ha).

La fecha de siembra fue desde 26 al 28 de noviembre de 2021. El híbrido utilizado fue DK 7272 VT3P. El antecesor de este maíz fue trigo/soja y cultivo de servicio diferenciado por zona de manejo; en la zona de baja producción se utilizó triticale (el cual fue pastoreado por animales), en las zonas de media y alta producción se utilizó una mezcla de triticale, rabanito forrajero y vicia villosa (estos sectores no fueron pastoreados).

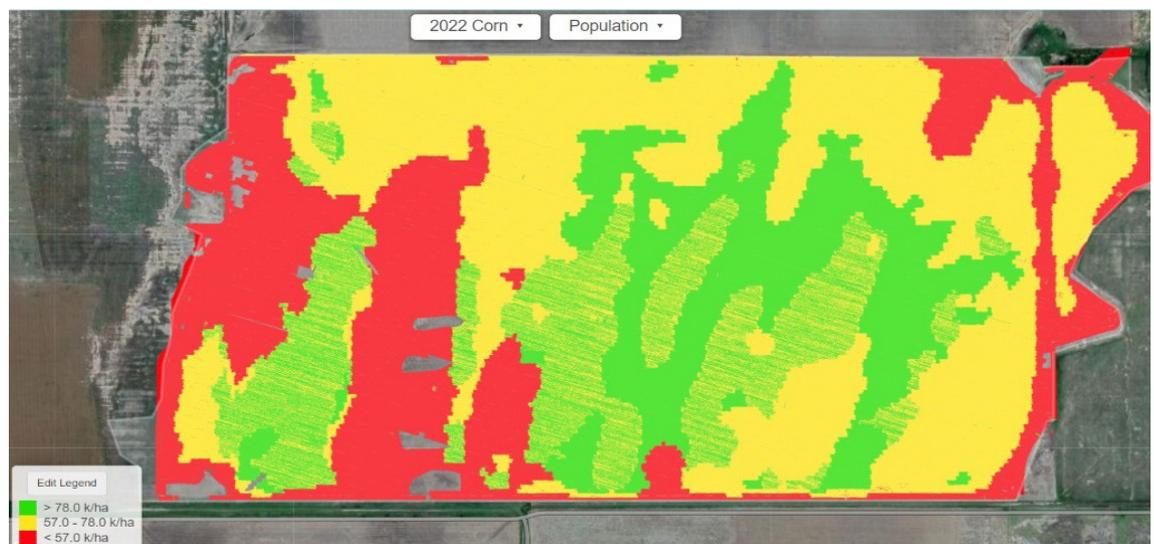


Figura 1: Densidad de siembra del maíz en el estudio de caso ubicado en Alejandro Roca, campaña 2021-2022.

Figure 1: Maize seeding rate in the case study located in Alejandro Roca, 2021-2022 crop season.

Como fuente de fósforo se utilizó una mezcla 7-38-0 S 8% Zn 0,8% en la siembra. Se aplicó en forma variable, en la zona de baja producción sin aporte, zona media producción 155 kg ha^{-1} y en la zona de alta producción 210 kg ha^{-1} . Las dosis surgen según análisis de suelo y rendimiento esperado para cada zona. En contraposición al manejo por ambiente, la dosis habitualmente utilizada en un maíz tardío es de 150 kg ha^{-1} .

La fertilización nitrogenada fue realizada con aplicación de Sol Mix (28-0-0 S 5,2%) mediante pulverizadora Metalfor 3200, de forma chorreada en el entresurco en el estado fenológico de maíz V5/V6 durante el mes de enero. En la zona de baja producción se utilizaron 73 L ha^{-1} (equivalente a 67 kg ha^{-1} de urea, según balance para un rendimiento esperado de 6 t ha^{-1}), en la zona de media producción se aplicaron 228 L ha^{-1} (equivalente a 209 kg ha^{-1} de urea según balance para un rendimiento esperado de 11 t ha^{-1}) y en la zona de alta producción se aplicaron 236 L ha^{-1} (equivalente a 217 kg ha^{-1} de urea, según balance para un rendimiento esperado de 14 t ha^{-1}) (Figura 2).

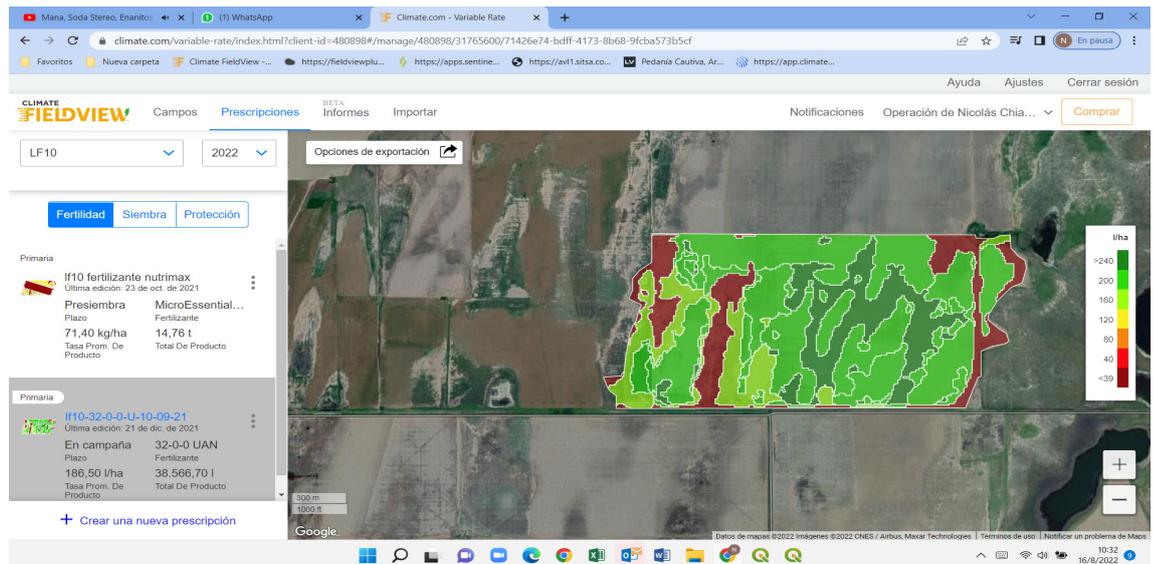


Figura 2: Fertilización nitrogenada del maíz en el estudio de caso ubicado en Alejandro Roca, campaña 2021-2022.

Figure 2: Nitrogen fertilization of corn in the case study located in Alejandro Roca, 2021-2022 crop season.

En la Tabla 1 se puede observar las dosis de urea (equivalentes a los kg de SolMix que se utilizaron en el lote) utilizadas en cada zona de manejo y la dosis supuesta si se hubiese realizado un planteo fijo (como dato se toma el promedio que surge de los diferentes ambientes).

Tabla 1: Planteo técnico del ensayo por zona de manejo y por manejo uniforme del estudio de caso.

Table 1: Technical approach to the trial per management areas and uniform management of the case study.

	Unidades	ZONA			UNIFORME
		AP	MP	BP	
Porcentaje del lote	%	22	49	29	100
Semilla	kg ha ⁻¹	19,8	15,0	12,7	16,0
Fertilizante:					
Urea	kg ha ⁻¹	217	209	67	180
Fosfato monoamónico	kg ha ⁻¹	153	113	0	113
Herbicida:					
Atrazina 90%	kg ha ⁻¹	2,1	2,2	1,7	2,2
2,4 D éster	L ha ⁻¹	1,6	1,7	1,2	1,7
S-metolacoloro	L ha ⁻¹	1	1	1	1
Glifosato	L ha ⁻¹	5,4	5,6	3,6	5,6
Picloram	L ha ⁻¹	0,1	0,1	0,1	0,1
Cletodim	L ha ⁻¹	1,0	1,1	0,9	1,1
Insecticida:					
Lambdacialotrina	kg ha ⁻¹	0	0	0	0
Funguicida:					
Azoxistrobina + Cyproconazole	L ha ⁻¹	0,8	0,9	0,6	0,9
Coadyuvante:					
Aceite mineral	L ha ⁻¹	1	1	1	1
Gasoil:					
Siembra directa + fertilización	L ha ⁻¹	5,59	5,59	5,59	5,59
Pulverización terrestre x4	L ha ⁻¹	2,88	2,88	2,88	2,88
Cosecha	L ha ⁻¹	8,44	8,44	8,44	8,44
Camioneta para asesoramiento	L ha ⁻¹	0,37	0,37	0,37	0,37
Total Gasoil	L ha ⁻¹	17,28	17,28	17,28	17,28
Rendimiento 2020/2021	t ha ⁻¹	13,322	12,275	7,225	9,50

La cosecha se realizó entre el 25 y 30 de mayo de 2022, con una cosechadora Case 6230 contratada. El rendimiento promedio obtenido en esta campaña, en el lote estudiado, fue de 10.950 kg ha⁻¹ (Figura 3).

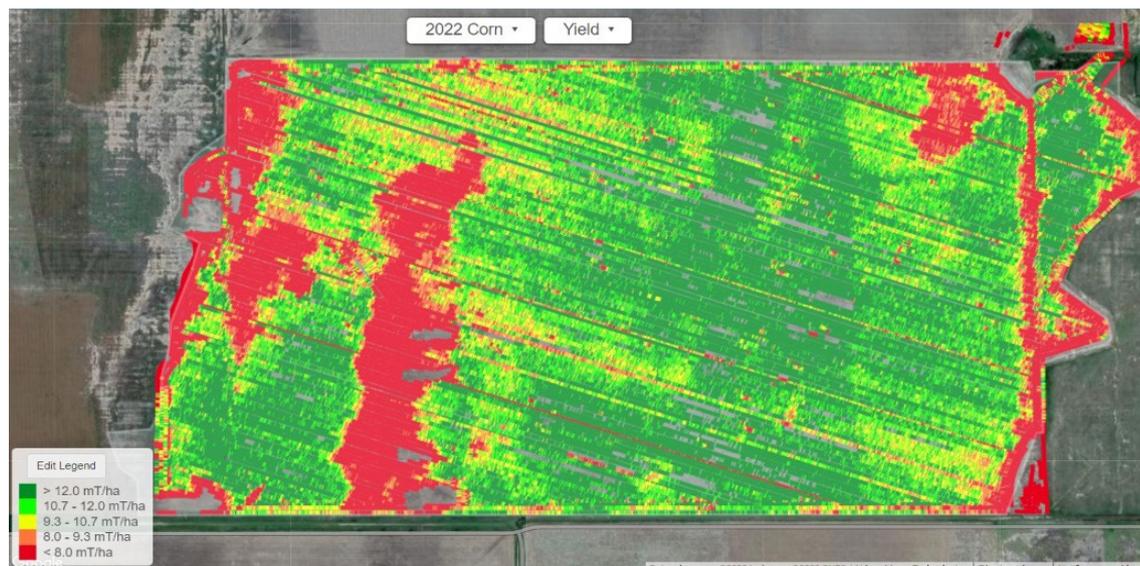


Figura 3: Rendimiento del maíz en el estudio de caso ubicado en Alejandro Roca, campaña 2021-2022.

Figure 3: Corn yield in the case study located in Alejandro Roca, 2021-2022 crop season.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En un primer lugar, se presentan los resultados para la provincia de Córdoba. En segundo lugar, se presentan los resultados del estudio de caso a campo. La Tabla 2 muestra los resultados de la HC por tonelada y por hectárea. Los resultados para cada Departamento se ponderaron por el porcentaje de lo producido para obtener un único resultado para la provincia.

Tabla 2: Huella de carbono (HC) del maíz de Córdoba expresada en porcentaje de participación, por tonelada y por hectárea.

Table 2: Carbon footprint of Córdoba corn expressed in share percentage, per ton and per hectare.

Departamento	Participación	HC	
		kg CO ₂ eq t ⁻¹	kg CO ₂ eq ha ⁻¹
Calamuchita	1,2%	133	1166
Capital	0,1%	158	1408
Colón	1,8%	146	1271
General Roca	9,8%	185	1537
Gral San Martín	4,4%	157	1458
Ischilín	0,2%	128	1078
Pocho	0,2%	131	1141
Juárez Celman	7,4%	158	1442
Marcos Juárez	8,4%	173	1786
Roque Sáenz Peña	5,4%	201	1828
Río Cuarto	18,2%	154	1308
Río Primero	6,2%	133	1143
Río Seco	1,9%	110	880
Río Segundo	5,0%	140	1259
San Justo	7,2%	150	1271
Santa María	2,7%	131	1164
Tercero Arriba	5,9%	137	1236
Totoral	3,0%	122	1057
Tulumba	2,2%	101	830
Unión	9,2%	178	1743
Promedio ponderado: Provincia		156,5	1402,8

En la Figura 4 se observan, en forma gráfica, los principales elementos que determinan la HC del maíz de Córdoba, agrupados por categorías, para la unidad declarada que es un kilogramo de maíz en la tranquera del campo.

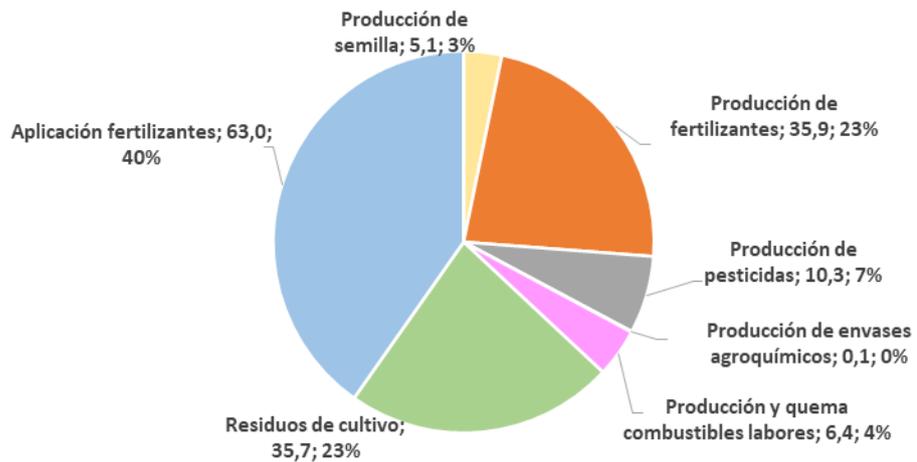


Figura 4: Huella de carbono del maíz de Córdoba por etapa, expresada en kgCO₂ eq t⁻¹ y su participación porcentual en el total.

Figure 4: Carbon footprint (CF) of Córdoba maize per stage, expressed in kgCO₂ eq t⁻¹, and its percentage share in the total CF.

En la Figura 5 se muestran de forma detallada todas las entradas (insumos) y las salidas (emisiones y residuos) del inventario ambiental de la producción de maíz de Córdoba, como promedios ponderados de las entradas y salidas de cada Departamento.

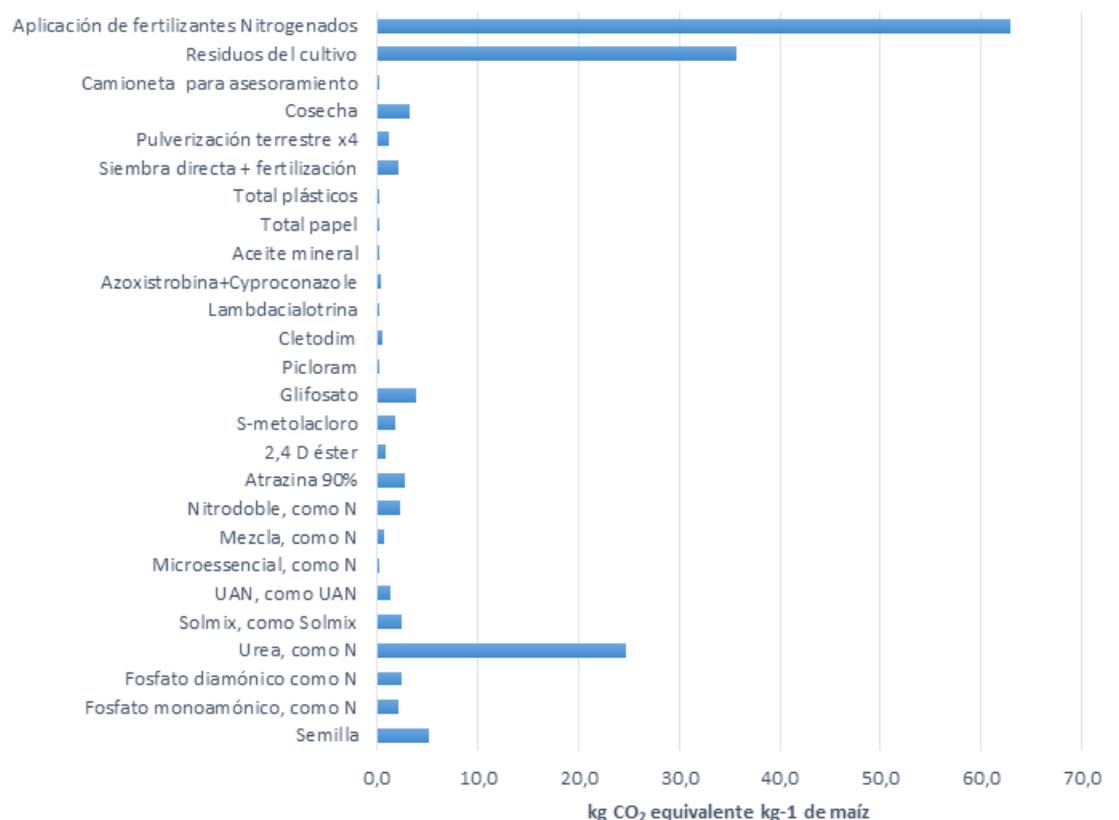


Figura 5: Inventario ambiental de la producción de maíz de Córdoba expresado en kg CO₂ eq kg⁻¹ de maíz.

Figure 5: Environmental inventory of corn production in Córdoba expressed in kg CO₂ eq kg⁻¹ of corn.

La Tabla 3 muestra el uso de fertilizantes nitrogenados en las últimas tres campañas, en la provincia de Córdoba, como así también la comparación de la campaña 2019/2020 sobre 2018/2019 y de la campaña 2020/2021 sobre 2019/2020. La misma tabla muestra los rendimientos de las últimas tres campañas y su comparación con las campañas anteriores. De igual modo, se muestra la HC del maíz ($\text{kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$) en las últimas tres campañas, y su comparación entre campañas. Además, la Tabla 3 muestra que el uso de fertilizantes nitrogenados en la campaña analizada ($88,7 \text{ kg ha}^{-1}$) ha sido mayor que en las dos campañas anteriores. A su vez, el rendimiento se encuentra en un valor intermedio ($8,5 \text{ t ha}^{-1}$), mientras que la HC ($156,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$) resulta la mayor de las últimas tres campañas.

Tabla 3: Uso de fertilizantes nitrogenados (kg ha^{-1}), rendimientos (t ha^{-1}) y HC ($\text{kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$) en las últimas tres campañas.

Table 3: Nitrogenous fertilizer use (kg ha^{-1}), yield (t ha^{-1}) and carbon footprint ($\text{kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$) in the last three crop seasons.

	Campaña	Promedio ponderado Provincia
Fertilizantes nitrogenados (kg ha^{-1})	2018/2019	76,4
	2019/2020	58,2
	2020/2021	88,7
2019/2020 sobre 2018/2019		-24%
2020/2021 sobre 2019/2020		52%
Rendimiento (t ha^{-1})	2018/2019	9,2
	2019/2020	8,3
	2020/2021	8,5
2019/2020 sobre 2018/2019		-9%
2020/2021 sobre 2019/2020		2%
HC ($\text{kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$)	2018/2019	133,8
	2019/2020	130,0
	2020/2021	156,5
2019/2020 sobre 2018/2019		-3%
2020/2021 sobre 2019/2020		20%

En definitiva, los resultados obtenidos en este trabajo para la campaña 2020-2021 muestran que la HC del maíz a campo fue de $156,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ de maíz ($1402,8 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$). La causa de la diferencia de HC entre departamentos puede explicarse tanto por las diferencias de rendimiento, como por la cantidad de insumos usados. Es decir, el mayor impacto puede estar dado por la combinación de ambas variables. La Figura 6 muestra la relación existente entre la HC y la dosis de N, mientras que la Figura 7 muestra la relación existente entre los rendimientos departamentales y la HC.

En general, los valores encontrados por este trabajo se encuentran por debajo de los valores internacionales, utilizando los mismos métodos y protocolos adoptados internacionalmente. El resultado promedio de HC es un 65% inferior a los $451 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ reportados por Nemecek et al. (2012) para el maíz global. Es un 60% inferior al promedio de China, que es de $389 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ (Ma et al, 2012; Qi et al, 2018; Wang et al, 2015; Xu & Lan, 2016; Zhang et al, 2018). También es un 41% menor a los $267 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ promedio de Europa (Amaia et al, 2012; Holka & Bienkowski, 2020). Es 51% inferior al de Norteamérica (Adviento-Borbe et al, 2007; Jayasundara et al, 2014; Ma et al, 2012; Sheehan, 2014; Snyder et al, 2009). La HC del maíz de Córdoba es un 57% menor que los $366 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ promedio informados por Trovo-Garofalo et al (2022) y un 32% inferior a los $299 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ publicados por Arrieta et al (2018) para la campaña 2012-2013 en Argentina.

Una posible explicación es el bajo nivel de insumos que se aplican al cultivo, en términos comparativos, con el resto del mundo. La dosis promedio de N elemental aplicada en el maíz de Córdoba fue de $88,7 \text{ kg ha}^{-1}$, mientras que en el resto del mundo las dosis son superiores a los 100 kg ha^{-1} . Por otro lado, la mayor adopción de

siembra directa contribuye con un menor consumo total de combustible, ya que la labranza convencional implica un consumo de 18,76 L ha⁻¹, mientras que con siembra directa el consumo disminuye a 6,55 L ha⁻¹, explicando la menor huella.

La Figura 6 muestra la relación existente entre la HC (kg CO₂ eq t⁻¹) y la dosis de N (kg ha⁻¹). Si bien los resultados no son muy significativos estadísticamente (R²=0,664), por provenir de datos promedios departamentales, se puede observar que existe una relación lineal entre HC y N por debajo de los 107 kg ha⁻¹ de N, punto donde la curva alcanza su máximo.

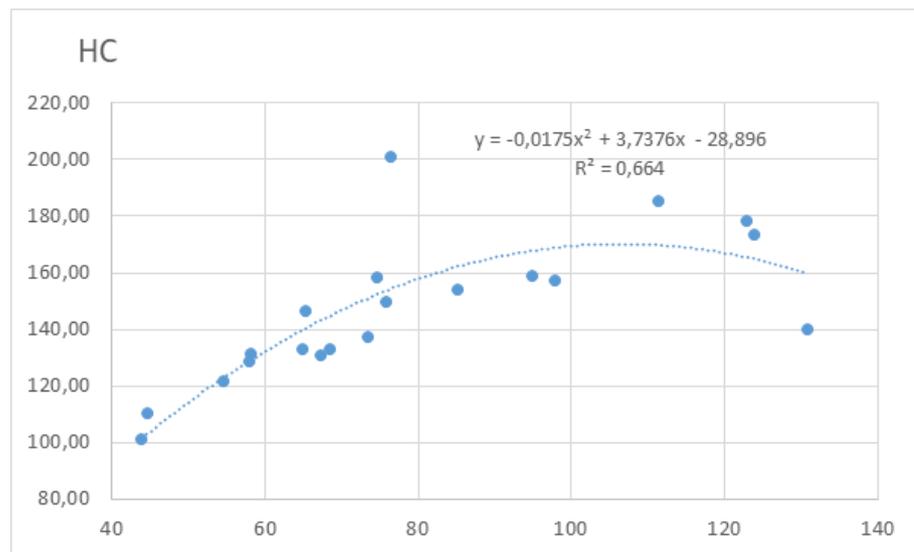


Figura 6: Relación entre la HC (kg CO₂ eq t⁻¹) y la dosis de N (kg ha⁻¹).

Figure 6: Relationship between CF (kg CO₂ eq t⁻¹) and N rate (kg ha⁻¹).

La Figura 7 muestra la relación existente entre los rendimientos departamentales (t ha⁻¹) y la HC (kg CO₂ eq t⁻¹). Si bien los resultados no son muy significativos estadísticamente (R²=0,3657), no se pudo establecer una relación inversa, como se hipotetizaba.

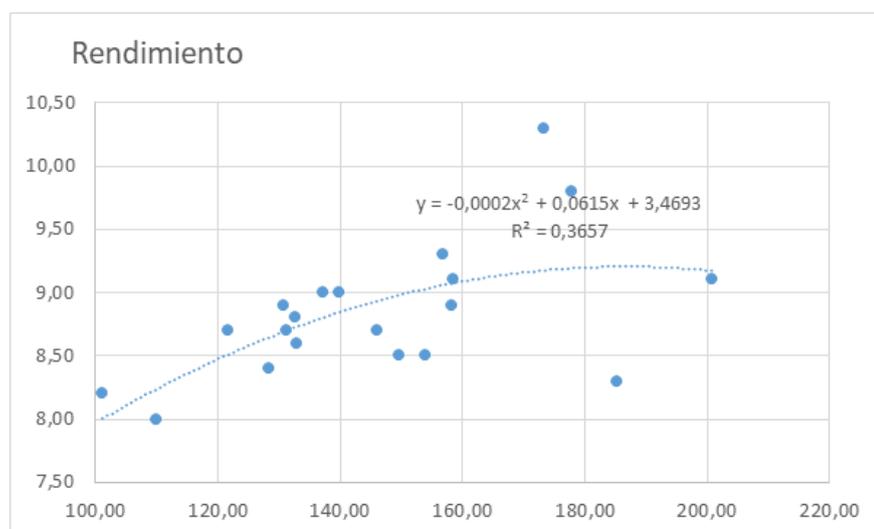


Figura 7: Relación entre rendimiento (t ha⁻¹) y la HC (kg CO₂ eq t⁻¹)

Figure 7: Relationship between yield (t ha⁻¹) and CF (kg CO₂ eq t⁻¹)

Por otro lado, se presentan los resultados del estudio de caso realizado en un lote cercano a la localidad de Alejandro Roca, Córdoba. En la Tabla 4 se observa las proporciones de cada ambiente que hay dentro del lote, 22% correspondiente a ambientes de alta producción (AP), 49% media producción (MP) y finalmente 29 % del lote con ambientes de baja producción (BP).

Tabla 4: Proporción de las zonas de manejo (%), HC de producto (kg CO₂ eq t⁻¹), HC por hectárea (kg CO₂ eq ha⁻¹) y HC ponderada de las tres zonas de manejo (kg CO₂ eq t⁻¹).

Table 4: Proportion of management areas (%), product carbon footprint (kg CO₂ eq t⁻¹), carbon footprint per hectare (kg CO₂ eq ha⁻¹) and weighted carbon footprint of the three management areas. management (kg CO₂ eq t⁻¹).

Zona de manejo	Proporción del área	HC kg CO ₂ eq t ⁻¹	HC kg CO ₂ eq ha ⁻¹	Proporción de la huella de la huella kg CO ₂ eq t ⁻¹	Huella ponderada
AP	22%	133,55	1779,19	29,38	
MP	49%	135,34	1661,24	66,31	124,13
BP	29%	98,04	708,35	28,43	
Uniforme	100	150,75	1432,13		150,75

Se puede observar que, en el planteo de manejo por ambiente, el impacto calentamiento global o HC fue de 124,13 kg CO₂ eq t⁻¹ versus 150,75 kg CO₂ eq t⁻¹ del planteo de manejo uniforme, con dosis fija de nitrógeno (Tabla 4). Para esta situación, el planteo de manejo por ambiente fue muy beneficiosa, no solo por el aumento de rendimiento sino también por la mejor utilización de los insumos aplicados (aumento de margen bruto). A esto debemos sumarle el efecto ambiental ya que se disminuye la HC en un 21,45%. Una posible explicación a la menor huella es el uso más eficiente del fertilizante, por el manejo de dosis variable.

Estos resultados coinciden con los propuestos por Finger et al. (2019) dado que el manejo variable del N mediante técnicas de manejo sitio específica de cultivos disminuye el impacto ambiental de la agricultura, dado que permite ajustar la demanda de nutrientes a la variabilidad espacial de la oferta de los mismos según lo proponen Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004). Este manejo variable de los insumos, genera un mayor retorno económico al empleo de fertilizantes a la vez de disminuir el impacto ambiental de los mismos, lo cual es coincidente con Brown et al. (2015) quienes lo relacionaron con una menor HC.

En general, tanto en los planteos a nivel departamental, como en el estudio de caso, se puede observar que la fertilización nitrogenada, junto a los residuos de cosecha, son los puntos críticos más relevantes identificados. La producción de los fertilizantes y pesticidas utilizados es el siguiente punto crítico.

La fertilización nitrogenada en el punto crítico más importante sobre el que es posible actuar con diferentes técnicas para reducir la HC a campo. Una posibilidad para accionar en este sentido e incrementar la productividad es introducir leguminosas en la rotación de cultivos. Otra posibilidad es el uso de residuos orgánicos como fertilizante. Asimismo, la bibliografía indica que las tecnologías de agricultura de precisión para el manejo sitio-específico de los insumos presentan un alto potencial de reducción de huellas ambientales (Finger et al., 2019), como así también las tecnologías de los fertilizantes de liberación controlada y el riego complementario (Ahmed et al., 2020). Respecto a la producción de fitosanitarios, se recomienda estar atento a los nuevos productos del mercado, con menor impacto ambiental comprobable.

El consumo de gasoil en las labores es el segundo punto crítico sobre el que actuar para reducir la HC. En este sentido, es fundamental la elección del sistema adecuado de labranza, así como del tractor y el manejo del mismo. La bibliografía consultada indica que un factor de reducción de emisiones es el mantenimiento preventivo de la maquinaria, como así también el uso de motores diésel de nueva generación. En el futuro, se prevé que la incorporación de maquinaria agrícola con motores eléctricos tendrá un gran efecto sobre la disminución de las emisiones (Ahmed et al., 2020).

Algunos departamentos lideran la producción total de maíz de la provincia. Los resultados muestran que, en general, la producción en estas regiones presenta huellas de carbono similares o superiores al promedio provincial, por lo que resulta crucial trabajar específicamente en estas regiones para ajustar particularmente las dosis de agroquímicos, y en particular, la de fertilizantes aplicados. Por otra parte, es relevante tener en consideración que cualquiera de las medidas propuestas tiene una repercusión económica positiva en las empresas, puesto que, en definitiva, se promueve un uso eficiente de los insumos y la energía.

Se comprobó la hipótesis de que la HC de la producción local tiene valores inferiores al promedio mundial informado por la literatura.

No se pudo comprobar la relación inversa esperada entre rendimiento y HC.

Los resultados del análisis indican que existe una relación directa entre la HC y la dosis de N sólo por debajo de los 107 kg ha⁻¹ de N.

CONCLUSIONES

Este trabajo caracterizó el impacto ambiental calentamiento global o HC, tanto a nivel de departamentos de la provincia de Córdoba, como en el estudio de un caso en un campo. Los valores encontrados en la HC de maíz son menores a los valores internacionales publicados, utilizando los mismos estándares mundialmente aceptados. Eso implica que el maíz de Córdoba es más sostenible en términos ambientales y que también constituye una ventaja competitiva, porque constituye un valor agregado ambiental.

El uso eficiente de los recursos es el camino para lograr una producción sostenible. Se destacan particularmente la fertilización nitrogenada y el consumo de gasoil como aquellos puntos en los que hay mayor margen de acción con la tecnología disponible.

El manejo variable del N mediante el uso del manejo sitio específico aumenta el retorno económico al N a la vez de disminuir la HC en la producción del maíz.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo profesional del Departamento de Información Agronómica de la Bolsa de Cereales de Córdoba, por brindar la base de datos primaria sobre la que se realizó el estudio.

REFERENCIAS

- Adeyemi, O., Keshavarz-Afshar, R., Jahanzad, E., Battaglia, M. L., Luo, Y. & Sadaghpour, A. (2020). Effect of wheat cover crop and split nitrogen application on corn yield and nitrogen use efficiency. *Agronomy*, 10(8), 2-11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081081>
- Adviento-Borbe, M. A., Haddix, M. L., Binder, D. L., Walters, D. T., & Dobermann, A. (2007). Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Obtenido de Global Change Biology* 13: 1972–1988 - September 2007: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01421.x>
- Agyin-Birikorang, S., Tindjina, I., Adu-Gyamfi, R., Dauda, H. W., Fuseini, A. R. & Singh, U. (2020). Agronomic effectiveness of urea deep placement technology for upland maize production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 116(2), 179–193. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10039-8>
- Ahmed, J., Almeida, E., Aminetzah, D., Denis, N., Henderson, K., Katz, J., Kitchel, H. -& Mannion, P. (2020). *Agriculture and climate change. Reducing emissions through improved farming practices*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/reducing-agriculture-emissions-through-improved-farming-practices#>
- Alvarez, C., Costantini, A., Alvarez, C. R., Alves, B. J., Jantalia, C. P., Martellotto, E. E., & Urquiaga, S. (2012). Soil nitrous oxide emissions under different management practices in the semiarid region of the Argentinian Pampas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(2–3), 209–220. <https://doi.org/10.1007/S10705-012-9534-9>
- Amaia, A., Lafarga, A., del Hierro, O., Unamunzaga, O., Besga, G., Domench, F., & Soplana, A. (2012). Huella de Carbono de los Cereales: Análisis de la emisión de gases de efecto invernadero en el sector agroalimentario. <https://www.navarraagraria.com/categories/item/257-huella-de-carbono-de-los-cereales-analisis-de-la-emision-de-gases-de-efecto-invernadero-en-el-sector-agroalimentario>: Navarra Agraria ISSN 0214-6401, N° 194, 2012, págs. 31-38. Navarra, España.

- Andrade, F. (2021). *Los desafíos de la agricultura global*. Ediciones INTA. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/9137>
- Arrieta, E. M., Cuchietti, A., Cabrol, D. & González, A. D. (2018). Greenhouse gas emissions and energy efficiencies for soybeans and maize cultivated in different agronomic zones: A case study of Argentina. *Science of the Total Environment*, 625, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.286>
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Van der Wal, T., Soto, I., Gómez-Barbero, M., Barnes, a. & Eory, V. (2017). Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics. *Sustainability*, 8 (9), 1339.
- Bolsa de Cereales de Córdoba [BCCBA]. (2021). Cálculos finales de producción de maíz en Córdoba – Campaña 2020/21. *Bolsa de Cereales de Córdoba, Departamento de Información Agronómica*, Informe N° 377. <https://www.bccba.org.ar/informes/calculos-finales-de-produccion-de-maiz-en-cordoba-campana-2020-21/>
- Bongiovanni, R. & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision Agriculture and Sustainability. *Journal of Precision Agriculture*, 5, 359–387.
- Bongiovanni, R. y Tuninetti, L. (2021). Huella de carbono y huella energética del etanol anhidro producido en una mini destilería “minidest” en origen. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 47(2).
- Bongiovanni, R., Mantovani, E. C., Best, S. y Roel, A. (2006). *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur (PROCISUR) – Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). <https://www.procisur.org.uy/bibliotecas/libros/agricultura-de-precision-integrando-conocimientos-para-una-agricultura-moderna-y-sustentable/es>
- Boone, L., Van linden, V., De Meester, S., Vandecasteele, B., Muylle, H., Roldán-Ruiz, I., Nemecek, T. & Dewulf, J. (2016). Environmental life cycle assessment of grain maize production: An analysis of factors causing variability. *Science of the Total Environment*, 15(553), 551–564: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.089>
- Bricchi, E., Degioanni, A. y Cantero, A. (2006). El origen de los sistemas suelos. En E. Bricchi y A. Degioanni (Comps.), *El sistema suelo. Origen y propiedades* (pp. 13–24). Editorial de la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Brown, R. M., Dillon, C. R., Schieffer, J. & Shockley, J. M. (2015). The carbon footprint and economic impact of precision agriculture technology on a corn and soybean farm. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 5(3), 335–348. <https://doi.org/10.1080/21606544.2015.1090932>
- Correndo, A. A., Rotundo, J. L., Tremblay, N., Archontoulis, S., Coulter, J. A., Ruiz-Diaz, D., Franze, D., Franzluebbers, A. J., Nafziger, E., Schwalbert, R., Steinke, K., Williams, J., Messina, C. D. & Ciampitti, I. A. (2021). Assessing the uncertainty of maize yield without nitrogen fertilization. *Field Crops Research*, 260, 107985. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107985>
- Espósito, G. (2013). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME)* [Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba]. Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Córdoba. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1497>
- European Commission. (2020). *Flash Eurobarometer 367: Attitudes of Europeans towards building the single market for green products*. The Official portal for European data. https://data.europa.eu/data/datasets/s1048_367?locale=en
- Eyhéabide, G. H. (2012). *Bases para el Manejo del Cultivo de Maíz*. Ediciones INTA. <https://inta.gob.ar/documentos/bases-para-el-manejo-del-cultivo-de-maiz>
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N. & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11, 313-335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- Grassini, P., & Cassman, K. (2012). High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. Obtenido de Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 109, 1074–1079: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1116364109>
- Hilbert, J. A., Manosalva, J. A. y Ponieman, K. (2021). Estudios sobre biorefinerías de maíz en la Argentina. *Proceeding of the 9th International Conferencie on Life Cycle Assessment* (pp. 190-193). CILCA, Buenos Aires.
- Holka, M., & Bienkowski, J. (2020). Carbon Footprint and Life-Cycle Costs of Maize Production in Conventional and Non-Inversion Tillage Systems. Obtenido de *Agronomy* 2020, 10, 1877: doi:10.3390/agronomy10121877
- Institute for Business Vale [IBM]. (2020). *Meet the 2020 consumers driving change*. <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/consumer-2020>
- International Fertilizer Association [IFA]. (2019). *IFASTAT. Statistical information on fertilizer & raw materials supply and fertilizer consumption*. <https://www.ifastat.org/databases>
- International Society of Precision Agriculture [ISPA]. (2021). *Precision Ag Definition*. <https://ispag.org/about/definition>
- IRAM-ISO 14067. (2019). *Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación. Primera edición 2019-11-08*. <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/12261>
- Kongshaug, G. (1998). Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. *IFA Technical Conference*. International Fertilizer Industry Association.
- Ma, B. L., Liang, B. C., Biswas, D. K., Morrison, M. J. & McLaughlin, N. B. (2012). The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94,15-31. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-95>
- Maestrini, B. & Basso, B. (2018). Drivers of within-field spatial and temporal variability of crop yield across the US Midwest. *Scientific Re-*

- ports, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32779-3>
- Morales-Morales, E. J., Rubí-Arriaga, M., López-Sandoval, J. A., Martínez-Campos, Á. R. y Morales-Rosales, E. J. (2019). Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1875–1886. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V10I8.1732>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015*. ONU A/RES/70/1. Roma.
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2019). *Perfeccionamiento de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446. <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0114-0>
- Qi, J. Y., Yang, S. T., Xue, J. F., Liu, C. X., Du, T. Q., Hao, J. P. & Cui, F. Z. (2018). Response of carbon footprint of spring maize production to cultivation patterns in the Loess Plateau, China. *Journal of Cleaner Production*, 187, 525–536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.184>
- Ransom, C. J., Kitchen, N. R., Camberato, J. J., Carter, P. R., Ferguson, R. B., Fernández, F. G., Franze, D. W., Laboski, C. A. M., Brenton Myers, D., Nafziger, E. D., Sawyer, J. E. & Shanahan, J. F. (2019). Statistical and machine learning methods evaluated for incorporating soil and weather into corn nitrogen recommendations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104872. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.104872>
- Seleiman, M. F., Almutairi, K. F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B. A. & Battaglia, M. L. (2021). Nano-Fertilization as an Emerging Fertilization Technique: Why Can Modern Agriculture Benefit from Its Use? *Plants*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/plants10010002>
- Sheehan, J. J. (2014). *Biofuels and sustainable development: Perspectives on the farm and around the globe*. Obtenido de Tesis Doctoral. University of Minnesota: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/163024>
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. Obtenido de *Agric. Ecosyst. Environ.* 133, 247–266 (2009): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880909001297>
- Socchiazzi, S., Basualdo, A. y Boragno, S. (2018). Mapas de áreas aptas para cultivos de secano en Argentina. *Reunión Argentina de Agrometeorología, Merlo, San Luis, Argentina*. Oficina de Riesgo Agropecuario, Secretaría de Agroindustria, Ministerio de Producción y Trabajo.
- Song, Z., Feng, X., Lal, R., Fan, M., Ren, J., Qi, H., Qian, C., Guo, J., Cai, H., Cao, T., Yu, Y., Hao, Y., Huang, X., Deng, A., Zheng, C., Zhang, J. & Zhang, W. (2019). Optimized agronomic management as a double-win option for higher maize productivity management as a double-win option for higher maize productivity and less global warming intensity: A case study of Northeastern China. *Advances in Agronomy*, 157, 251-292. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.04.002>
- Thapa, R., Chatterjee, A., Awale, R., McGranahan, D. A. & Daigh, A. (2016). Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1121-1134. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.06.0179>
- Trovo-Garofalo, D. F., Novaes, R. M., Ricardo A.A. Pazianotto, V. G.-M., Brandão, M., Zanin-Shimbo, J., & Folegatti-Matsuura, M. I. (2022). Land-use change CO2 emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. Obtenido de *Journal of Cleaner Production*, Volume 364, 2022, 132549, ISSN 0959-6526: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132549>
- Wang, H., Yang, Y., Zhang, X. & Tian, G. (2015). Carbon footprint analysis for mechanization of maize production based on life cycle assessment: A case study in Jilin Province, China. *Sustainability*, 7(11), 15772-15784. <https://doi.org/10.3390/su71115772>
- Xu, X. y Lan, Y. (2016). Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China. *Journal of Cleaner Production*, 146, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.181>
- Yan, M., Cheng, K., Luo, T., Yan, Y., Pan, G. & Rees, R. M. (2015). Carbon footprint of grain crop production in China - Based on farm survey data. *Journal of Cleaner Production*, 104, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.058>
- Zhang, L., Zhang, W., Cui, Z., Hu, Y., Schmidhalter, U. & Chen, X. (2021). Environmental, human health, and ecosystem economic performance of long-term optimizing nitrogen management for wheat production. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127620. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127620>
- Zhang, W., He, X., Zhang, Z., Gong, S., Zhang, Q., Zhang, W., Liu, D., Zou, C. & Chen, X. (2018). Carbon footprint assessment for irrigated and rainfed maize (*Zea mays* L.) production on the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering*, 167, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.008>

ANEXO

Planteos técnicos del cultivo de maíz por Departamento de la Provincia de Córdoba, campaña 2020-2021. Nivel tecnológico: A. Alto; M. Medio; B. Bajo; P. Ponderado.

Technical proposals for corn cultivation by Department of the Province of Córdoba, 2020-2021 crop season. Technological levels: A. High; M. Medium; B. Low; P. Weighted average.

Departamento	Calamuchita				Capital				Colón				General Roca				Gral San Martín			
	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P
Nivel tecnológico	5	70	25		30	60	10		30	60	10		30	60	10		40	50	10	
%	5	70	25		30	60	10		30	60	10		30	60	10		40	50	10	
Semilla kg ha ⁻¹	20	18	16	18	20	18	16	18	20	18	16	18	20	18	16	18	20	18	16	19
Fertilizante kg ha ⁻¹ :																				
Urea	150	100	70	95	150	100	70	112	150	100	70	112	200	150	100	160	200	150	100	165
Fosfato monoamónico	85	70	50	66	85	70	50	73	60	40	20	44	85	70	50	73	85	70	50	74
(total)																				
Fosfato monoamónico				46				37				26				58				67
Fosfato diamónico				36				0				16				124				54
Urea				108				85				71				179				165
Solmix				26				0				11				1				6
UAN				0				0				0				0				12
Microessencial				15				0				0				0				0
Mezcla				0				106				22				0				0
Nitrodoble				0				0				67				0				0
Herbicida:																				
Atrazina 90% kg ha ⁻¹	2,5	2,0	1,5	1,9	2,5	2,0	1,5	2,1	2,5	2,0	1,5	2,1	2,5	2,0	1,5	2,1	2,5	2,0	1,5	2,2
2,4 D éster L ha ⁻¹	2,0	1,5	1,0	1,4	2,0	1,5	1,0	1,6	2,0	1,5	1,0	1,6	2,0	1,5	1,0	1,6	2,0	1,5	1,0	1,7
S-metolacloro L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Glifosato L ha ⁻¹	7,0	5,0	3,0	4,6	7,0	5,0	3,0	5,4	7,0	5,0	3,0	5,4	7,0	5,0	3,0	5,4	7,0	5,0	3,0	5,6
Picloram L ha ⁻¹	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Cletodim L ha ⁻¹	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	1,1
Insecticida:																				

Lambdacialotrina kg ha ⁻¹	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0
Funguicida: Azoxistrobina+Cyproconazole L ha ⁻¹	1,0	0,8	0,5	0,7	1,0	0,8	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,9
Coadyuvante: Aceite mineral L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Gasoil L ha⁻¹:																				
Siembra directa + fertilización	5,59				5,59				5,59				5,59				5,59			
Pulverización terrestre x4	2,88				2,88				2,88				2,88				2,88			
Cosecha	8,44				8,44				8,44				8,44				8,44			
Camioneta para asesoramiento	0,37				0,37				0,37				0,37				0,37			
Total Gasoil	17,28				17,28				17,28				17,28				17,28			
Campaña 2020/2021:																				
Rendimiento q ha ⁻¹	88				89				87				83				93			
Producción t	272.755				21.301				418.205				2.311.098				1.030.720			
Porcentaje de la producción provincial	1,2%				0,1%				1,8%				9,8%				4,4%			

Departamento	Ischilín				Pocho				Juárez Celman				Marcos Juárez				Roque Sáenz Peña			
	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P
Nivel tecnológico %	10	10	80		45	45	10		90	5	5		90	5	5		60	30	10	
Semilla kg ha ⁻¹	20	18	16	17	20	18	16	19	20	18	16	19	20	18	16	19	20	18	16	19
Fertilizante kg ha⁻¹:																				
Urea	100	85	70	76	200	150	100	205	250	200	150	242	250	200	150	243	200	150	100	175
Fosfato monoamónico (total)	60	40	20	8	85	70	50	91	100	85	70	98	100	85	70	98	85	70	50	77

Fosfato monoamónico				14				16				80				101				81
Fosfato diamónico				31				2				51				0				30
Urea				54				39				146				245				195
Solmix				0				171				18				0				26
UAN				0				0				13				0				36
Microesencial				0				0				0				0				0
Mezcla				0				0				0				0				0
Nitrodoble				95				0				5				0				36
Herbicida:																				
Atrazina 90% kg ha ⁻¹	2,5	2,0	1,5	0,4	2,5	2,0	1,5	2,7	2,5	2,0	1,5	2,4	2,5	2,0	1,5	2,4	2,5	2,0	1,5	2,3
2,4 D éster L ha ⁻¹	2,0	1,5	1,0	0,3	2,0	1,5	1,0	2,1	2,0	1,5	1,0	1,9	2,0	1,5	1,0	1,9	2,0	1,5	1,0	1,8
S-metolacoloro L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0	0,2	1,0	1,0	1,0	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Glifosato L ha ⁻¹	7,0	5,0	3,0	1,0	7,0	5,0	3,0	7,0	7,0	5,0	3,0	6,7	7,0	5,0	3,0	6,7	7,0	5,0	3,0	6,0
Picloram L ha ⁻¹	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
Cletodim L ha ⁻¹	1,2	1,0	0,8	0,2	1,2	1,0	0,8	1,3	1,2	1,0	0,8	1,2	1,2	1,0	0,8	1,2	1,2	1,0	0,8	1,1
Insecticida:																				
Lambdacialotrina kg ha ⁻¹	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0
Funguicida:																				
Azoxistrobina+Cyproconazole L ha ⁻¹	1,0	0,8	0,5	0,2	1,0	0,8	0,5	1,0	1,0	0,8	0,5	1,0	1,0	0,8	0,5	1,0	1,0	0,8	0,5	0,9
Coadyuvante:																				
Aceite mineral L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0	0,2	1,0	1,0	1,0	1,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Gasoil L ha⁻¹																				
Siembra directa + fertilización	5,59				5,59				5,59				5,59				5,59			
Pulverización terrestre x4	2,88				2,88				2,88				2,88				2,88			
Cosecha	8,44				8,44				8,44				8,44				8,44			
Camioneta para asesoramiento	0,37				0,37				0,37				0,37				0,37			
Total Gasoil	17,28				17,28				17,28				17,28				17,28			
Campaña 2020/2021:																				
Rendimiento q ha ⁻¹	84				87				91				103				91			
Producción t	48.860				42.546				1.738.693				1.989.857				1.283.481			

Porcentaje de la producción provincial	0,2%	0,2%	7,4%	8,4%	5,4%
--	------	------	------	------	------

Departamento	Río Cuarto				Río Primero				Río Seco				Río Segundo				San Justo				
	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	
Nivel tecnológico																					
%	30	60	10		40	50	10		10	10	80		40	50	10		80	10	10		
Semilla kg ha⁻¹	20	18	16	18	20	18	16	19	20	18	16	17	20	18	16	19	20	18	16	19	
Fertilizante kg ha⁻¹:																					
Urea	200	150	100	160	200	150	100	165	100	85	70	75	200	150	100	165	200	150	100	185	
Fosfato monoamónico																					
(total)	85	70	50	73	85	70	50	74	60	40	20	26	85	70	50	74	85	70	50	80	
Fosfato monoamónico				58				26								46				28	
Fosfato diamónico				49				21								33				21	
Urea				126				91								118				102	
Solmix				15				31								45				55	
UAN				23				20								3				17	
Microessencial				2				0								0				7	
Mezcla				0				10								0				0	
Nitrodoble				4				0								0				14	
Herbicida:																					
Atrazina 90% kg ha ⁻¹	2,5	2,0	1,5	2,1	2,5	2,0	1,5	2,2	2,5	2,0	1,5	1,7	2,5	2,0	1,5	2,2	2,5	2,0	1,5	2,4	
2,4 D éster L ha ⁻¹	2,0	1,5	1,0	1,6	2,0	1,5	1,0	1,7	2,0	1,5	1,0	1,2	2,0	1,5	1,0	1,7	2,0	1,5	1,0	1,9	
S-metolacoloro L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Glifosato L ha ⁻¹	7,0	5,0	3,0	5,4	7,0	5,0	3,0	5,6	7,0	5,0	3,0	3,6	7,0	5,0	3,0	5,6	7,0	5,0	3,0	6,4	
Picloram L ha ⁻¹	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	
Cletodim L ha ⁻¹	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	1,1	1,2	1,0	0,8	0,9	1,2	1,0	0,8	1,1	1,2	1,0	0,8	1,1	
Insecticida:																					
Lambdacialotrina kg ha ⁻¹	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	
Funguicida:																					
Azoxistrobina+Cyproconazole L ha ⁻¹	1,0	0,8	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,9	1,0	0,8	0,5	0,6	1,0	0,8	0,5	0,9	1,0	0,8	0,5	0,9	

Coadyuvante:																				
Aceite mineral L ha ⁻¹	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Gasoil L ha⁻¹																				
Siembra directa + fertilización	5,59				5,59				5,59				5,59				5,59			
Pulverización terrestre x4	2,88				2,88				2,88				2,88				2,88			
Cosecha	8,44				8,44				8,44				8,44				8,44			
Camioneta para asesoramiento	0,37				0,37				0,37				0,37				0,37			
Total Gasoil	17,28				17,28				17,28				17,28				17,28			
Campaña 2020/2021:																				
Rendimiento q ha-1	85				86				80				90				85			
Producción t	4.307.044				1.456.776				453.004				1.179.196				1.696.686			
Porcentaje de la producción provincial	18,2%				6,2%				1,9%				4,9%				7,2%			

Departamento	Santa María				Tercero Arriba				Totoral				Tulumba				Unión			
	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P	A	M	B	P
Nivel tecnológico																				
%	20	40	40		30	60	10		10	40	50		10	15	75		90	5	5	
Semilla kg ha⁻¹	20	18	16	18	20	18	16	18	20	18	16	17	20	18	16	17	20	18	16	20
Fertilizante kg ha⁻¹:																				
Urea	200	150	100	140	150	120	100	127	100	85	70	79	100	85	70	75	250	200	150	243
Fosfato monoamónico																				
(total)	85	70	50	65	85	70	50	73	60	40	20	32	60	40	20	27	100	85	70	98
Fosfato monoamónico				46				55				15				11				89
Fosfato diamónico				35				27				19				39				36
Urea				101				116				66				75				221
Solmix				29				12				0				0				8
UAN				1				11				0				0				11

Microesencial				0				6				0				0				0
Mezcla				9				9				0				0				0
Nitrodoble				0				0				71				5				0
Herbicida:																				
Atrazina 90% kg ha-1	2,5	2,0	1,5	1,9	2,5	2,0	1,5	2,1	2,5	2,0	1,5	1,8	2,5	2,0	1,5	1,7	2,5	2,0	1,5	2,4
2,4 D éster L ha-1	2,0	1,5	1,0	1,4	2,0	1,5	1,0	1,6	2,0	1,5	1,0	1,3	2,0	1,5	1,0	1,2	2,0	1,5	1,0	1,9
S-metolacoloro L ha-1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Glifosato L ha-1	7,0	5,0	3,0	4,6	7,0	5,0	3,0	5,4	7,0	5,0	3,0	4,2	7,0	5,0	3,0	3,7	7,0	5,0	3,0	6,7
Picloram L ha-1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
Cletodim L ha-1	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	1,0	1,2	1,0	0,8	0,9	1,2	1,0	0,8	0,9	1,2	1,0	0,8	1,2
Insecticida:																				
Lambdacialotrina kg ha-1	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0	0,025	0,025	0,025	0,0
Funguicida:																				
Azoxistrobina+Cyproconazole L ha-1	1,0	0,8	0,5	0,7	1,0	0,8	0,5	0,8	1,0	0,8	0,5	0,7	1,0	0,8	0,5	0,6	1,0	0,8	0,5	1,0
Coadyuvante:																				
Aceite mineral L ha-1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Gasoil L ha-1																				
Siembra directa + fertilización	5,59				5,59				5,59				5,59				5,59			
Pulverización terrestre x4	2,88				2,88				2,88				2,88				2,88			
Cosecha	8,44				8,44				8,44				8,44				8,44			
Camioneta para asesoramiento	0,37				0,37				0,37				0,37				0,37			
Total Gasoil	17,28				17,28				17,28				17,28				17,28			
Campaña 2020/2021:																				
Rendimiento q ha-1	89				90				87				82				98			
Producción t	627.322				1.391.255				704.817				509.356				2.164.460			
Porcentaje de la producción provincial	2,7%				5,9%				2,9%				2,2%				9,2%			

Campaña 2020/2021	Provincia
Rendimiento q ha-1	88,4
Producción t	23,647,432
%	100