

Estructura del costo e impacto ambiental de la manzana: Estudio de caso en Uruguay

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY
ESPACIO INTERDISCIPLINARIO
CENTRO INTERDISCIPLINARIO ALIMENTACIÓN Y BIENESTAR
Observatorio del Derecho a la Alimentación en América Latina y el Caribe

Estructura del costo e impacto ambiental de la manzana:
Estudio de caso en Uruguay

Autoría: Alejandra Girona[1,2], Gastón Ares[2,3], Gerónimo Brunet[2],
Gabriela Fajardo[1,2], María Inés Cabot[2]

[1] Observatorio del Derecho a la Alimentación, Escuela de Nutrición,
Universidad de la República
[2] Centro Interdisciplinario Alimentación y Bienestar, Espacio Interdisciplinario,
Universidad de la República
[3] Facultad de Química, Universidad de la República

Equipo colaborador: Florencia Ceriani, Guillermo Silva, Belén Araujo,
Vanessa Gugliucci, Viviana Santín

Revisión técnica: Daniela Godoy, Elisa Bandeira

Financiación: El trabajo fue financiado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el contexto de la carta de acuerdo entre FAO y la Escuela de Nutrición a través del Observatorio del Derecho a la Alimentación (TCP/RLA/3904). El equipo de investigación también contó con financiación del Espacio Interdisciplinario de la Universidad de la República.

Diseño y diagramación: Leticia Varela

Setiembre de 2026
Montevideo, Uruguay

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento No Comercial 4.0 Internacional.

Contacto: alimentacionybienestar@ei.udelar.edu.uy
www.alimentacionybienestar.ei.udelar.edu.uy

Resumen

En Uruguay, el consumo de frutas y verduras es bajo, en parte debido a barreras económicas y de accesibilidad. Este estudio buscó aportar evidencia sobre los factores que inciden en el precio final de estos alimentos y su huella ambiental. El informe analiza la estructura de costos y el impacto ambiental de un alimento representativo de una dieta saludable en Uruguay. Como estudio de caso se seleccionó la manzana debido a que es la segunda fruta más consumida en el país y es abastecida principalmente por producción nacional. La investigación combinó revisión documental y entrevistas a actores clave para elaborar un mapa de la cadena de valor, en el que se identificaron las actividades y los recursos desde la producción hasta la comercialización. Se realizaron 15 entrevistas semiestructuradas a productores, transportistas, comerciantes y representantes gubernamentales entre marzo y mayo de 2025. El análisis económico consideró costos directos e indirectos asociados a insumos, mano de obra, agua, energía, infraestructura y transporte, expresados por hectárea y por kilogramo de producto. Paralelamente, se estimó el impacto ambiental mediante un Análisis de Ciclo de Vida con enfoque «de cuna a puerta», utilizando como unidad funcional 1 kg de manzana lista para la venta. El estudio incluyó cuatro unidades productivas ubicadas en los departamentos de Montevideo, Canelones y San José, de pequeña y mediana escala. Los costos totales por hectárea mostraron una variabilidad considerable entre productores. La mano de obra fue el principal componente del costo, representando en promedio el 48,4 %, seguida por fertilizantes y fitosanitarios, almacenamiento en frío y transporte. Desde la perspectiva ambiental, los principales puntos críticos fueron el uso de diésel en labores agrícolas, el consumo de electricidad en el almacenamiento frigorífico, el uso del suelo y el manejo de fertilizantes. En particular, la intensidad de aplicación de fertilizantes y el uso de agua para riego influyeron significativamente en los impactos ambientales. Los resultados evidencian una alta variabilidad entre unidades productivas, asociada a diferencias en escala, integración de actividades, decisiones tecnológicas y manejo agronómico. Estos hallazgos aportan insumos relevantes para el diseño de políticas públicas orientadas a mejorar el acceso a alimentos saludables y promover sistemas agroalimentarios más sostenibles en Uruguay.

Contenido

1. Introducción	5
2. Selección de la manzana para el estudio de caso	9
3. Metodología	16
3.1. Unidades productivas relevadas	17
3.2. Encuestas	18
3.3. Relevamiento de estructura de costos de unidades productivas	19
3.4. Estimación del impacto ambiental	20
3.4.1. Modelización de los procesos productivos	21
3.4.2. Modelización de los impactos ambientales	27
4. Resultados	28
4.1. Estructura de costos	29
4.2. Márgenes de ganancia durante la comercialización	33
4.3. Impacto ambiental de la manzana	34
5. Discusión	40
5.1. Estructura de costos de la producción, almacenamiento y transporte de manzana en Uruguay	41
5.2. Impacto ambiental de la producción, almacenamiento y transporte de manzana en Uruguay	44
6. Conclusiones	47
Referencias	50
Anexos	54

1.
Introducción

1. Introducción

La promoción de dietas saludables constituye uno de los principales desafíos que enfrentan los sistemas alimentarios contemporáneos.[1] Existe amplio consenso en la literatura científica y en las recomendaciones de organismos internacionales en que una alimentación saludable debe basarse en una diversidad de alimentos nutritivos, con una presencia destacada de frutas y verduras.[2] Sin embargo, tanto a nivel global como en Uruguay, solo una baja proporción de la población presenta patrones alimentarios compatibles con estas recomendaciones, en un contexto caracterizado por la triple carga de la malnutrición.[1,3,4]

Entre los múltiples determinantes de las desviaciones de las recomendaciones nutricionales, el precio y la asequibilidad de los alimentos ocupan un lugar central.[5] Diversos estudios han mostrado que las dificultades de acceso económico constituyen una barrera relevante para el consumo de alimentos recomendados como parte de una dieta saludable como frutas, verduras y carnes, particularmente en hogares de menores ingresos[6] evidencia de que los alimentos con mayor calidad nutricional tienden a presentar precios relativamente más elevados que alternativas de menor valor nutricional, lo que puede contribuir a limitar el acceso a dietas saludables y profundizar desigualdades en la calidad de la alimentación.[7]

En este contexto, comprender la conformación de los costos a lo largo de las cadenas de valor alimentarias es fundamental para diseñar estrategias orientadas a mejorar el acceso a dietas saludables. Su análisis permite identificar los principales componentes que determinan el precio final de los alimentos, así como los factores tecnológicos, productivos y organizacionales que intervienen en su configuración.[8] Esta evidencia resulta clave para detectar oportunidades de mejora en la eficiencia de las cadenas agroalimentarias y orientar políticas que contribuyan a fortalecer la disponibilidad y asequibilidad de alimentos saludables. No obstante, en Uruguay aún es limitada la información sistemática disponible sobre la composición de costos de frutas y verduras.[9]

En las últimas décadas, la dimensión ambiental de los sistemas agroalimentarios ha cobrado relevancia.[10,11] La producción, el procesamiento, el transporte, el almacenamiento y el consumo de alimentos demandan grandes cantidades de recursos naturales y generan impactos ambientales relevantes. Entre estos impactos se incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso intensivo de agua dulce, la degradación y los cambios en el uso del suelo —con sus efectos asociados sobre la biodiversidad—, así como la contaminación derivada del uso de insumos agrícolas.[11,12] A nivel global, se estima que los sistemas agroalimentarios son responsables de aproximadamente un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que pone de manifiesto su relevancia en el contexto de los esfuerzos internacionales para mitigar el cambio climático.[13] Por este motivo, la evaluación del impacto ambiental de los alimentos se ha convertido en una herramienta clave para orientar la transición hacia sistemas agroalimentarios más sostenibles.[14]

La metodología como el análisis de Ciclo de Vida permiten estimar los impactos asociados a distintas etapas de la cadena productiva, identificando procesos críticos y oportunidades de mejora desde una perspectiva ambiental.[15] Este tipo de análisis resulta especialmente relevante para comprender cómo las decisiones tecnológicas, el manejo agronómico, la intensidad en el uso de insumos o la organización de la cadena de suministro influyen en la generación de impactos ambientales para el desarrollo de estrategias de mitigación.[16,17]

La consideración conjunta de las dimensiones económica y ambiental resulta particularmente importante en el caso de alimentos asociados a dietas saludables. Promover su consumo requiere no solo mejorar su disponibilidad y asequibilidad, sino también comprender los impactos ambientales vinculados a su producción y distribución. Sin embargo, en la práctica, estas dos dimensiones suelen ser analizadas de forma separada, lo que limita la posibilidad de avanzar hacia enfoques integrados que permitan abordar simultáneamente los desafíos de salud pública, sostenibilidad ambiental y desarrollo productivo.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue analizar la estructura de costos y el impacto ambiental de un alimento de la dieta saludable en Uruguay. En particular, se abordó el caso de la manzana, una de las frutas más consumidas en el país y abastecida mayoritariamente por producción nacional. El trabajo buscó identificar los principales factores que inciden

en la formación de su precio a lo largo de la cadena de valor, así como los procesos productivos y logísticos que generan impactos ambientales relevantes. De este modo, el estudio procura aportar evidencia que contribuya a informar el diseño de políticas públicas y estrategias sectoriales orientadas a mejorar el acceso a alimentos saludables y promover sistemas agroalimentarios más sostenibles.

2.
Selección de la manzana para el estudio de caso

2. Selección de la manzana para el estudio de caso

Se seleccionó un alimento perteneciente a la dieta saludable según la definición de la OMS y la FAO,[2] priorizando el grupo de frutas y verduras. Esta elección se fundamentó en el papel central que dichos alimentos ocupan en una alimentación saludable y en su reconocida contribución a la prevención de enfermedades no transmisibles, entre ellas las cardiovasculares, el cáncer y la diabetes.[18–20] Asimismo, su consumo se encuentra significativamente por debajo de las recomendaciones tanto a nivel internacional como nacional, lo que constituye un desafío relevante para la promoción de hábitos alimentarios saludables.[3,4,21]

Dentro del grupo de frutas y verduras, la selección del alimento del caso de estudio se realizó siguiendo los siguientes criterios: i) pertenecer a los 3 más consumidos en uno de los grupos (frutas o verduras); ii) presentar estabilidad en el consumo en los últimos 10 años; iii) ser un alimento abastecido principalmente a través de producción nacional.

La Tabla 1 describe el consumo aparente de las frutas, verduras y tubérculos más frecuentemente reportados por los hogares del país, con base en datos de la Encuesta Nacional de Gastos e Ingresos de los Hogares (ENGIH) 2016–2017.[22] Luego de las papas o papines, las frutas que los hogares adquieren con mayor frecuencia son las bananas (49,4 %), las manzanas (43,4 %) y las naranjas o bergamotas (24,5 %). En la misma línea, el consumo aparente per cápita promedio de estas frutas es mayor en comparación con aquellas adquiridas con menor frecuencia. Por estas razones, se seleccionó un alimento perteneciente al grupo de las frutas, en lugar de una verdura.

Aunque las bananas son la fruta de mayor consumo en el país, no se producen localmente. Por esta razón, se optó por centrar el estudio de caso en la manzana. Este constituye un alimento abastecido mayoritariamente por producción nacional, adquirido por una amplia proporción de la población y con un elevado consumo aparente dentro del grupo de las frutas. Por otra parte, el consumo de manzana ha mantenido estabilidad en los últimos años.

Tabla 1. Consumo aparente per cápita de principales frutas, verduras y tubérculos en hogares particulares de Uruguay (n=6889).

Producto	Porcentaje de hogares que adquirieron	Media de consumo aparente diario (g/per cápita)
Papa, papines	54,9	56,2
Banana	49,4	26,0
Cebolla, cebollines, cebolla de verdeo	46,7	19,8
Manzana	**43,4**	**31,2**
Tomate común, grande (americano, larga vida)	42,0	28,6
Morrón	37,9	10,6
Zanahoria	35,3	13,5
Lechuga	27,1	7,6
Bergamota, naranja	24,5	23,4
Zapallo criollo, calabaza y kabutiá	23,7	11,7
Boniato	21,5	11,0
Mandarina	17,5	13,9
Pera	12,0	8,7
Zapallito y zucchini	11,1	8,6
Limón	10,5	2,1
Ajo	9,7	0,4
Durazno, damasco, pelón	9,3	6,3
Acelga	7,7	7,0

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la última Encuesta Nacional de Gastos e Ingresos de los Hogares (2016-2017).[22]

La producción de manzana ha estado históricamente arraigada a la producción frutícola en el Uruguay siendo el manzano el principal frutal de hoja caduca en el país. Según datos de la Oficina de Estadísticas Agropecuarias del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca[23] existen 472 productores que lo cultivan en una superficie de 2.677 hectáreas que se concentran en los departamentos de Canelones, Montevideo, San José y Colonia. El principal destino de la producción es el consumo (93 %) y el principal sitio de comercialización es el mercado interno (94 %).[23]

La Figura 1 describe la evolución de las cantidades de manzana producidas, importadas y exportadas para el caso de Uruguay entre 2012 y 2022. Los datos muestran que el volumen de producción de esta fruta ha sido ampliamente superior al de la importación y exportación durante todo el periodo. Las cantidades exportadas e importadas fueron similares para los años considerados. En el año 2016 se observó una caída en las exportaciones y un crecimiento en las importaciones hasta su pico máximo de 7000 toneladas, el cual volvió a reportarse en 2022 (Figura 1).

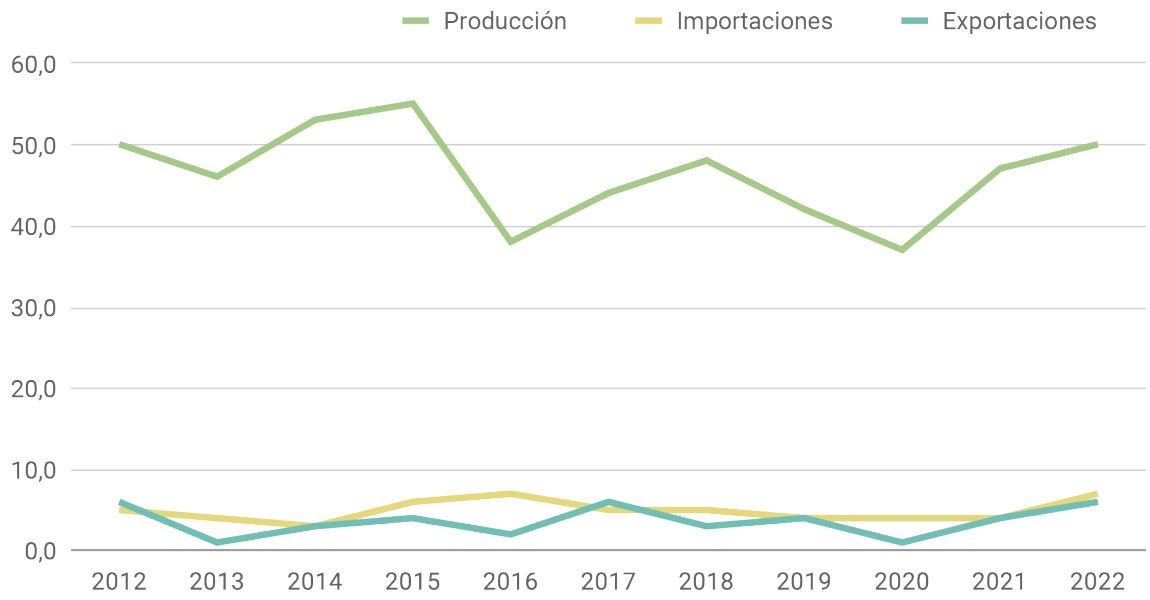


Figura 1. Producción, importación y exportación de manzana (miles de toneladas) en Uruguay entre 2012 y 2022 en base a datos de FAOSTAT.[24]

La Figura 2 muestra la tasa de autosuficiencia alimentaria* de la producción de la manzana para el período 2012-2022 en Uruguay. Tal como se observa, el comportamiento de este indicador osciló año a año entre: i) valores iguales o mayores a 100, que indican que la producción fue suficiente para cubrir las necesidades del país o excedente, ii) valores menores a 100, que reflejan que la producción no fue suficiente para cubrir las necesidades del país. Los años 2015 y 2016 fueron los únicos en que se observó que la producción no alcanzó a cubrir las necesidades del país de forma consecutiva (Figura 2).

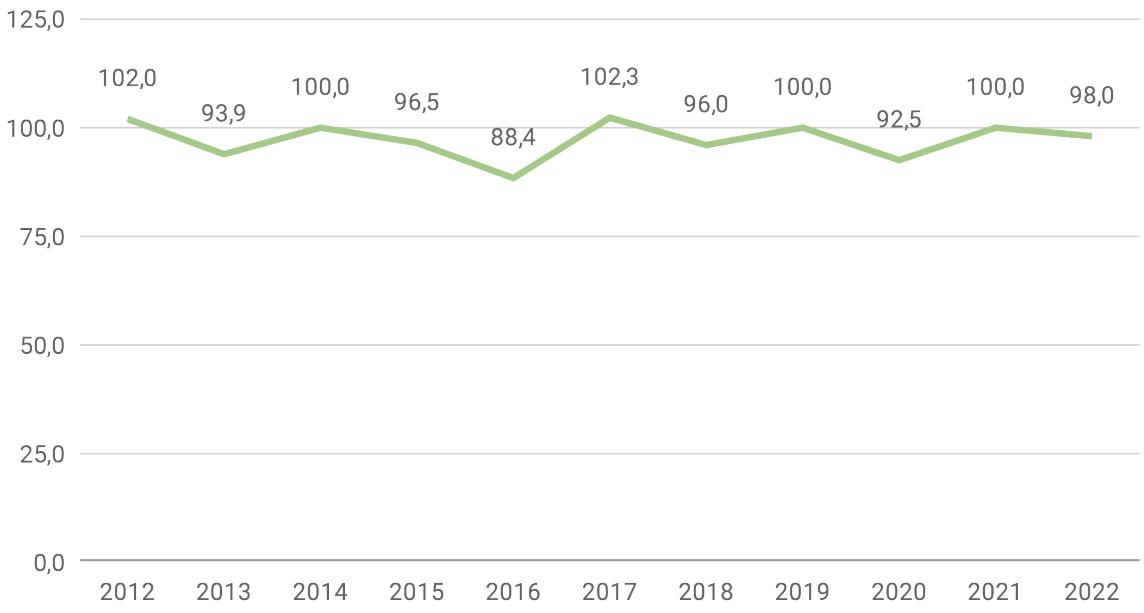


Figura 2. Tasa de autosuficiencia alimentaria de la producción de manzana en Uruguay entre 2012 y 2022 en base a datos de FAOSTAT.[24]

* Calculada como:
(Cantidad producida / (Cantidad producida + Cantidad Importada - Cantidad exportada)) x 100

La Figura 3 ilustra la evolución de la oferta mensual de la manzana en la Unidad Agroalimentaria Metropolitana de Montevideo (UAM) para el período 2018-2023.[25] Tal como se observa, la oferta de la manzana en el mercado mayorista es relativamente estable en los distintos meses, lo cual indica, en conjunto con la información ya presentada, que la disponibilidad de este alimento es alta para la población del país y constante a lo largo del año (Figura 3).

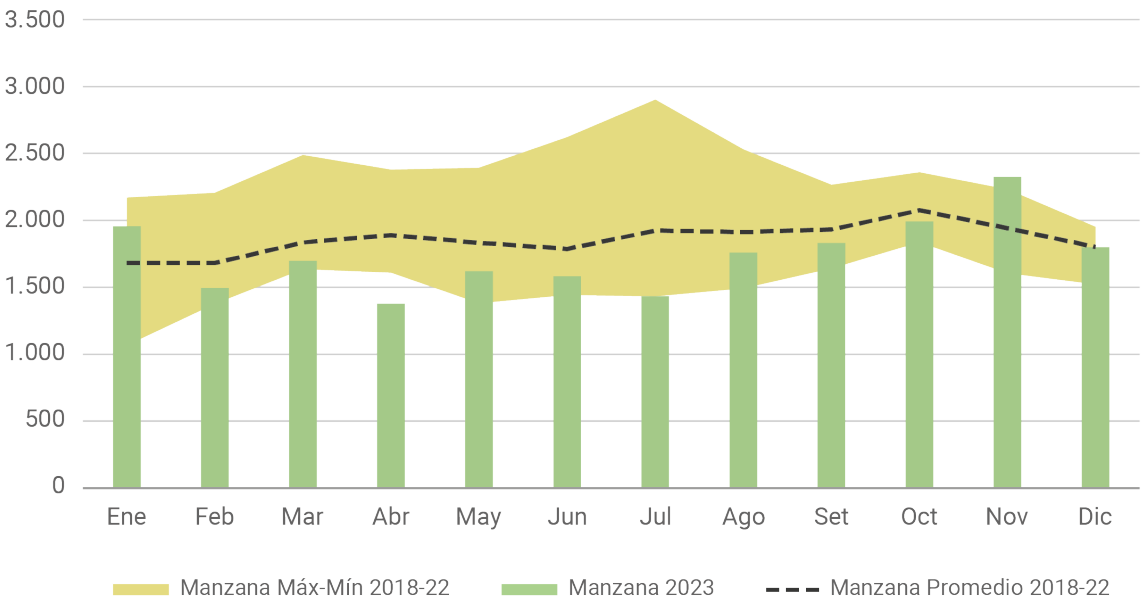


Figura 3. Oferta de la manzana (toneladas) en el Mercado de Frutas y Hortalizas de la Unidad Agroalimentaria Metropolitana (UAM) de Montevideo para el período 2018-2023.[25]

La evolución del índice del precio del consumo de la manzana promedio nacional entre diciembre de 2013 y setiembre 2024 se muestra en la Figura 4. Tal como se aprecia, el precio de la manzana presenta un crecimiento mensual estacional principalmente en los meses de diciembre, enero y agosto, así como descensos en los meses de febrero, marzo y abril (Figura 4).

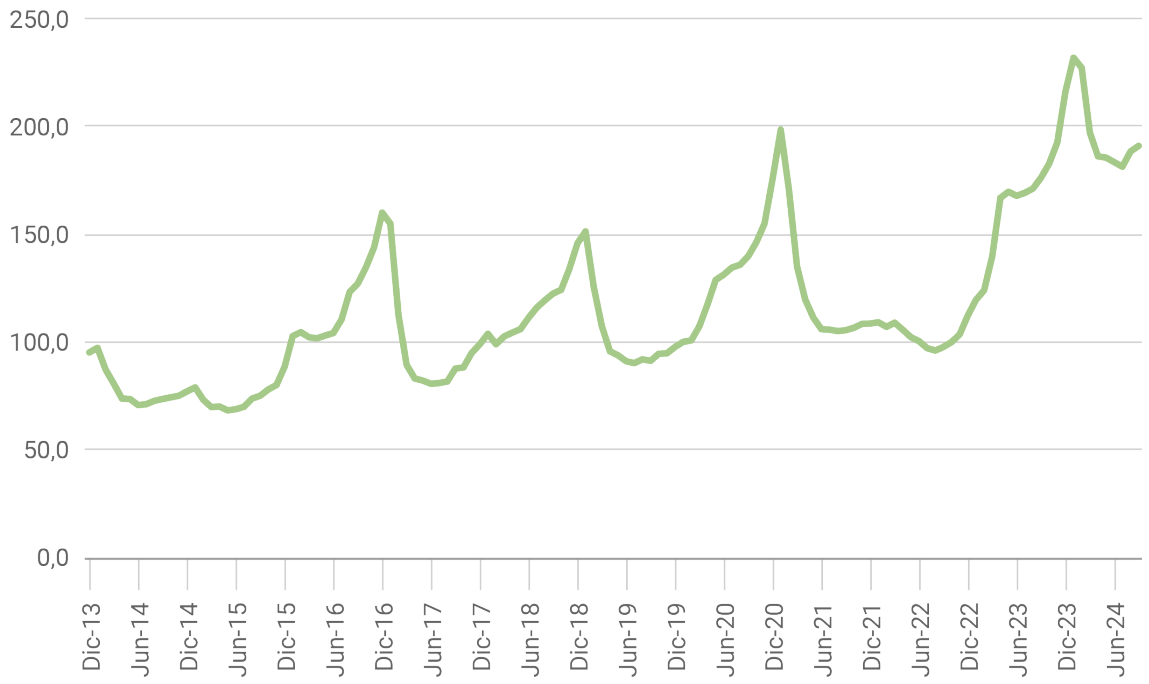


Figura 4. Índice de Precios del Consumo nominal de la manzana para el periodo diciembre 2013-setiembre 2024 (base octubre 2022=100).[26]

3.
Metodología

3. Metodología

El estudio adoptó un enfoque de estudio de caso, el cual permite analizar en profundidad un fenómeno, proporcionando una comprensión detallada y contextualizada que sería difícil de lograr con enfoques más generalizados, siendo particularmente útiles cuando se estudia fenómenos complejos, permitiendo generar aprendizajes aplicables a contextos similares.[27] En las siguientes secciones se presenta la metodología utilizada. El proyecto contó con el aval del Comité de ética de la Escuela de Nutrición de la Universidad de la República.

3.1. Unidades productivas relevadas

El estudio de caso se basó en una muestra por conveniencia de unidades productivas. Se estudiaron cuatro unidades ubicadas en los departamentos de Montevideo, Canelones y San José. Dos de ellas contaban con una superficie aproximada de 7,5 hectáreas (consideradas pequeñas), mientras que las otras se ubicaban en terrenos de entre 15 y 25 hectáreas (consideradas medianas). A pesar de varios intentos, no fue posible incorporar unidades productivas de gran tamaño al estudio de caso. Si bien se realizó una encuesta con una persona vinculada a una de estas unidades, la persona optó por no compartir información detallada sobre la estructura de costos e impacto ambiental y decidió retirarse del estudio luego de finalizada la entrevista.

En la Tabla 2 se presentan algunas características de las unidades productivas incluidas en el estudio. Las unidades difirieron en cuanto a las etapas de la cadena de valor en las que participaban. Las unidades 1 y 2 se dedicaban exclusivamente a la producción y venta, tercerizando el resto de las actividades. La unidad 1 vendía exclusivamente a intermediarios en la UAM, mientras que la unidad 2 además comercializaba en algunos puntos de venta minoristas. Por su parte, la unidad 4 incorporaba además el almacenamiento en cámara y el transporte, y la unidad 3 se encargaba tanto del almacenamiento en cámara como del transporte y la venta, tanto en la UAM como en comercios minoristas.

Las cuatro unidades productivas también cultivaban otros rubros además de manzana. El porcentaje de la superficie productiva destinado al cultivo de manzana varió entre 15,3 % y 81,0 %. Todas las unidades producían diversas variedades de manzana, siendo Red y Pink Lady las más relevantes. En cuanto al rendimiento reportado, una vez descontadas las pérdidas, este se ubicó entre 15,3 y 26,5 toneladas por hectárea, con una media de 20,9 t/ha para la zafra 2024.

Tabla 2. Caracterización de las unidades productivas de manzana incluidas en el estudio de caso.

Característica	**Unidad productiva**			
	1	**2**	**3**	**4**
Tamaño	Pequeña	Mediana	Pequeña	Mediana
Actividades desarrolladas	Producción Venta a intermediarios en UAM	Producción Venta a intermediarios en UAM Venta a minoristas	Producción Almacenamiento Transporte Venta en UAM Venta a minoristas	Producción Almacenamiento Transporte Venta a intermediarios
Porcentaje de la superficie productiva dedicada a manzana (%)	48,4	79,7	15,3	81,0
Rendimiento (ton/há)	26,5	19,8	22,1	15,3

3.2. Encuestas

Se realizaron encuestas a actores vinculados a la producción y otras etapas de la cadena de la manzana para obtener información sobre la estructura de costos y el impacto ambiental. Las pautas de la encuesta se presentan en el Anexo 1.

Se relevó información cuantificable y exhaustiva sobre cada una de las actividades, bienes y servicios que representan costos directos e indirectos y/o que generan impacto ambiental en las etapas de producción, transporte,

almacenamiento y comercialización de la manzana. Las preguntas fueron estandarizadas y contaron con sus respectivas unidades (p.ej., rendimiento de la producción por hectárea, valor hora de mano de obra contratada para la producción, litros por hectárea utilizados de fertilizante). Se aplicaron preguntas de filtro para descartar el relevamiento de información no pertinente de acuerdo con las características de la actividad de cada actor. Para cada tipo de actor se incluyeron preguntas de caracterización (p.ej., tipo de actividad, escala). Las encuestas estuvieron a cargo de tres integrantes del equipo con experiencia en la aplicación de esta técnica y familiaridad con la temática. Las encuestas fueron realizadas de forma presencial entre marzo y mayo de 2025. Fueron grabadas luego de la firma del consentimiento informado por parte de las personas participantes.

3.3. Relevamiento de estructura de costos de unidades productivas

Se realizó un relevamiento de la estructura de costos de cuatro unidades productivas a partir de la información recopilada en las encuestas. El relevamiento y análisis se organizó en las siguientes etapas:

i. Identificación de actividades
Se identificaron las actividades realizadas durante las etapas desde la producción hasta la puerta del comerciante mayorista o minorista de la manzana que consumen recursos y agregan valor.

ii. Definición y cuantificación de insumos
A partir de las respuestas de las personas entrevistadas se identificaron y cuantificaron los recursos necesarios en cada una de las etapas: (i) producción (incluyendo cosecha), (ii) almacenamiento, empaque y transporte, como ser mano de obra, agua, plaguicidas, fertilizantes, herbicidas, fungicidas, riego, combustible, electricidad, infraestructura, entre otros. Se determinó la unidad de medida y la cantidad utilizada de cada insumo identificado.

iii. Valoración de costos
Cada insumo cuantificado se valoró en términos monetarios utilizando el precio declarado por las personas entrevistadas o la información relevada mediante consultas con los proveedores del insumo correspondiente. El costo se calculó multiplicando el precio unitario por las cantidades empleadas en el proceso.

Se consideraron costos directos e indirectos. Los costos directos son aquellos que se pueden atribuir a la producción de la manzana, por ejemplo, los fertilizantes o la mano de obra utilizados durante la producción. Para estimarlos, se realizó una sumatoria de los costos monetarios asignados a los insumos directamente relacionados con las actividades desarrolladas. En este paso, se consideró el volumen neto producido, es decir el volumen total producido menos las pérdidas ocurridas durante la producción, transporte y almacenamiento. Los costos indirectos son aquellos que no pueden asignarse de manera directa a la producción de la manzana. Incluyen la depreciación de la maquinaria y los gastos de mantenimiento, entre otros. Se calcularon los costos indirectos asociados al proceso, como depreciación de infraestructura y maquinaria, mantenimiento, pruebas de laboratorio y transporte. Estos costos se valoraron según el volumen producido, tomando en cuenta las mermas registradas. Los resultados se presentan en unidades monetarias por unidad de medida, hectáreas y kilogramos.

3.4. Estimación del impacto ambiental

Se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según las normas de la serie ISO 14040 y complementarias para evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de manzanas en las cuatro unidades productivas.[15,28–31] El estudio se desarrolló siguiendo un enfoque de «cuna a puerta», abarcando desde la producción de insumos agrícolas hasta la puerta del comprador mayorista o minorista. Se consideró el impacto de la producción y emisiones de la aplicación de fertilizantes y fitosanitarios, el transporte de estos insumos desde el lugar de origen, el consumo de combustible en labores agrícolas, el uso de agua para riego, el almacenamiento y transporte de fruta dentro del país hacia los principales compradores minoristas y mayoristas de cada unidad productiva.

La comparación entre las cuatro unidades se realizó sobre la base funcional de un kilogramo de manzanas listo para la venta, permitiendo una evaluación comparativa estandarizada. Los datos fueron recolectados a partir de registros primarios, bases de datos de ACV y factores de emisión provenientes de literatura científica y fuentes oficiales.

3.4.1. Modelización de los procesos productivos

Producción de insumos fertilizantes y fitosanitarios

Para la modelización del impacto ambiental asociado a la producción de insumos agrícolas, se consideraron tanto los fertilizantes como los productos fitosanitarios utilizados en cada una de las unidades productivas evaluadas. En el caso de los fertilizantes, se identificaron los porcentajes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) presentes en cada formulación, mientras que para los productos fitosanitarios se tomó como referencia el principio activo declarado. La búsqueda y selección de inventarios de referencia se realizó en la base de datos Ecoinvent 3.10.[32,33] En primer lugar, se verificó la disponibilidad del principio activo específico. Si éste no se encontraba disponible, se buscó el grupo químico al que pertenece. En los casos en que tampoco estaba disponible el grupo químico correspondiente, se procedió a utilizar una modelización basada en el pesticida genérico disponible en la base de datos, siguiendo criterios de similitud funcional. Algunos productos no pudieron ser modelizados, ya sea por tratarse de hormonas de síntesis u otros compuestos para los cuales no existe un inventario adecuado en Ecoinvent 3.10 ni posibilidad de analogía funcional válida. De esta manera, los insumos quedaron modelizados de la siguiente forma:

Producción de fertilizantes
En la unidad productiva 1, se modelizaron por principio activo el nitrato de calcio (Ca) y el sulfato de cobre (Cu), y como NPK el abono de pollo combinado con cáscara de arroz. En la unidad productiva 2, se modelizó por principio activo el nitrato de potasio, y el resto de los fertilizantes como NPK. En la unidad productiva 3, se modelizó exclusivamente como NPK el abono de pollo y cáscara de arroz. En la unidad productiva 4, se modelizó por principio activo la urea, y como NPK los productos Tioplus, Promet Calcio, TB Has Hidro y Coron Ultra. No fue posible modelar los productos Algaren, Boramide, Cal 40 y MaxiZinc.

Producción de fitosanitarios
En la modelización de la producción de pesticidas para las distintas unidades productivas, se priorizó utilizar datos según el principio activo. Cuando esta información no estaba disponible, se recurrió a la modelización por grupo químico, y en último término, se utilizó un pesticida genérico equivalente. En la unidad productiva 1, se modelizaron por principio activo Mancozate y Gea Glifosato 48 SL; por grupo químico, MCPA 75 LSA, Argenfrut

Supreme y Decis Forte 10 EC; y como pesticida genérico, Acetamiprid 20 SP, Repidex 240 SC y Rhino 75 WDG. En la unidad productiva 2, se modelizaron por principio activo Captan 80 Agroregional, Cuproxido 75 PM y Mancozate; por grupo químico, Luna Tranquility SC 500, Mythos, Ziram Granuflo, Agrifos Supa 400, Imidan 70, Argenfrut Supreme, Decis Forte 10 EC, Piriprox Agro y Silwet L AG; y como pesticida genérico, Flint 50 WG, Lannark 250 EC, Priaxor, Acetamiprid 20 SP, Alanto 480 SC, Blindar 200 SC, Masterole y Ana. En la unidad productiva 3, se modelizaron por principio activo Gea Glifosato 48 SL y Mancozate; por grupo químico, Paraquat 276 Tampa, Luna Tranquility SC 500, Mythos, Folio Gold 440 SC, Decis Forte 10 EC y Piriprox Agro; y como pesticida genérico, Dodin Flo . En la unidad productiva 4, se modelizó por principio activo Captan 80 Agroregional, Cobre, Gea Glifosato 48 SL y Mancozate; por grupo químico, Bonnus, Ziram Granuflo, Ultravin 4 L, Rimon 10 EC, Agrifos Supa 400, Argenfrut Supreme, Decis Forte 10 EC, Destroyer, Piriprox Agro y Silwet; y como pesticida genérico, Dodin Flo, Priaxor, Ana, Bospyr, Score 250 EC, Shaolin, Tribot 50 SC, Acetamiprid 20 SP, Alanto, Metoxifenocida, Osado, Selenium, Splendor y Difenoconazol.

Producción de otros compuestos

En cuanto a la modelización de la producción de otros insumos no fertilizantes ni pesticidas, no fue posible modelizar algunos productos debido a la falta de datos específicos en bases como Ecoinvent 3.10.[32,33] En la unidad productiva 1, no se pudieron modelizar Checkmate OFM-F (feromona) ni Dormex (regulador de crecimiento). En la unidad productiva 2, no se pudieron modelizar Cal 40 (acondicionador de suelo), Amadene y Madex Twinn (insecticidas biológicos). En la unidad productiva 3, tampoco fue posible modelizar Checkmate OFM-F (feromona). Finalmente, en la unidad productiva 4, no se pudieron modelizar los fitorreguladores Dormex, Maxcel y Retain, ni el producto Invelop (minerales).

Emisiones de la aplicación de fertilizantes y fitosanitarios

Emisión de la aplicación de fertilizantes

Las emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes se estimaron utilizando factores de emisión reconocidos internacionalmente, ajustados a la cantidad de fertilizante aplicado, la superficie cultivada y los contenidos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) presentes en cada formulación. Para las emisiones de amoníaco (NH_3), se emplearon los factores propuestos por European Environment Agency (EEA).[34] En el caso de las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2), óxido nitroso (N_2O) y lixiviados de nitrato (NO_3^-),

se utilizaron los factores de emisión establecidos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).[35] Para la estimación de estas emisiones, se diferenciaron los factores aplicados según el tipo de fertilizante: en el caso de los fertilizantes orgánicos (como el abono de pollo con cáscara de arroz), se emplearon los factores específicos para insumos orgánicos, mientras que para los fertilizantes sintéticos, se utilizaron los factores correspondientes a productos nitrogenados de origen industrial. Para las pérdidas de fósforo en forma de fosfato (PO_4^{3-}), se consideraron los valores indicados por el modelo suizo SALCA-P.[36] Finalmente, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) asociadas a la descomposición y transformación de los fertilizantes fueron calculadas conforme a los valores de referencia de la IPCC. Este enfoque permitió estimar de forma detallada las emisiones directas al suelo y al aire originadas por la aplicación de insumos fertilizantes en cada uno de los sistemas analizados.

En la modelización de emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes, se distinguió entre productos de origen sintético y orgánico según su naturaleza y disponibilidad de datos. En la unidad productiva 1, se modelizaron emisiones de fertilizantes sintéticos, específicamente nitrato de calcio (Ca) y sulfato de cobre (Cu), y de origen orgánico, a partir de abono de pollo combinado con cáscara de arroz. En la unidad productiva 2, todos los fertilizantes utilizados fueron sintéticos, por lo que las emisiones modelizadas corresponden únicamente a esta categoría. En la unidad productiva 3, las emisiones se modelizaron exclusivamente en base al fertilizante orgánico aplicado: abono de pollo con cáscara de arroz. Por último, en la unidad productiva 4, se modelizaron emisiones para los fertilizantes sintéticos, incluyendo urea.

Emisión de la aplicación de fitosanitarios

Las emisiones directas al medio ambiente derivadas de la aplicación de pesticidas se estimaron utilizando el modelo PestLCI Consensus v1.0,[34] el cual calcula la distribución primaria del pesticida aplicado entre distintos compartimentos ambientales —aire, suelo, agua— considerando factores obtenidos en estudios citrícolas previos realizados en el país. En la modelización de los impactos asociados al uso de pesticidas, se priorizó utilizar factores de caracterización de USEtox según principio activo, por tratarse de un modelo científico que se utiliza para evaluar impactos toxicológicos. En los casos en que esto no fue posible, se recurrió a la modelización por grupo químico, y cuando no se encontraron factores disponibles, las emisiones no pudieron ser modelizadas. En la unidad productiva 1, se modeli-

zaron emisiones por principio activo para Gea Glifosato 48 SL y Mancozate, y por grupo químico para Decis Forte 10 EC y MCPA 75 LSA. En la unidad productiva 2, se modelizaron por principio activo Captan 80 Agroregional, Lannark 250 EC, Mancozate, Imidan 70, Luna Tranquility SC 500, Mythos, Piriprox Agro y Ziram Granuflo, y por grupo químico Decis Forte 10 EC y Cuproxido 75 PM. En la unidad productiva 3, se modelizaron por principio activo Gea Glifosato 48 SL, Mancozate, Paraquat 276 Tampa, Luna Tranquility SC 500, Mythos y Piriprox Agro, y por grupo químico Folio Gold 440 SC y Decis Forte 10 EC. En la unidad productiva 4, se modelizaron por principio activo Ultravin 4 L, Gea Glifosato 48 SL, Mancozate, Captan 80 Agroregional, Score 250 EC, Difenoconazol, Bonnus, Destroyer, Piriprox Agro y Ziram Granuflo, y por grupo químico Decis Forte 10 EC y Cobre. En todas las unidades productivas, algunos pesticidas no mencionados no pudieron ser modelizados por falta de factores de caracterización en USEtox.

Transporte de productos

En el caso del transporte de insumos agrícolas, se consideró el origen geográfico específico de cada uno de los productos utilizados, tanto fertilizantes como fitosanitarios. Este análisis incluyó también a aquellos insumos cuya producción no pudo ser modelizada, ya que igualmente implican un impacto ambiental asociado a su transporte. Para ello, se recurrió a las distancias publicadas en SeaRates,[37] identificando si el trayecto se realiza por camión, barco o una combinación de ambos medios.

Además, se incorporó la distancia interna desde el puerto de Montevideo hasta la ubicación de cada predio agrícola, sumándola a la distancia correspondiente al transporte terrestre en el país de origen. De este modo, se pudo estimar el impacto del transporte asociado a cada insumo, integrando toda la cadena logística desde su punto de partida hasta el sitio de aplicación en cada una de las unidades productivas analizadas.

Agua y combustible

En cuanto al uso de combustible en labores agrícolas, se consideraron los impactos asociados tanto a la producción como a la combustión del diésel utilizado por los tractores en las distintas tareas de campo. Esta aproximación permite captar de forma más completa los efectos ambientales derivados del uso de energía fósil, incluyendo tanto las emisiones directas como las asociadas a su producción.

Respecto al consumo de agua para riego, se abordó desde dos perspectivas complementarias. Por un lado, se contabilizó el consumo energético vinculado al funcionamiento de la bomba de extracción, calculado a partir del volumen total de agua bombeada por cultivo y las características operativas del sistema de riego. Por otro lado, se evaluó el impacto directo del consumo de agua en términos de escasez hídrica, siguiendo la definición de «consumo de agua» establecida por la norma ISO 14046, que establece que: *«El término "consumo de agua" a menudo, se utiliza para describir el agua extraída de la cuenca hidrográfica pero no retornada a la misma cuenca hidrográfica. El consumo de agua puede ser debido a la evaporación, a la transpiración, a la integración en un producto o por liberación en una cuenca hidrográfica diferente o en el mar»*.[38] Esta distinción permite diferenciar entre el uso total del recurso y su impacto neto sobre la disponibilidad local de agua, de acuerdo con el enfoque propuesto por metodologías de huella hídrica y análisis de ciclo de vida. En ese sentido, dado que una parte significativa del agua de riego suele retornar a la misma cuenca hidrográfica —por infiltración o escorrentía—, no se considera automáticamente como agua consumida. Para estimar el consumo neto real, se aplicó un enfoque basado en balances hídricos que tienen en cuenta la textura del suelo, y las características fisiológicas del cultivo. Estos balances permiten determinar cuánta del agua aportada permanece efectivamente en el sistema.

A partir de este valor ajustado de agua efectivamente consumida, se multiplicó por los factores de caracterización propuestos en el método AWARE 2.0,[39] específicos para la cuenca hidrográfica correspondiente por medir impactos asociados al uso del agua. Esto permitió expresar el impacto en términos de metros cúbicos de agua equivalente, cuantificando la escasez hídrica generada durante el año productivo.

En las cuatro unidades productivas, los datos relativos al consumo de combustible fueron proporcionados directamente por las personas entrevistadas. En aquellos casos en los que el combustible declarado correspondía al total de la explotación —y no exclusivamente a la producción de manzanas—, se realizó una asignación proporcional en función de las hectáreas totales dedicadas a la manzana. De este modo, se estimó el consumo específico atribuible a la manzana, ponderando su participación relativa en la producción total del predio (expresada en toneladas). Esta metodología permitió ajustar los datos disponibles y obtener una estimación más precisa del impacto energético asociado a las labores agrícolas del cultivo de manzanas. En el caso del consumo eléctrico asociado al bombeo de agua

para riego, en todas las unidades productivas se recibió información en forma de valores monetarios, es decir, el gasto en pesos uruguayos correspondiente al uso de energía eléctrica. Dado que no se disponía del consumo en unidades físicas, se procedió a convertir estos valores económicos en kilowatt hora (kWh) utilizando el precio unitario de la electricidad vigente durante el período analizado.

Almacenamiento

En cuanto al almacenamiento en frío, únicamente en las unidades productivas 3 y 4 se dispuso de información directa sobre el costo en pesos uruguayos de la energía eléctrica utilizada en las cámaras frigoríficas. A partir de este valor, se realizó una conversión directa a kilowatt hora (kWh) utilizando el precio unitario de la electricidad vigente, igual que en el caso del bombeo del agua de riego, lo que permitió cuantificar con precisión el consumo energético asociado al almacenamiento de la fruta. En las otras dos unidades productivas, donde no se contaba con datos específicos sobre el consumo eléctrico en cámaras frigoríficas, fue necesario realizar estimaciones basadas en supuestos razonables y datos complementarios proporcionados por los productores. Por ejemplo, se asumió que la cámara permanecía en uso durante 10 meses, con una reducción progresiva del volumen ocupado del 10 % por mes. Se tuvieron en cuenta las dimensiones físicas de las cámaras frigoríficas, tanto aquellas situadas dentro del predio como las utilizadas de forma tercerizada, para lo cual se solicitaron datos específicos a los responsables de la explotación. En los casos en que las cámaras no se encontraban en el mismo predio, se consideró además el transporte ida y vuelta desde la unidad productiva hasta la cámara frigorífica, incorporando así el impacto adicional vinculado al traslado para su conservación. Además, se consideró que la fruta se almacena habitualmente en bins de 380 kg, cuyas dimensiones también fueron incluidas en el cálculo del volumen efectivo ocupado. Finalmente, se adoptó como consumo energético de referencia el valor de 0,59 kWh por metro cúbico por día, correspondiente al almacenamiento refrigerado a 5 °C, según lo establecido en las Declaraciones Ambientales de Producto.[40] Este enfoque permitió obtener una estimación coherente del impacto energético asociado al almacenamiento en frío, aún en ausencia de mediciones directas de consumo. Adicionalmente, para los cuatro casos de estudio se contemplaron las pérdidas postcosecha durante el almacenamiento, estimadas entre el 2 % y el 5 % del volumen total, dependiendo del caso de estudio.

Transporte y distribución

Finalmente, para las cuatro unidades productivas se consideró el transporte de la fruta ya envasada hacia los compradores mayoristas y minoristas identificados. El cálculo del impacto en función de la cantidad de viajes realizados, la capacidad de carga de los camiones y la distancia entre el predio y el destino permitió incorporar los efectos ambientales asociados a la distribución interna de la fruta una vez completado el envasado, ajustando los recorridos y frecuencias según las características logísticas reales de cada explotación.

3.4.2. Modelización de los impactos ambientales

Para la evaluación de impactos se utilizó la lista de indicadores ambientales recomendada para frutas,[40,41] siguiendo principalmente la norma europea UNE-EN 15804 + A2.[42] Se consideraron los siguientes indicadores: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; PE: Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].

Puntualmente para la categoría de cambio climático, en la etapa de producción de electricidad, se utilizó el factor de emisión nacional reportado anualmente en el Balance Energético Nacional, publicado por la Dirección Nacional de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Minería.[43] Esta elección se debió a la disponibilidad de un factor de emisión específico a nivel nacional para esta categoría de impacto, lo cual permite una mayor representatividad del contexto energético del país y mejora la precisión en el cálculo de este impacto. La toxicidad en agua dulce y en humanos se evaluó con USEtox 2.13,[44] mientras que la escasez de agua azul se estimó con AWARE 2.0,[39] usando factores de caracterización mensuales específicos para las cuencas correspondientes.

4.
Resultados

4. Resultados

4.1. Estructura de costos

En la Tabla 3 se presentan los costos estimados para las cuatro unidades. El costo por hectárea para la zafra 2024 mostró una variabilidad considerable entre las unidades productivas, con valores en pesos uruguayos que oscilaron entre $358.515 y $886.355 por hectárea (8.643 y 21.368 dólares americanos (USD), respectivamente), sin considerar las amortizaciones, y una media de $644.516 (USD 15.537). Al incluir las amortizaciones, los costos se ubicaron entre $417.060 y $934.670 por hectárea (USD 10.054 y 22.533, respectivamente), con un valor promedio de $705.563 (USD 17.009).

Asimismo, se observaron diferencias significativas en el costo por kilogramo de manzana entre las unidades (Tabla 3). Considerando las amortizaciones, el costo por kilogramo se situó entre $27,2 y $36,2 (USD 0,66 y 0,87, respectivamente), con una media de $33,1 (USD 0,80). En tanto, sin incluir amortizaciones, el costo medio fue de $30,2 por kilogramo (USD 0,73).

Tabla 3. Costos de producción, almacenamiento y transporte hasta la puerta del comprador mayorista o minorista para las unidades productivas relevadas y promedios para las cuatro unidades, para el periodo de zafra 2024. Los valores se presentan en pesos uruguayos y dólares americanos (entre paréntesis).

Costo ($)	Unidad productiva				Promedio de las unidades
	1	2	3	4	
Costo por há (sin amortizaciones)	886.355 (21.368)	662.229 (15.965)	670.964 (16.175)	358.515 (8.643)	644.516 (15.537)
Costo por há (con amortizaciones)	934.670 (22.533)	718.663 (17.325)	739.858 (17.836)	417.060 (10.054)	705.563 (17.009)
Costo por kg (sin amortizaciones)	33,5 (0,81)	33,4 (0,81)	30,4 (0,73)	23,4 (0,56)	30,2 (0,73)
Costo por kg (con amortizaciones)	35,3 (0,885)	36,2 (0,87)	33,6 (0,81)	27,2 (0,66)	33,1 (0,80)

Nota: Se consideró la cotización promedio del dólar venta para el año 2024: 1 dólar americano = 41,48 pesos uruguayos.

En la Tabla 4 se presenta la estructura porcentual de costos para las cuatro unidades productivas relevadas, correspondiente al proceso productivo. La Figura 5 muestra la estructura de costos en forma gráfica. Se observaron diferencias considerables en la participación relativa de cada concepto dentro de la estructura de costos entre las distintas unidades, lo que sugiere una variabilidad asociada a las características propias de cada unidad productiva, tales como la escala de producción, el modelo de gestión y las prácticas agronómicas empleadas.

Sin embargo, es posible identificar algunas tendencias generales en la estructura de costos. La mano de obra fue consistentemente el rubro de mayor peso, representando entre el 32,8 % y el 61,4 % del costo total, con un promedio del 48,4 %. Este resultado pone de manifiesto la alta intensidad de trabajo que caracteriza a la producción de manzana, especialmente en unidades pequeñas y medianas, que dependen en gran medida del trabajo manual para tareas como la poda, el raleo y la cosecha.

Tabla 4. Contribución porcentual de cada concepto al costo de la manzana hasta la puerta del comprador mayorista o minorista para las unidades productivas hasta la puerta del comprador mayorista o minorista, para el periodo de zafra 2024.

Concepto	Unidad productiva				Promedio de las unidades
	1	2	3	4	
Insumos intermedios					
Fertilizantes y fitosanitarios	8,1	13,6	6,4	14,1	10,6
Almacenamiento en cámara tercerizado	21,8	7,1	0,0	0,0	7,2
Combustibles	1,1	2,0	9,7	10,2	5,8
Otros materiales e insumos	3,4	3,8	7,9	5,2	5,1
Energía eléctrica	0,6	3,7	4,5	6,2	3,7
Mantenimiento de equipos y maquinaria	1,5	7,0	0,4	4,1	3,2
Honorarios profesionales y asesoramiento técnico	0,0	2,0	0,0	4,6	1,7
Transporte tercerizado	4,0	2,0	0,0	0,0	1,5
Otros gastos	0,0	3,6	0,0	0,0	0,9
Seguros	0,3	1,2	0,0	1,5	0,8
Remuneración de los factores					
Salarios (*)	53,4	46,1	61,4	32,8	48,4
Contribución y patente	0,2	0,0	0,2	6,1	1,6
Intereses	0,5	0,0	0,0	1,1	0,4
Amortizaciones					
Montes	3,6	4,6	4,5	8,0	5,2
Maquinaria	1,6	3,2	4,8	6,1	3,9

Nota: (*) En las unidades productivas 1 y 3 se realizó una imputación de los salarios correspondientes a las personas encargadas de la dirección y gestión, ya que no fueron contabilizadas como parte de los costos por parte de los informantes.

El segundo componente más relevante fueron los fertilizantes y fitosanitarios, con una participación promedio del 10,6 %. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Millán et al. en su análisis de la estructura de costos en sistemas productivos hortofrutícolas del país,[9] en el que se indica que la mano de obra representa aproximadamente el 44 % del costo total, y que los fertilizantes y fitosanitarios, en conjunto, alcanzan alrededor del 15 %.

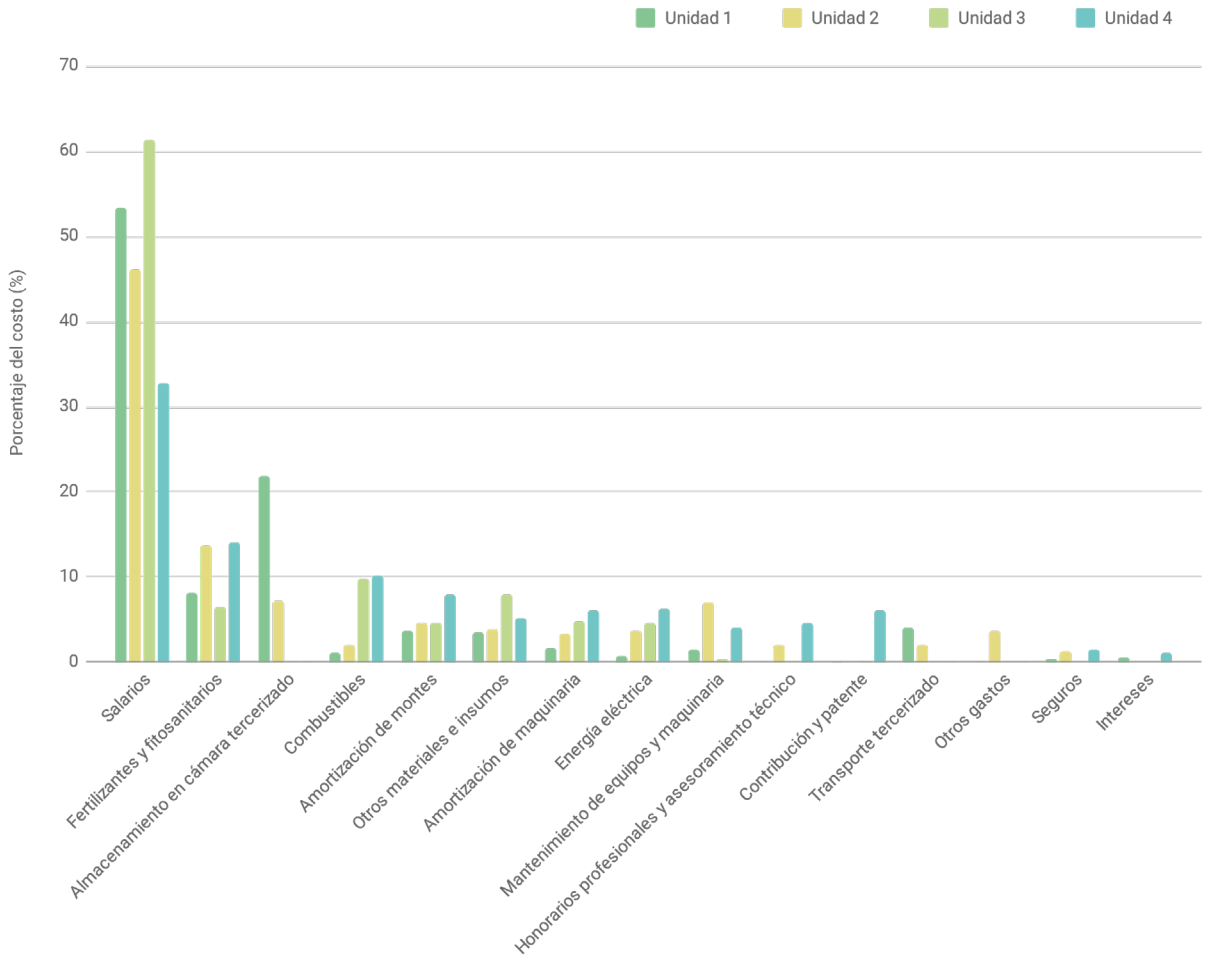


Figura 5. Representación gráfica de la contribución porcentual de cada concepto al costo de la manzana hasta la puerta del comprador mayorista o minorista para las unidades productivas relevadas y promedio para las cuatro unidades, para el periodo de zafra 2024.

El almacenamiento en cámara frigorífica y el transporte representaron una proporción considerable de los costos totales. En las unidades 1 y 2, estos costos se manifestaron principalmente a través de la contratación tercerizada de dichos servicios (Tabla 4). En contraste, en las unidades 3 y 4, que realizaban estas actividades de forma directa, el impacto se reflejó en una mayor participación del consumo de combustible y energía eléctrica dentro de la estructura de costos, insumos directamente vinculados al funcionamiento de las cámaras de frío y los vehículos de transporte.

En cuanto a las amortizaciones, la depreciación de los montes frutales y de la maquinaria representó, en promedio, un 9,1 % de los costos totales. En tres de las cuatro unidades productivas analizadas, la amortización de los montes frutales tuvo una incidencia levemente superior a la de la maquinaria, mientras que en la unidad restante ambas contribuciones fueron similares.

4.2. Márgenes de ganancia durante la comercialización

Un aspecto de relevancia que emergió durante el estudio tuvo relación con los márgenes de ganancia durante la comercialización de la manzana. Las entrevistas realizadas con actores vinculados a la producción y comercialización permitieron identificar que los precios de venta de la manzana por parte de intermediarios y comercios minoristas se determinan principalmente en función de márgenes de ganancia predefinidos y de las dinámicas de oferta y demanda del mercado. En el caso específico de los intermediarios que operan en la UAM, el precio de venta se define, en general, por la relación entre oferta y demanda, ajustándose de manera dinámica según la disponibilidad del producto en el mercado y las condiciones estacionales. A partir de ese precio, los intermediarios establecen un margen de ganancia, sobre el cual determinan el precio que pagan a las unidades productivas. Según lo relevado, este margen se ubica habitualmente entre un 20 % y un 30 % del precio de venta.

Por su parte, en el caso de los puntos de venta minoristas, el precio de venta también se determina aplicando un margen de ganancia sobre el precio de compra. En pequeños comercios y almacenes, dicho margen suele oscilar entre un 20 % y un 30 %. Sin embargo, en el caso de los supermercados, los márgenes pueden ser considerablemente mayores, llegando en algunos casos hasta un 90 % del precio de venta al público.

Además, según las personas entrevistadas, los supermercados tienden a trasladar parte de los costos logísticos a las unidades productivas, lo que se traduce en descuentos adicionales del orden del 10 % al 20 % sobre el precio de compra pactado. En este sentido, reportaron que estas condiciones comerciales influyen en la rentabilidad de las unidades productivas, que deben absorber buena parte de los costos y presentan una capacidad limitada de incidir en el precio final de venta al consumidor.

4.3. Impacto ambiental de la manzana

En la Tabla 5 se presentan los indicadores de impacto ambiental de cada unidad productiva, expresados por kilogramo de fruta, mientras que en el Anexo 2 se presentan los datos desagregados para cada etapa del ciclo productivo. Los resultados obtenidos no pueden clasificarse como altos, bajos o medios de forma absoluta, ya que actualmente no existe en el país una línea base o estándar de referencia con el cual compararlos. Sin embargo, los datos son valiosos como punto de partida, ya que permiten establecer una base metodológica sólida para futuras comparaciones. Para que tales comparaciones sean válidas, es fundamental que se mantengan constantes elementos clave como los límites del sistema, las etapas consideradas, la unidad funcional y los factores de caracterización empleados.

El análisis permite identificar los principales puntos críticos de cada unidad productiva, lo que facilita la toma de decisiones orientadas a reducir los impactos ambientales más relevantes. Se definen como puntos críticos aquellas etapas con una participación alta en uno o más indicadores, lo que indica un margen significativo para la mitigación del impacto ambiental. En el análisis se identificaron las etapas que concentran la mayor carga ambiental dentro del sistema productivo, considerando el peso relativo de cada proceso y su contribución a distintas categorías de impacto.

Tabla 5. Indicadores de impacto ambiental de las cuatro unidades productivas, expresados por kilogramo de manzana en la puerta del comprador mayorista o minorista, para el periodo de zafra 2024.

Impacto	Unidad productiva			
	1	2	3	4
Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]	$8{,}91 \cdot 10^{-2}$	$7{,}79 \cdot 10^{-2}$	$3{,}70 \cdot 10^{-1}$	$8{,}91 \cdot 10^{-2}$
Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]	$1{,}32 \cdot 10^{-8}$	$3{,}40 \cdot 10^{-8}$	$3{,}71 \cdot 10^{-8}$	$3{,}06 \cdot 10^{-8}$
Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]	$2{,}87 \cdot 10^{-3}$	$9{,}40 \cdot 10^{-4}$	$8{,}05 \cdot 10^{-3}$	$1{,}07 \cdot 10^{-3}$
Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]	$1{,}45 \cdot 10^{-4}$	$1{,}05 \cdot 10^{-3}$	$8{,}88 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-4}$
Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]	$2{,}73 \cdot 10^{-3}$	$3{,}39 \cdot 10^{-4}$	$1{,}02 \cdot 10^{-2}$	$2{,}58 \cdot 10^{-4}$
Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]	$1{,}23 \cdot 10^{-2}$	$3{,}27 \cdot 10^{-3}$	$3{,}48 \cdot 10^{-2}$	$2{,}62 \cdot 10^{-3}$
Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]	$2{,}29 \cdot 10^{-3}$	$3{,}34 \cdot 10^{-3}$	$5{,}99 \cdot 10^{-3}$	$4{,}07 \cdot 10^{-3}$
Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]	$8{,}08 \cdot 10^{-2}$	$1{,}20 \cdot 10^{-1}$	$1{,}55 \cdot 10^{-1}$	$1{,}60 \cdot 10^{-1}$
Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]	$4{,}47 \cdot 10^{1}$	$6{,}71 \cdot 10^{1}$	$8{,}73 \cdot 10^{1}$	$8{,}92 \cdot 10^{1}$
Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]	$3{,}17 \cdot 10^{2}$	$3{,}83 \cdot 10^{2}$	$9{,}25 \cdot 10^{2}$	$5{,}42 \cdot 10^{2}$
Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]	$2{,}06 \cdot 10^{-4}$	$3{,}05 \cdot 10^{-4}$	$3{,}94 \cdot 10^{-4}$	$4{,}08 \cdot 10^{-4}$
Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]	$5{,}50 \cdot 10^{-5}$	$8{,}15 \cdot 10^{-5}$	$1{,}05 \cdot 10^{-4}$	$1{,}09 \cdot 10^{-4}$
Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]	$1{,}65 \cdot 10^{1}$	$4{,}12 \cdot 10^{-1}$	$5{,}19 \cdot 10^{-1}$	$4{,}13 \cdot 10^{-1}$
Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]	$-9{,}56 \cdot 10^{-3}$	$1{,}33 \cdot 10^{-1}$	$1{,}25 \cdot 10^{-1}$	$1{,}70 \cdot 10^{-1}$
Potencial de reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]	$1{,}53 \cdot 10^{-4}$	$-1{,}48 \cdot 10^{-2}$	$-1{,}40 \cdot 10^{-2}$	$-1{,}93 \cdot 10^{-2}$
Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]	$1{,}41 \cdot 10^{-1}$	$3{,}49 \cdot 10^{-1}$	$4{,}75 \cdot 10^{-1}$	$3{,}78 \cdot 10^{-1}$
Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]	$3{,}45 \cdot 10^{1}$	$1{,}66 \cdot 10^{2}$	$2{,}01 \cdot 10^{2}$	$1{,}90 \cdot 10^{2}$
Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]	$7{,}78 \cdot 10^{-2}$	$7{,}92 \cdot 10^{-1}$	$8{,}94 \cdot 10^{-1}$	$9{,}72 \cdot 10^{-1}$
Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]	$1{,}55 \cdot 10^{-8}$	$9{,}42 \cdot 10^{-8}$	$1{,}07 \cdot 10^{-7}$	$7{,}69 \cdot 10^{-8}$
Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}]	$1{,}65 \cdot 10^{-11}$	$2{,}25 \cdot 10^{-11}$	$2{,}17 \cdot 10^{-11}$	$2{,}89 \cdot 10^{-11}$

Las Tablas 6 a 9 muestran la distribución porcentual de los valores de los indicadores de impacto ambiental según la etapa del sistema productivo y la categoría de impacto, para cada una de las unidades productivas analizadas. Las etapas más relevantes en relación con cada indicador, así como los insumos que los generan, variaron de forma marcada entre unidades productivas, como resultado de diferencias en las prácticas de producción, almacenamiento y distribución.

Los resultados mostraron que las principales fuentes de impacto ambiental fueron el uso de fertilizantes, el consumo de combustible y energía, el riego y el uso del suelo, aunque con diferencias entre unidades productivas.

En la unidad productiva 1, la aplicación de fertilizantes constituyó la etapa con mayor impacto, especialmente en cambio climático, acidificación y eutrofización (Tabla 6), debido al uso de bosta de pollo y cáscara de arroz, que generan importantes emisiones de compuestos nitrogenados. La producción de fertilizantes y fitosanitarios también presentó impactos relevantes, particularmente en ecotoxicidad y agotamiento de ozono. Asimismo, el consumo de agua de riego explicó la totalidad del impacto en escasez hídrica, mientras que el uso de diésel para tareas agrícolas destacó por su contribución a la pérdida indirecta de biodiversidad. El consumo eléctrico en almacenamiento mostró altos impactos en uso de recursos, toxicidad humana y formación de ozono fotoquímico.

En la unidad productiva 2, el principal punto crítico fue el uso de combustible para tareas agrícolas, con elevada contribución a cambio climático, acidificación, eutrofización y pérdida indirecta de biodiversidad, reflejando la fuerte dependencia del gasoil (Tabla 7). La emisión de fertilizantes tuvo especial incidencia en eutrofización de agua dulce, debido al contenido de fósforo y su potencial de lixiviación y escurrimiento. El consumo de agua de riego concentró casi la totalidad del impacto en escasez de agua azul, mientras que el consumo eléctrico en almacenamiento presentó impactos significativos en uso de recursos fósiles y minerales, toxicidad humana y formación de ozono fotoquímico. Además, el uso del suelo explicó gran parte de los impactos vinculados al potencial de erosión, reducción de regeneración de aguas subterráneas y pérdida de carbono orgánico del suelo.

En la unidad productiva 3, la emisión de fertilizantes volvió a ser la etapa más impactante, principalmente en cambio climático, acidificación y eutrofización, debido a la aplicación de abonos orgánicos ricos en nitrógeno y

fósforo (Tabla 8). La producción de insumos agrícolas presentó impactos importantes en ecotoxicidad, mientras que el uso de diésel contribuyó significativamente al agotamiento de ozono y a la pérdida indirecta de biodiversidad. El consumo eléctrico en almacenamiento concentró altos impactos en toxicidad humana, uso de recursos fósiles y minerales, y formación de ozono fotoquímico. El consumo de agua de riego mantuvo una elevada incidencia en la categoría de consumo de agua, y el uso del suelo explicó la mayor parte de los impactos relacionados con erosión, reducción de regeneración de aguas subterráneas y pérdida de carbono orgánico del suelo.

Finalmente, en la unidad productiva 4, la utilización de diésel para tareas agrícolas representó el principal punto crítico ambiental, con alta contribución a agotamiento de ozono, eutrofización, acidificación y pérdida indirecta de biodiversidad (Tabla 9). La producción de insumos agrícolas también mostró impactos relevantes en ecotoxicidad, especialmente asociados a fitosanitarios. El consumo de agua de riego concentró la mayor parte del impacto en escasez hídrica, mientras que el consumo eléctrico en almacenamiento presentó elevados impactos en toxicidad humana, uso de recursos fósiles y minerales, formación de ozono fotoquímico y eutrofización de agua dulce. Por último, el uso del suelo volvió a destacarse como responsable de los impactos en erosión, reducción de regeneración de aguas subterráneas y pérdida de carbono orgánico del suelo.

Tabla 6. Contribución porcentual de etapas del sistema productivo a los indicadores de impacto ambiental (por kilogramo de fruta) para la unidad productiva 1, para el periodo de zafra 2024.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	25	64	10	8	2	3	4	0	1	87	0	0	0	2	28	9	12	27	16	0
Emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes y pesticidas	61	0	87	39	97	94	19	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	3	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	14	0	0	2	0	100
Utilización de combustible para tareas del campo	7	21	3	1	1	3	4	0	0	12	0	0	0	1	18	11	13	13	71	0
Riego	0	1	0	3	0	0	4	6	6	0	6	6	100	5	2	5	4	3	0	0
Almacenamiento	5	11	0	49	0	0	69	94	93	0	94	94	0	89	32	72	66	50	6	0
Transporte de fruta	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	4	4	4	0

Tabla 7. Contribución porcentual de etapas del sistema productivo a los indicadores de impacto ambiental (por kilogramo de fruta) para la unidad productiva 2, para el periodo de zafra 2024.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	10	21	13	0	4	3	1	0	0	20	0	0	1	0	0	2	1	2	1	0
Emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes y pesticidas	2	0	5	88	16	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	4	2	4	0	3	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	2	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	97	9	49	77	0	100
Utilización de combustible para tareas del campo	63	64	71	1	68	77	21	0	2	75	0	0	2	0	2	33	21	10	90	0
Riego	1	1	0	2	0	0	12	17	16	0	17	17	97	2	0	8	4	1	0	0
Almacenamiento	7	6	0	9	0	0	62	83	81	0	83	83	0	8	1	38	18	6	1	0
Transporte de fruta	12	6	7	0	7	8	2	0	0	3	0	0	0	0	0	8	6	3	5	0

CC: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; **AO:** Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; **Ac:** Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; **EAD:** Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; **EM:** Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; **ET:** Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; **FO:** Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; **UMM:** Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; **URF:** Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; **ETox:** Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; **THc:** Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **THnc:** Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **EAA:** Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; **PE:** Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; **PRAS:** Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; **PRI:** Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; **PRFF:** Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; **RCO:** Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; **PBI:** Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; **PBD:** Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].

Tabla 8. Contribución porcentual de etapas del sistema productivo a los indicadores de impacto ambiental (por kilogramo de fruta) para la unidad productiva 3, para el periodo de zafra 2024.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	24	23	10	3	1	4	5	0	1	69	0	0	15	1	2	13	10	11	11	0
Emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes y pesticidas	54	0	79	79	96	86	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	7	15	3	0	1	3	4	0	0	3	0	0	0	0	1	12	10	5	16	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87	94	6	39	66	0	100
Utilización de combustible para tareas del campo	11	50	7	1	2	6	10	0	2	26	0	0	1	0	2	21	15	8	68	0
Riego	0	1	0	3	0	0	9	16	15	0	16	16	83	2	0	7	4	1	0	0
Almacenamiento	2	7	0	14	0	0	45	84	81	0	84	84	0	10	1	37	19	7	2	0
Transporte de fruta	2	4	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4	3	2	3	0

Tabla 9. Contribución porcentual de etapas del sistema productivo a los indicadores de impacto ambiental (por kilogramo de fruta) para la unidad productiva 4, para el periodo de zafra 2024.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	41	30	45	20	20	16	3	0	1	57	0	0	9	0	1	5	3	4	5	0
Emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes y pesticidas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	2	1	3	0	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	97	11	55	81	0	100
Utilización de combustible para tareas del campo	43	57	50	4	71	76	14	0	1	42	0	0	2	0	1	25	14	6	88	0
Riego	0	0	0	3	0	0	4	4	4	0	4	4	89	0	0	3	1	0	0	0
Almacenamiento	9	9	0	72	1	0	78	96	93	0	96	95	0	9	1	54	24	8	2	0
Transporte de fruta	4	3	2	0	4	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3	2	1	2	0

CC: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; **AO:** Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; **Ac:** Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; **EAD:** Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; **EM:** Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; **ET:** Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; **FO:** Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; **UMM:** Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; **URF:** Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; **ETox:** Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; **THc:** Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **THnc:** Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **EAA:** Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; **PE:** Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; **PRAS:** Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; **PRI:** Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; **PRFF:** Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; **RCO:** Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; **PBI:** Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; **PBD:** Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].

5.
Discusión

5. Discusión

En conjunto, el estudio evidencia que tanto los costos económicos como las cargas ambientales del sistema productivo están fuertemente influenciados por las decisiones tecnológicas, el grado de integración de las actividades a lo largo de la cadena y las prácticas de manejo adoptadas por cada unidad productiva. Asimismo, muestra que varios de los procesos que resultan críticos desde el punto de vista económico, como el uso intensivo de mano de obra, el empleo de insumos agrícolas, el almacenamiento en cámaras y el transporte, también tienen implicancias relevantes en términos ambientales. A continuación, se discuten los principales hallazgos del estudio en relación con estas dos dimensiones, identificando patrones comunes entre las unidades productivas analizadas y posibles implicancias para el diseño de políticas y estrategias orientadas a mejorar la sostenibilidad económica y ambiental del sistema.

5.1. Estructura de costos de la producción, almacenamiento y transporte de manzana en Uruguay

Los resultados del estudio de caso sugieren que el costo de producción, almacenamiento y transporte de la manzana hasta la puerta del comprador mayorista o minorista está determinado por una combinación de factores, que incluyen las decisiones estratégicas y el perfil tecnológico y productivo de cada unidad. Esta diversidad de factores implica desafíos importantes para el diseño de políticas y estrategias de apoyo al sector. A pesar de las diferencias observadas, los resultados muestran que las unidades productivas relevadas asumen no solo los costos de producción, sino también los costos asociados al almacenamiento y transporte de la manzana.

La mano de obra fue el principal factor determinante del costo de producción de la manzana en las cuatro unidades productivas analizadas. Este componente abarca el trabajo necesario para la realización de una amplia variedad de tareas a lo largo del ciclo productivo, tales como el riego, la poda, el raleo, la aplicación de fertilizantes y fitosanitarios, la cosecha y poscosecha.

Estas actividades demandan una combinación de personal permanente y mano de obra zafral, siendo esta última especialmente relevante en momentos de alta demanda como el raleo, la poda y la cosecha. El número de personas empleadas y la distribución de las tareas entre trabajadores varió entre las unidades, reflejando diferencias en escala, organización del trabajo y grado de mecanización.

Además de las tareas estrictamente productivas, el costo de la mano de obra incluyó también los salarios del personal vinculado a funciones administrativas, logísticas y comerciales. Un aspecto relevante es que, en algunas unidades, las personas responsables de la dirección y gestión de la unidad productiva —generalmente integrantes del núcleo familiar— participan activamente en las labores de producción, logística y comercialización. Sin embargo, en dos de los casos de estudio, su trabajo no es formalmente contabilizado como parte de la estructura de costos, lo que puede conducir a una subestimación del verdadero peso de la mano de obra en el análisis. En el presente estudio, estos costos fueron imputados para lograr una estimación más precisa.

Los fertilizantes y fitosanitarios constituyeron el segundo componente más importante dentro de la estructura de costos de la manzana, con una participación promedio del 10,6 %. Estos insumos son particularmente relevantes en sistemas de manejo convencional, donde se requieren aplicaciones frecuentes a lo largo del ciclo productivo para garantizar niveles adecuados de rendimiento y cumplir con los estándares de calidad exigidos en los mercados de comercialización. En este sentido, una de las personas entrevistadas señaló que el nivel de exigencia de dichos estándares, especialmente en lo relativo a la apariencia externa del fruto, condiciona fuertemente la necesidad de aplicar productos químicos.

Las unidades productivas relevadas reportaron el uso de una variedad de fertilizantes, junto con múltiples productos fitosanitarios destinados al control de insectos, hongos y malezas. La mayoría de estos insumos son importados, lo que los hace susceptibles a variaciones en los precios internacionales, tipo de cambio y disponibilidad en el mercado local. Esta dependencia del abastecimiento externo representa un factor de vulnerabilidad en los costos de producción, especialmente en contextos de volatilidad económica.

Cabe destacar que las personas entrevistadas valoraron positivamente el impacto de las políticas implementadas por el MGAP, orientadas a promo-

ver y facilitar la adopción de estrategias de confusión sexual mediante feromonas para el control de plagas, en particular grafolita (*Grapholita molesta*) y carpocapsa (*Cydia pomonella*). Estas políticas han contribuido a una mayor adopción de esta tecnología a través de dos mecanismos clave: la obligatoriedad de su uso en determinados cultivos y la subvención parcial de su costo. Esta última medida reduce la carga económica de este insumo dentro de la estructura de costos de las unidades productivas, favoreciendo su implementación incluso en emprendimientos de menor escala.

Los costos asociados al almacenamiento y transporte representaron una contribución importante dentro de la estructura de costos de las unidades productivas, ya sea mediante la contratación de servicios tercerizados o a través del uso de insumos como la energía eléctrica para el funcionamiento de las cámaras de conservación, el combustible para el transporte interno y externo, y los materiales utilizados en la comercialización, tales como bins, cajones, cera y papel de recubrimiento. Según las personas entrevistadas, la mayor parte de la producción de manzana se destina al almacenamiento en cámaras de conservación con el objetivo de abastecer el mercado durante todo el año y responder a la demanda comercial de disponibilidad continua del producto. Solo una fracción minoritaria de la producción se comercializa inmediatamente después de la cosecha.

De acuerdo con las personas entrevistadas, la producción de manzana es almacenada para asegurar disponibilidad durante todo el año. El almacenamiento se realiza mediante una combinación de cámaras de atmósfera controlada y cámaras refrigeradas, según las capacidades tecnológicas e infraestructura de cada unidad productiva. La duración del almacenamiento depende de factores internos de las unidades productivas, como el volumen producido, la capacidad de almacenamiento y las necesidades financieras, así como de factores de mercado, tales como la oferta disponible en el período y los niveles de precios. Una vez cosechada, la producción se almacena en cámaras y se retira progresivamente entre 1 y 12 meses después.

Otro aspecto relevante en la estructura de costos es la contribución de las amortizaciones, tanto de los montes frutales como de la maquinaria agrícola. La amortización de los montes incluye el costo inicial de las plantas, el sistema de conducción y los insumos necesarios para su implantación y desarrollo inicial, tales como fertilizantes, fitosanitarios y mano de obra especializada. Se trata de una inversión significativa que requiere varios años para su recuperación.

Por su parte, tres unidades productivas registraron costos relevantes asociados a la amortización de maquinaria agrícola. Estos equipos, utilizados en tareas como la aplicación de fitosanitarios, el desmalezado, el transporte interno y, en algunos casos, la cosecha, requieren inversiones elevadas con un horizonte de recuperación de largo plazo. Si bien su uso puede contribuir a reducir la demanda de mano de obra en determinadas actividades, representan un costo fijo significativo que incide de manera sostenida en la rentabilidad de las unidades productivas.

Además, dado que la maquinaria agrícola es mayoritariamente importada, su adquisición y renovación están sujetas a factores como los precios internacionales, el tipo de cambio y el acceso al crédito, lo que introduce un nivel adicional de incertidumbre en los costos de inversión. A ello se suman los costos de mantenimiento, que también constituyen una proporción no menor del presupuesto operativo. En promedio, el mantenimiento de equipos y maquinaria representó un 3,2 % del costo total de producción hasta la puerta del comprador.

5.2. Impacto ambiental de la producción, almacenamiento y transporte de manzana en Uruguay

La comparación de los resultados obtenidos para cada unidad productiva permite derivar algunas observaciones generales sobre el impacto ambiental de la producción, almacenamiento y transporte de manzana en Uruguay. En primer lugar, el impacto ambiental asociado a la aplicación de fertilizantes mostró una clara distinción entre unidades productivas que utilizan enmiendas orgánicas (como cama de pollo) y aquellos que aplican fertilizantes sintéticos en menores cantidades. En las unidades productivas 1 y 3, el uso intensivo de cama de pollo como fertilizante genera impactos dominantes en cambio climático, acidificación y múltiples formas de eutrofización (marina, terrestre y dulce), debido a la liberación de compuestos nitrogenados como N_2O, NH_3 y NO_3^-. Estas emisiones están directamente relacionadas con la dosis aplicada, que fue considerable en ambos casos. En contraste, en las unidades productivas 2 y 4, donde se utilizan fertilizantes minerales en menores cantidades, las aplicaciones de estos productos no presentaron una contribución destacada en ninguna categoría de impacto, aunque en la unidad 2 se observa un pico puntual en eutrofización dulce. Esto sugiere que la intensidad de aplicación, más que el tipo de fertilizante, es el factor determinante del impacto en estos sistemas, especialmente en lo relativo a emisiones difusas de nitrógeno reactivo.

El uso de combustible (diésel) para labores agrícolas representó un punto crítico ambiental en las cuatro unidades productivas, especialmente en la categoría de pérdida indirecta de biodiversidad, donde su impacto supera el 50 % en todos los casos. Además, tuvo una contribución elevada en eutrofización marina y terrestre, acidificación y ecotoxicidad, particularmente en las unidades productivas 2 y 4. Esta carga ambiental se relaciona tanto con las emisiones directas del combustible (NO_x, PM, CO_2) como con su proceso de extracción y refino.

El consumo de agua para riego fue un punto crítico en las cuatro unidades productivas, concentrando la mayor parte del impacto en la categoría de escasez hídrica. Este resultado es consistente con la metodología utilizada, que considera no solo el volumen absoluto aplicado sino también la presión hídrica regional mediante factores de escasez. La gestión eficiente del agua fue identificada como un área de acción transversal para mitigar el impacto de las cuatro unidades productivas, ya que esta etapa implica una competencia directa con otros usos ecosistémicos y productivos del recurso.

El uso del suelo agrícola fue responsable del 100 % de la pérdida directa de biodiversidad en las cuatro unidades productivas, y además concentró los impactos más altos en potencial de erosión, reducción de regeneración de aguas subterráneas y pérdida de carbono orgánico del suelo. Los valores se mantuvieron elevados en todas las ubicaciones, con pequeñas variaciones entre unidades productivas, lo que evidencia un patrón estructural del sistema productivo. Este tipo de impacto, menos reversible en el corto plazo, requiere un enfoque territorial más amplio. Algunas estrategias que podrían contribuir a mitigar la pérdida de biodiversidad detectada incluyen la conservación de hábitats, la restauración ecológica, la agroforestería, los corredores biológicos y otros modelos productivos biodiversos que integran sostenibilidad sin comprometer necesariamente la productividad. No obstante, sería necesario realizar ensayos específicos para evaluar su efectividad en este sistema particular.

El consumo de electricidad en la etapa de almacenamiento frigorífico constituye un punto crítico transversal a las cuatro unidades productivas analizadas, al presentar una contribución importante en al menos tres categorías ambientales clave en todos los casos. Entre las más afectadas se destacan la formación de ozono troposférico, la toxicidad humana (cáncer y no cáncer), y el uso de recursos fósiles y minerales. Esta contribución se explica tanto por el volumen de energía eléctrica requerido como por el

modelo de mix eléctrico empleado en el ACV, el cual incluye tecnologías de generación y transmisión intensivas en materiales estratégicos y energía embebida. Aunque este modelado puede sobredimensionar ciertos impactos al no reflejar con precisión el perfil renovable de Uruguay, también es cierto que la demanda energética de las cámaras es importante, especialmente en relación con la refrigeración por tiempos prolongados.

6.
Conclusiones

6. Conclusiones

El presente trabajo desarrolló un estudio de caso sobre la estructura de costos y los impactos ambientales asociados a la producción y comercialización de la manzana, un alimento clave dentro de una alimentación saludable en Uruguay. En relación con los costos, se identificaron diferencias relevantes entre las unidades productivas analizadas, lo que refleja la influencia de una combinación de factores, entre ellos las decisiones estratégicas, el perfil tecnológico y las características organizativas de cada unidad. La mano de obra emergió como el principal componente del costo de producción, destacándose la alta dependencia de trabajadores zafrales y la subestimación del trabajo familiar no remunerado. A ello se suman los costos asociados a insumos importados, como fertilizantes y fitosanitarios, cuya disponibilidad y precio están sujetos al comportamiento de los mercados internacionales, lo que introduce un importante nivel de incertidumbre. Además, el almacenamiento en cámaras representa un componente relevante de la estructura de costos, necesario para asegurar una oferta continua durante todo el año.

Desde el punto de vista comercial, las entrevistas realizadas sugieren que los precios de venta de la manzana por parte de intermediarios y comercios minoristas se definen principalmente en función de márgenes de ganancia y de las dinámicas de oferta y demanda. En particular, se reportó que las condiciones impuestas por los supermercados, incluidos márgenes elevados y descuentos adicionales exigidos a los productores, inciden en la rentabilidad de las unidades productivas y en la fijación de precios finales al consumidor. En este contexto, el fortalecimiento de circuitos cortos de comercialización, así como las compras públicas, emergen como estrategias con potencial para mejorar la equidad en la cadena de valor y reducir los precios al consumidor.

Desde una perspectiva ambiental, el análisis de ciclo de vida permitió identificar puntos críticos comunes en todas las unidades productivas, tales como el uso de diésel en labores agrícolas, el consumo de electricidad en el almacenamiento en cámaras y el uso del suelo agrícola, los cuales gene-

ran impactos significativos en diversas categorías ambientales. Asimismo, se constató que las decisiones relativas al tipo y cantidad de fertilizantes empleados, el manejo del agua, las estrategias de conservación de suelos y el consumo energético en el almacenamiento son determinantes para mitigar dichos impactos.

Teniendo en cuenta que este estudio constituye una primera aproximación a la realidad nacional, resulta necesario ampliar la participación de productores —en especial de gran escala— con el fin de incorporar la perspectiva de este grupo y dotar de mayor robustez al análisis. Asimismo, se considera pertinente complementar el estudio de la estructura de costos con el análisis de otros alimentos saludables de consumo habitual en Uruguay, en particular otras frutas, así como la inclusión de verduras. Los resultados obtenidos constituyen un insumo valioso para orientar políticas públicas destinadas a promover sistemas alimentarios más sostenibles y resilientes.

Referencias

1. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2025. Rome: FAO; 2025.

2. WHO, FAO. What are healthy diets? Joint statement by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the World Health Organization [Internet]. Geneva: World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2024 [cited 2025 Jan 12]. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789240101876

3. Ministerio de Salud Pública. 2a Encuesta Nacional de Factores de Riesgo de Enfermedades no Transmisibles. Montevideo: Ministerio de Salud Pública; 2014.

4. Ares G, Brunet G, Giménez A, Girona A, Vidal L. Understanding fruit and vegetable consumption among Uruguayan adults. Appetite. 2025 Feb;206: 107824. doi:10.1016/j.appet.2024.107824

5. Bai Y, Alemu R, Block SA, Headey D, Masters WA. Cost and affordability of nutritious diets at retail prices: Evidence from 177 countries. Food Policy. 2021 Feb;99:101983. doi:10.1016/j.foodpol.2020.101983

6. Chen PJ, Antonelli M. Conceptual Models of Food Choice: Influential Factors Related to Foods, Individual Differences, and Society. Foods. 2020 Dec 18;9(12):1898. doi:10.3390/foods9121898

7. Darmon N, Drewnowski A. Contribution of food prices and diet cost to socioeconomic disparities in diet quality and health: a systematic review and analysis. Nutr Rev. 2015 Oct;73(10):643–60. doi:10.1093/nutrit/nuv027

8. Bellù LG. Value Chain Analysis for Policy Making Methodological Guidelines and country cases for a Quantitative Approach. Rome: FAO; 2013.

9. Millán J, Díaz A, Ackermann MN. Actualización y revisión de la estructura de costos de producción de Horticultura y Fruticultura. Estudios de Economía Agraria y Ambiental, 20-02. Montevideo: MGAP; 2020.

10. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet. 2019;393(10170):447–92. doi:10.1016/S0140-6736(18)31788-4 PubMed PMID: 30660336.

11. Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, Tubiello FN, Leip A. Climate goals require food systems emission inventories. Nat Food. 2022 Jan 13;3(1):1–1. doi:10.1038/s43016-021-00450-2

12. Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science (1979). 2018 Jun;360(6392):987–92. doi:10.1126/science.aaq0216

13. OECD. Environment at a Glance Indicators. Paris: OECD Publishing; 2024.

14. Horton P. A sustainable food future. R Soc Open Sci. 2023 Aug 23;10(8). doi:10.1098/rsos.230702

15. ISO. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. ISO 14044:2006/Amd 2:2020. Geneva: ISO; 2020.

16. Svanes E, Johnsen FM. Environmental life cycle assessment of production, processing, distribution and consumption of apples, sweet cherries and plums from conventional agriculture in Norway. J Clean Prod. 2019 Nov;238:117773. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117773

17. Cabot MI, Lado J, Sanjuán N. Multi-season environmental life cycle assessment of lemons: A case study in south Uruguay. J Environ Manage. 2023 Jan;326:116719. doi:10.1016/j.jenvman.2022.116719

18. Slavin JL, Lloyd B. Health Benefits of Fruits and Vegetables. Advances in Nutrition. 2012 Jul;3(4):506–16. doi:10.3945/an.112.002154

19. Stanaway JD, Afshin A, Ashbaugh C, Bisignano C, Brauer M, Ferrara G, et al. Health effects associated with vegetable consumption: a Burden of Proof study. Nat Med. 2022 Oct 10;28(10):2066–74. doi:10.1038/s41591-022-01970-5

20. Wang DD, Li Y, Bhupathiraju SN, Rosner BA, Sun Q, Giovannucci EL, et al. Fruit and Vegetable Intake and Mortality. Circulation. 2021 Apr 27;143(17):1642–54. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.120.048996

21. Micha R, Khatibzadeh S, Shi P, Andrews KG, Engell RE, Mozaffarian D. Global, regional and national consumption of major food groups in 1990 and 2010: a systematic analysis including 266 country-specific nutrition surveys worldwide. BMJ Open. 2015 Sep 24;5(9):e008705. doi:10.1136/bmjopen-2015-008705

22. Instituto Nacional de Estadística. Encuesta Nacional de Gastos e Ingresos de los Hogares 2016-2017. Montevideo: Instituto Nacional de Estadística; 2017.

23. MGAP - DIEA. Anuario Estadístico Agropecuario 2017. Montevideo: MGAP; 2017.

24. FAO. FAOSTAT. Rome: FAO; 2024.

25. UAM. Anuario Estadístico 2023. Montevideo: UAM; 2024.

26. INE. Índice de Precios del Consumo. Montevideo: INE; 2024.

27. Denzin NK, Lincoln YS. Handbook of qualitative research. London: Sage; 2000.

28. ISO. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. ISO 14040:2006/Amd 1:2020). Genva: ISO; 2020.

29. ISO. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. ISO 14044:2006/Amd 1:2017). Geneva: ISO; 2017.

30. ISO. Environmental Management - Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines. ISO 14044. Geneva: ISO; 2006.

31. ISO. Environmental Management - Life Cycle Assessment: Principles and Framework. ISO 14040. Geneva: ISO; 2006.

32. FitzGerald D, Bourgault G, Vadenbo C, Sonderegger T, Symeonidis A, Fazio S, et al. Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.10. Zürich: Ecoinvent Association; 2023.

33. Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. Int J Life Cycle Assess. 2016 Sep 21;21(9):1218–30. doi:10.1007/s11367-016-1087-8

34. Fantke P., Antón A., Grant T., Hayashi K. Pesticide emission quantification for life cycle assessment: a global consensus building process. Int J Life Cycle Assess. 2017;13:245–51.

35. IPCC. The refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva: IPCC; 2019.

36. Nemecek T, Bengoa X, Lansche J, Roesch A, Faist-Emmenegger M, Rossi V, et al. World food LCA database: methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products. Version 3(5):88. World Food LCA Database; 2019.

37. Searates. https://www.searates.com/es/services/distances-time. 2025. Shipping distances & time calculator.

38. ISO. ISO 14046:2014(es) Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices. Ginebra: ISO; 2014.

39. Agez M, Muller E, Bulle C, Debarre L, Seitfudem G, Viveros Santos I, et al. https://doi.org/10.5281/zenodo.14041258. 2024. IMPACT World+ / a globally regionalized method for life cycle impact assessment (Versión 2.1).

40. EPD. Environmental Product Declarations International AB UN CPC 013: product category rules (PCR) fruits and nuts version 1.01. Stocklholm: EPD International AB; 2019.

41. EPD. https://www.environdec.com/resources/indicators. 2025. Environmental Product Declarations International. Environmental performance indicators.

42. UNE. UNE-EN 15804 + A2. Bruselas: UNE; 2012.

43. MIEM. https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/ben. 2025. Balance Energético Nacional Uruguay. Factores de emisión CO2.

44. Rosenbaum RK, Bachmann TM, Gold LS, Huijbregts MAJ, Jolliet O, Juraske R, et al. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. Int J Life Cycle Assess. 2008 Nov 22;13(7):532–46. doi:10.1007/s11367-008-0038-4

Anexos

Anexo 1.
Guías de preguntas

Actores vinculados a la producción

Ubicación del campo

¿El terreno utilizado es propio o arrendado?
¿Cuál es el cultivo principal?
¿Qué variedades se cultivan?
¿Cuál es la superficie total cultivada?
¿Cuál es el volumen de producción del cultivo?
¿Cuál es el rendimiento promedio por hectárea?
¿Cuál es la duración del ciclo del cultivo?
¿Existen rotaciones de cultivos? Si es así, ¿cuáles son?
¿Cuáles son las principales actividades que se realizan durante el proceso productivo?
¿Cuáles son los principales insumos?
¿En qué unidades mide cada insumo mencionado anteriormente y cuáles son las cantidades utilizadas?
¿Cuánto paga por cada uno de los insumos mencionados anteriormente y que cantidades utiliza durante el ciclo productivo?
¿Utiliza préstamos para financiar su producción? ¿Cuál es el monto? ¿Qué interés mensual paga?
¿Contrata algún tipo de seguro vinculado con la producción? ¿Qué tipo(s) de seguro? ¿Cuál es(son) su(s) monto(s)?
¿Dónde vende su producto? (Profundizar en si él se encarga del transporte y almacenamiento o el solo produce).
¿Cuál es el volumen de pérdidas de manzana?

Prácticas de riego

¿Qué sistema de riego se utiliza?
Si es subterránea, ¿qué profundidad tiene el pozo?
¿Cuál es el volumen total de agua utilizada para riego por hectárea y por ciclo de cada fuente? (Relevar volumen de agua para otros usos, p.ej. limpieza, dilución de insumos agrícolas –fertilizantes, pesticidas,etc.–).

¿Qué sistema de riego utiliza?
¿Qué tipo de bomba utiliza? ¿Eléctrica o con combustible?
¿Se realiza algún tipo de monitoreo del suelo para determinar las necesidades hídricas?
¿Existen restricciones normativas o de otra índole en el uso del agua?
¿Se recicla o reutiliza el agua de riego?
¿Se realiza algún tipo de monitoreo del suelo para determinar las necesidades hídricas?

Uso de fertilizantes

¿Qué tipo de fertilizantes utiliza? (Marca y origen).
¿Qué cantidades utilizan?
¿Cada cuánto los aplican?
¿Se realizan análisis de suelo para determinar las necesidades de nutrientes?
¿Producen abonos orgánicos? ¿A partir de qué?

Uso de pesticidas

¿Qué tipo de pesticidas se utilizan? (Marca y cantidad).
¿Cuál es la frecuencia de aplicación de pesticidas?
¿Qué cantidad utilizan?
¿Se utilizan métodos de control biológico o integrado de plagas? ¿Qué tipos?

Prácticas agrícolas

¿Qué tipo de labranza se utiliza? (Convencional, mínima, cero labranza).
¿Se utilizan cultivos de cobertura?
¿Se utilizan setos o árboles para crear barreras vivas?
¿Se implementan prácticas agroecológicas (rotación de cultivos, cultivos de cobertura, fertilizantes orgánicos)?

Maquinaria y equipos

¿Qué tipo de maquinaria se utiliza en las labores agrícolas? ¿Para qué actividades las usan?
¿Cuál es la edad promedio de la maquinaria?
¿Se utilizan combustibles fósiles (gasolina, diesel) para operar la maquinaria? ¿En qué cantidad? (Estimar posteriormente por ciclo de producción).

Energía y combustibles

¿Se utiliza energía eléctrica para la producción de manzanas?
¿Para qué actividades?

¿De qué fuente proviene? (Red eléctrica, generadores, paneles solares).
¿Qué cantidad se consume?
¿Se utilizan combustibles fósiles? ¿Qué combustibles?
¿Para qué actividades se utilizan?
¿En qué cantidades?

Gestión de residuos
¿Cómo se gestionan los residuos agrícolas (restos de cosecha, malezas)?
¿Se incineran los residuos?

Actores vinculados al transporte

¿Cuáles son las principales actividades que se desarrollan para el transporte de manzana desde las fincas hasta los mercados o puntos de venta?
¿Qué insumos se utilizan, en qué cantidades y cuánto se paga por ellos?
¿Qué tipo de vehículos utilizan para el transporte y cómo influye esto en los costos operativos?
¿Qué distancias se recorren habitualmente?
¿Cuál es el volumen de pérdidas de manzana durante el transporte?

Actores vinculados al almacenamiento

¿Las manzanas son almacenadas en cámaras durante su comercialización?
¿En qué condiciones?
Si utilizan cámaras:
¿Cuál es la capacidad de la cámara?
¿Cuál es el volumen de la cámara?
¿Cuál es el tiempo de almacenamiento de las manzanas?
¿Qué porcentaje de la cámara se usa para almacenar manzanas?
¿Cuál es el consumo de energía de la cámara?
¿Cuáles son las principales actividades que se desarrollan para el almacenamiento de las manzanas?
¿Qué insumos se utilizan (mano de obra, energía eléctrica, uso de vehículos de carga/descarga)?
¿En qué cantidades y cuánto se paga por ellos?
¿Cuál es el volumen de pérdidas durante el almacenamiento?

Actores vinculados a la comercialización

¿Cuáles son las principales actividades que lleva a cabo para la comercialización de manzana?
¿Qué insumos/recursos utiliza?
¿Cuánto paga por cada uno de los insumos utilizados?
¿Cómo almacenan las manzanas?
Si utilizan cámaras:
¿Cuál es la capacidad de la cámara?
¿Cuál es el volumen de la cámara?
¿Cuál es el tiempo de almacenamiento de las manzanas?
¿Qué porcentaje de la cámara se usa para almacenar manzanas?
¿Cuál es el consumo de energía de la cámara?
¿Se utiliza algún envase durante la comercialización? ¿Cuál? ¿Qué materiales? ¿Qué cantidad se utiliza?
¿Cuál es el volumen de desperdicios del producto estimado durante el almacenamiento y comercialización de manzanas?

Anexo 2.
Impacto ambiental de la producción

Unidad productiva 1

En la Tabla A.1 se presentan los resultados ambientales de la unidad productiva 1. Las emisiones derivadas de la aplicación de fertilizantes constituyeron la etapa más impactante del sistema, siendo responsable del 61 % del impacto en cambio climático, 87 % en acidificación, 97 % en eutrofización marina y 94 % en eutrofización terrestre. Esta situación se explica fundamentalmente por el uso de fertilizante orgánico (bosta de pollo y cáscara de arroz), cuyo contenido de nitrógeno genera emisiones significativas de N_2O, NO_3^-, NH_3 y NO_x durante y después de su aplicación al suelo. Esta etapa representa una prioridad en términos de mitigación, particularmente en lo que refiere a la mejora de técnicas de aplicación, dosificación y estabilización del fertilizante.

Por su parte, la producción de fertilizantes y pesticidas también presenta impactos ambientales significativos, especialmente en ecotoxicidad (87 %) y agotamiento de ozono (64 %). Dentro de esta etapa, el punto crítico específico está asociado a la producción de fitosanitarios, particularmente el mancozeb y el rapidex, cuyos procesos de síntesis conllevan una elevada carga ambiental debido al uso de compuestos activos complejos y reacciones químicas intensivas. Este hallazgo pone en evidencia la necesidad de evaluar alternativas más sostenibles, así como de aplicar criterios de ecodiseño y análisis de ciclo de vida en la elección de insumos.

En el caso de los fertilizantes, el impacto ambiental está directamente relacionado con la alta cantidad aplicada de fertilizantes orgánicos, como la bosta de pollo y la cáscara de arroz. Si bien su origen es residual, el volumen necesario para alcanzar las dosis nutritivas deseadas contribuye de forma considerable a los impactos ambientales.

El consumo de agua de riego es responsable del 100 % del impacto en la categoría de escasez hídrica. Esta dependencia total del sistema respecto a los recursos hídricos subraya la necesidad urgente de optimizar los sis-

temas de riego, mediante tecnologías de precisión, sensores de humedad y estrategias de reducción de pérdidas por evaporación o escurrimiento.

El uso de diésel para tareas agrícolas aparece como un punto crítico por su elevada contribución a la pérdida indirecta de biodiversidad (71 %). Estos impactos derivan del consumo de gasoil en maquinaria agrícola, tanto por emisiones directas como por los procesos asociados a la extracción, refinado y transporte del combustible. Se recomienda avanzar hacia una reducción en la intensidad del laboreo y la progresiva incorporación de maquinaria más eficiente o electrificada.

El consumo eléctrico en la etapa de almacenamiento representa un punto crítico relevante por su alta concentración de impactos en múltiples categorías. Se destacan especialmente los valores en formación de ozono fotoquímico (69 %), uso de recursos minerales y metales (94 %), uso de recursos fósiles (93 %), y toxicidad humana tanto por cáncer como no cáncer (94 %). A estos impactos se suman contribuciones elevadas en categorías vinculadas al suelo, y una participación significativa en eutrofización de agua dulce (49 %). Este resultado combina una demanda energética significativa en los sistemas de refrigeración con una modelización eléctrica basada en un mix no del todo adaptado a la realidad uruguaya, que puede sobredimensionar ciertos impactos relacionados con el uso de metales, combustibles fósiles y emisiones industriales. A pesar de esta limitación metodológica, la etapa sigue representando un foco de consumo energético relevante, por lo que se recomienda actuar tanto sobre la mejora de la eficiencia energética como sobre la revisión y adaptación del dataset eléctrico empleado, con el fin de reflejar de forma más fiel el perfil renovable del sistema eléctrico uruguayo.

Tabla A.1. Impactos ambientales por etapa del sistema productivo para la unidad productiva 1, expresados por kilogramo.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	$2.25{\cdot}10^{-2}$	$8.42{\cdot}10^{-9}$	$2.72{\cdot}10^{-4}$	$1.09{\cdot}10^{-5}$	$3.37{\cdot}10^{-5}$	$3.44{\cdot}10^{-4}$	$8.07{\cdot}10^{-5}$	$1.66{\cdot}10^{-6}$	$3.93{\cdot}10^{-1}$	$2.75{\cdot}10^{2}$	$2.11{\cdot}10^{-9}$	$1.14{\cdot}10^{-8}$	$1.70{\cdot}10^{-2}$	$2.17{\cdot}10^{-4}$	$5.95{\cdot}10^{-5}$	$1.28{\cdot}10^{-2}$	4.06	$2.10{\cdot}10^{-2}$	$2.42{\cdot}10^{-9}$	0
Emisiones aplicación fertilizantes y pesticidas	$5.40{\cdot}10^{-2}$	0	$2.49{\cdot}10^{-3}$	$5.68{\cdot}10^{-5}$	$2.66{\cdot}10^{-3}$	$1.15{\cdot}10^{-2}$	$4.33{\cdot}10^{-4}$	0	0	2.11	0	$6.26{\cdot}10^{-10}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	$5.46{\cdot}10^{-4}$	$1.20{\cdot}10^{-10}$	$5.96{\cdot}10^{-6}$	$3.78{\cdot}10^{-8}$	$1.90{\cdot}10^{-6}$	$2.09{\cdot}10^{-5}$	$5.62{\cdot}10^{-6}$	$1.70{\cdot}10^{-9}$	$8.11{\cdot}10^{-3}$	$6.44{\cdot}10^{-1}$	$3.06{\cdot}10^{-11}$	$1.44{\cdot}10^{-10}$	$3.56{\cdot}10^{-5}$	$-1.86{\cdot}10^{-6}$	$3.71{\cdot}10^{-6}$	$1.28{\cdot}10^{-3}$	$4.43{\cdot}10^{-1}$	$9.91{\cdot}10^{-4}$	$3.78{\cdot}10^{-10}$	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$2.91{\cdot}10^{-4}$	$-3.04{\cdot}10^{-5}$	$6.16{\cdot}10^{-5}$	$1.62{\cdot}10^{-1}$	$1.20{\cdot}10^{-3}$	0	$1.65{\cdot}10^{-11}$
Utilización de combustible para tareas del campo	$6.35{\cdot}10^{-3}$	$2.85{\cdot}10^{-9}$	$8.72{\cdot}10^{-5}$	$1.41{\cdot}10^{-6}$	$3.02{\cdot}10^{-5}$	$3.29{\cdot}10^{-4}$	$9.35{\cdot}10^{-5}$	$9.82{\cdot}10^{-8}$	$2.03{\cdot}10^{-1}$	$3.73{\cdot}10^{1}$	$1.06{\cdot}10^{-9}$	$1.71{\cdot}10^{-8}$	$1.07{\cdot}10^{-3}$	$6.90{\cdot}10^{-5}$	$3.81{\cdot}10^{-5}$	$1.52{\cdot}10^{-2}$	4.52	$1.03{\cdot}10^{-2}$	$1.11{\cdot}10^{-8}$	0
Riego	$2.61{\cdot}10^{-4}$	$8.95{\cdot}10^{-11}$	$8.38{\cdot}10^{-9}$	$4.45{\cdot}10^{-6}$	$5.76{\cdot}10^{-8}$	$2.02{\cdot}10^{-10}$	$9.82{\cdot}10^{-5}$	$4.75{\cdot}10^{-3}$	2.59	$1.12{\cdot}10^{-6}$	$1.21{\cdot}10^{-5}$	$3.23{\cdot}10^{-6}$	$1.65{\cdot}10^{1}$	$-5.96{\cdot}10^{-4}$	$4.25{\cdot}10^{-6}$	$6.38{\cdot}10^{-3}$	1.42	$2.44{\cdot}10^{-3}$	$5.93{\cdot}10^{-11}$	0
Almacenamiento	$4.17{\cdot}10^{-3}$	$1.43{\cdot}10^{-9}$	$1.34{\cdot}10^{-7}$	$7.13{\cdot}10^{-5}$	$9.22{\cdot}10^{-7}$	$3.24{\cdot}10^{-9}$	$1.57{\cdot}10^{-3}$	$7.61{\cdot}10^{-2}$	$4.15{\cdot}10^{1}$	$1.79{\cdot}10^{-5}$	$1.94{\cdot}10^{-4}$	$5.17{\cdot}10^{-5}$	$1.08{\cdot}10^{-9}$	$-9.54{\cdot}10^{-3}$	$6.80{\cdot}10^{-5}$	$1.02{\cdot}10^{-1}$	$2.27{\cdot}10^{1}$	$3.91{\cdot}10^{-2}$	$9.49{\cdot}10^{-10}$	0
Transporte de fruta	$1.27{\cdot}10^{-3}$	$2.84{\cdot}10^{-10}$	$8.65{\cdot}10^{-6}$	$9.62{\cdot}10^{-8}$	$3.32{\cdot}10^{-6}$	$3.63{\cdot}10^{-5}$	$9.97{\cdot}10^{-6}$	$4.35{\cdot}10^{-9}$	$1.93{\cdot}10^{-2}$	1.65	$6.99{\cdot}10^{-11}$	$3.86{\cdot}10^{-10}$	$9.03{\cdot}10^{-5}$	$-5.33{\cdot}10^{-6}$	$1.01{\cdot}10^{-5}$	$3.51{\cdot}10^{-3}$	1.21	$2.70{\cdot}10^{-3}$	$6.24{\cdot}10^{-10}$	0
Total	$\mathbf{8.91{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{1.32{\cdot}10^{-8}}$	$\mathbf{2.87{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{1.45{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{2.73{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{1.23{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{2.29{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{8.08{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{4.47{\cdot}10^{1}}$	$\mathbf{3.17{\cdot}10^{2}}$	$\mathbf{2.06{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{5.50{\cdot}10^{-5}}$	$\mathbf{1.65{\cdot}10^{1}}$	$\mathbf{-9.56{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{1.53{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{1.41{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{3.45{\cdot}10^{1}}$	$\mathbf{7.78{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{1.55{\cdot}10^{-8}}$	$\mathbf{1.65{\cdot}10^{-11}}$

CC: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; **AO:** Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; **Ac:** Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; **EAD:** Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; **EM:** Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; **ET:** Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; **FO:** Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; **UMM:** Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; **URF:** Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; **ETox:** Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; **THc:** Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **THnc:** Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **EAA:** Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; **PE:** Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; **PRAS:** Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; **PRI:** Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; **PRFF:** Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; **RCO:** Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; **PBI:** Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; **PBD:** Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].

Unidad productiva 2

En la Tabla A.2 se presentan los resultados ambientales de la unidad productiva 2. La utilización de combustible para tareas agrícolas fue una de las etapas más críticas del ciclo, siendo responsable del 63 % del impacto en cambio climático, 64 % en agotamiento de ozono, 71 % en acidificación, y alcanza valores especialmente altos en eutrofización terrestre (77 %), eutrofización marina (68 %) y pérdida indirecta de biodiversidad (90 %). Además, contribuyó en forma destacada a la ecotoxicidad (75 %). Esta combinación de impactos refleja la intensidad de uso del gasoil y sus efectos tanto directos como indirectos. Las medidas prioritarias deberían enfocarse en la optimización de labores, la reducción de pasadas, y la progresiva transición hacia maquinaria más eficiente o electrificada.

La emisión de fertilizantes aparece como otro punto crítico claro, al concentrar el 88 % del impacto en eutrofización de agua dulce. Estos resultados se explican por el contenido de fósforo de los fertilizantes aplicados y su comportamiento en el suelo, especialmente en términos de escurrimiento superficial y lixiviación. La gestión adecuada de dosis, tiempos y formas de aplicación resulta clave para reducir este impacto.

El consumo de agua de riego fue el principal responsable en la categoría de consumo de agua (97 %), manteniendo un patrón similar al observado en otras unidades productivas. La elevada presión hídrica sobre el recurso justifica la implementación de estrategias de eficiencia de riego, monitoreo del estado hídrico del suelo y exploración de fuentes complementarias o alternativas.

El consumo eléctrico en la etapa de almacenamiento destacó por su incidencia en categorías relacionadas con energía y materiales. Fue responsable del 83 % del impacto en uso de recursos minerales y metales, 81 % en uso de recursos fósiles, 62 % en formación de ozono fotoquímico, y 83 % tanto en toxicidad humana (cáncer) como no cáncer. También tuvo un peso importante en la reducción de infiltración (38 %). Este resultado, en línea con lo observado en la unidad productiva 1, combina una demanda energética significativa con una modelización eléctrica que puede sobredimensionar ciertos impactos debido al mix internacional empleado.

Aun así, el consumo real de energía en esta etapa sigue siendo considerable, por lo que se recomienda avanzar en eficiencia energética y revisar el dataset eléctrico utilizado para reflejar mejor el perfil renovable de Uruguay.

Finalmente, la etapa correspondiente al uso del suelo se identificó como responsable del 90 % del impacto en potencial de erosión, 97 % en reducción de regeneración de aguas subterráneas, y 77 % en reducción de carbono orgánico del suelo. Estos valores reflejan los efectos estructurales del cambio de uso del suelo, la alteración de las funciones ecosistémicas y la pérdida de hábitats naturales. Si bien son impactos menos reversibles a corto plazo, su consideración es fundamental para orientar decisiones de manejo, conservación y restauración.

Tabla A.2. Impactos ambientales por etapa del sistema productivo para la unidad productiva 2, expresados por kilogramo.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	$8.02\cdot10^{-3}$	$7.03\cdot10^{-9}$	$1.19\cdot10^{-4}$	$4.94\cdot10^{-6}$	$1.52\cdot10^{-5}$	$1.12\cdot10^{-4}$	$3.33\cdot10^{-5}$	$9.03\cdot10^{-7}$	$1.99\cdot10^{-1}$	$7.82\cdot10^{1}$	$7.28\cdot10^{-10}$	$3.67\cdot10^{-9}$	$4.88\cdot10^{-3}$	$1.42\cdot10^{-4}$	$5.12\cdot10^{-5}$	$6.90\cdot10^{-3}$	2.24	$1.63\cdot10^{-2}$	$7.20\cdot10^{-10}$	0
Emisiones aplicación fertilizantes y pesticidas	$1.84\cdot10^{-3}$	0	$4.98\cdot10^{-5}$	$9.20\cdot10^{-4}$	$5.41\cdot10^{-5}$	$2.30\cdot10^{-4}$	$8.79\cdot10^{-6}$	0	0	1.81	$9.92\cdot10^{-13}$	$1.03\cdot10^{-10}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	$3.07\cdot10^{-3}$	$6.74\cdot10^{-10}$	$3.56\cdot10^{-5}$	$2.09\cdot10^{-7}$	$1.11\cdot10^{-5}$	$1.22\cdot10^{-4}$	$3.28\cdot10^{-5}$	$9.38\cdot10^{-9}$	$4.54\cdot10^{-2}$	3.55	$1.72\cdot10^{-10}$	$7.89\cdot10^{-10}$	$1.97\cdot10^{-4}$	$-1.00\cdot10^{-5}$	$2.02\cdot10^{-5}$	$6.97\cdot10^{-3}$	2.41	$5.39\cdot10^{-3}$	$2.23\cdot10^{-9}$	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$1.47\cdot10^{-1}$	$-1.54\cdot10^{-2}$	$3.12\cdot10^{-2}$	$8.18\cdot10^{1}$	$6.09\cdot10^{-1}$	0	$2.25\cdot10^{-11}$
Utilización de combustible para tareas del campo	$4.87\cdot10^{-2}$	$2.19\cdot10^{-8}$	$6.69\cdot10^{-4}$	$1.08\cdot10^{-5}$	$2.32\cdot10^{-4}$	$2.53\cdot10^{-3}$	$7.17\cdot10^{-4}$	$7.53\cdot10^{-7}$	1.56	$2.87\cdot10^{2}$	$8.14\cdot10^{-9}$	$1.31\cdot10^{-7}$	$8.24\cdot10^{-3}$	$5.30\cdot10^{-4}$	$2.93\cdot10^{-4}$	$1.17\cdot10^{-1}$	$3.47\cdot10^{1}$	$7.93\cdot10^{-2}$	$8.50\cdot10^{-8}$	0
Riego	$1.11\cdot10^{-3}$	$3.80\cdot10^{-10}$	$3.56\cdot10^{-8}$	$1.89\cdot10^{-5}$	$2.45\cdot10^{-7}$	$8.59\cdot10^{-10}$	$4.17\cdot10^{-4}$	$2.02\cdot10^{-2}$	$1.10\cdot10^{1}$	$4.74\cdot10^{-6}$	$5.15\cdot10^{-5}$	$1.37\cdot10^{-5}$	$3.98\cdot10^{-1}$	$-2.53\cdot10^{-3}$	$1.80\cdot10^{-5}$	$2.71\cdot10^{-2}$	6.02	$1.04\cdot10^{-2}$	$2.52\cdot10^{-10}$	0
Almacenamiento	$5.46\cdot10^{-3}$	$1.87\cdot10^{-9}$	$1.75\cdot10^{-7}$	$9.31\cdot10^{-5}$	$1.20\cdot10^{-6}$	$4.23\cdot10^{-9}$	$2.05\cdot10^{-3}$	$9.94\cdot10^{-2}$	$5.42\cdot10^{1}$	$2.33\cdot10^{-5}$	$2.53\cdot10^{-4}$	$6.76\cdot10^{-5}$	$1.41\cdot10^{-9}$	$-1.25\cdot10^{-2}$	$8.89\cdot10^{-5}$	$1.33\cdot10^{-1}$	$2.97\cdot10^{1}$	$5.11\cdot10^{-2}$	$1.24\cdot10^{-9}$	0
Transporte de fruta	$9.64\cdot10^{-3}$	$2.16\cdot10^{-9}$	$6.59\cdot10^{-5}$	$7.33\cdot10^{-7}$	$2.53\cdot10^{-5}$	$2.77\cdot10^{-4}$	$7.59\cdot10^{-5}$	$3.32\cdot10^{-8}$	$1.47\cdot10^{-1}$	$1.26\cdot10^{1}$	$5.33\cdot10^{-10}$	$2.94\cdot10^{-9}$	$6.88\cdot10^{-4}$	$-4.06\cdot10^{-5}$	$7.71\cdot10^{-5}$	$2.67\cdot10^{-2}$	9.25	$2.06\cdot10^{-2}$	$4.75\cdot10^{-9}$	0
Total	$\mathbf{7.79\cdot10^{-2}}$	$\mathbf{3.40\cdot10^{-8}}$	$\mathbf{9.40\cdot10^{-4}}$	$\mathbf{1.05\cdot10^{-3}}$	$\mathbf{3.39\cdot10^{-4}}$	$\mathbf{3.27\cdot10^{-3}}$	$\mathbf{3.34\cdot10^{-3}}$	$\mathbf{1.20\cdot10^{-1}}$	$\mathbf{6.71\cdot10^{1}}$	$\mathbf{3.83\cdot10^{2}}$	$\mathbf{3.05\cdot10^{-4}}$	$\mathbf{8.15\cdot10^{-5}}$	$\mathbf{4.12\cdot10^{-1}}$	$\mathbf{1.33\cdot10^{-1}}$	$\mathbf{-1.48\cdot10^{-2}}$	$\mathbf{3.49\cdot10^{-1}}$	$\mathbf{1.66\cdot10^{2}}$	$\mathbf{7.92\cdot10^{-1}}$	$\mathbf{9.42\cdot10^{-8}}$	$\mathbf{2.25\cdot10^{-11}}$

CC: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; **AO:** Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; **Ac:** Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; **EAD:** Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; **EM:** Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; **ET:** Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; **FO:** Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; **UMM:** Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; **URF:** Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; **ETox:** Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; **THc:** Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **THnc:** Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **EAA:** Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; **PE:** Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; **PRAS:** Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; **PRI:** Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; **PRFF:** Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; **RCO:** Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; **PBI:** Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; **PBD:** Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].

Unidad productiva 3

En la Tabla A.3 se presentan los resultados ambientales de la unidad productiva 3. La emisión de fertilizantes se presentó como la etapa más impactante, con un 54 % del impacto en cambio climático, 79 % en acidificación, 79 % en eutrofización de agua dulce, 96 % en eutrofización marina, y 86 % en eutrofización terrestre. Estos impactos se explican por la alta cantidad de abono orgánico aplicado (bosta de pollo y cáscara de arroz), cuyo contenido de nitrógeno y fósforo genera importantes emisiones nitrogenadas, además de contribuir a la carga de nutrientes en el suelo y en los cuerpos de agua. Se recomienda optimizar las dosis aplicadas y explorar complementos que mejoren la eficiencia en el uso de nutrientes.

Asimismo, la producción de insumos agrícolas representó un punto crítico, con especial incidencia en ecotoxicidad (69 %). Al igual que en la etapa anterior, estos impactos están directamente asociados a la producción del abono orgánico.

El uso de combustible (diésel) para tareas del campo también contribuyó significativamente a varios impactos, en particular agotamiento de ozono (50 %), y pérdida indirecta de biodiversidad (68 %), además de valores intermedios en cambio climático y efectos sobre el suelo. Estos impactos responden al uso intensivo de maquinaria a gasoil y refuerzan la necesidad de transicionar hacia un manejo más eficiente, con maquinaria optimizada o electrificada, y menor intensidad de laboreo.

El consumo eléctrico en la etapa de almacenamiento se destacó por su fuerte contribución a los impactos ligados a energía y toxicidad humana: 84 % en toxicidad por cáncer y no cáncer, 81 % en uso de recursos fósiles, 84 % en uso de minerales y metales, y 45 % en formación de ozono fotoquímico. También presentó aportes relevantes en categorías relacionadas con el suelo. Como se señaló en las otras unidades productivas, parte de esta carga puede estar sobredimensionada por el uso de un mix eléctrico internacional, que no refleja adecuadamente la matriz renovable del sistema eléctrico uruguayo. Aun así, el consumo real de energía sigue siendo alto, por lo que se recomienda actuar sobre la eficiencia de los equipos y ajustar la base de datos utilizada en el modelado.

El consumo de agua de riego también representó un punto crítico, con un 83 % del impacto en escasez de agua azul. Esto confirma la alta dependen-

cia hídrica del sistema y refuerza la necesidad de mejorar la eficiencia del riego y optimizar el uso del recurso.

Por último, el uso del suelo fue responsable de aportar el 87 % del impacto en potencial de erosión, el 94 % en reducción de regeneración de aguas subterráneas, y el 66 % en reducción de carbono orgánico del suelo. Este patrón responde a las consecuencias estructurales del cambio de uso del suelo agrícola sobre el ecosistema y el ciclo hidrológico, lo que refuerza la necesidad de estrategias integradas de conservación, manejo del paisaje y restauración ecológica.

Tabla A.3. Impactos ambientales por etapa del sistema productivo para la unidad productiva 3, expresados por kilogramo.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	$9.00{\cdot}10^{-2}$	$8.52{\cdot}10^{-9}$	$7.76{\cdot}10^{-4}$	$2.88{\cdot}10^{-5}$	$1.16{\cdot}10^{-4}$	$1.49{\cdot}10^{-3}$	$2.72{\cdot}10^{-4}$	$2.52{\cdot}10^{-6}$	1.26	$6.38{\cdot}10^{2}$	$7.70{\cdot}10^{-9}$	$2.86{\cdot}10^{-8}$	$7.77{\cdot}10^{-2}$	$1.94{\cdot}10^{-3}$	$2.65{\cdot}10^{-4}$	$6.12{\cdot}10^{-2}$	2.00·101	9.92·10-2	$1.18{\cdot}10^{-8}$	0
Emisiones aplicación fertilizantes y pesticidas	$1.98{\cdot}10^{-1}$	0	$6.37{\cdot}10^{-3}$	$7.03{\cdot}10^{-4}$	$9.75{\cdot}10^{-3}$	$3.00{\cdot}10^{-2}$	$1.60{\cdot}10^{-3}$	0	0	4.08	$7.53{\cdot}10^{-15}$	$7.53{\cdot}10^{-11}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	$2.46{\cdot}10^{-2}$	$5.42{\cdot}10^{-9}$	$2.79{\cdot}10^{-4}$	$1.69{\cdot}10^{-6}$	$8.79{\cdot}10^{-5}$	$9.67{\cdot}10^{-4}$	$2.59{\cdot}10^{-4}$	$7.59{\cdot}10^{-8}$	$3.65{\cdot}10^{-1}$	$2.87{\cdot}10^{1}$	$1.38{\cdot}10^{-9}$	$6.40{\cdot}10^{-9}$	$1.59{\cdot}10^{-3}$	$-8.18{\cdot}10^{-5}$	$1.64{\cdot}10^{-4}$	$5.67{\cdot}10^{-2}$	$1.96{\cdot}10^{1}$	$4.38{\cdot}10^{-2}$	$1.76{\cdot}10^{-8}$	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$1.42{\cdot}10^{-1}$	$-1.49{\cdot}10^{-2}$	$3.01{\cdot}10^{-2}$	$7.91{\cdot}10^{1}$	$5.88{\cdot}10^{-1}$	0	$2.17{\cdot}10^{-11}$
Utilización de combustible para tareas del campo	$4.15{\cdot}10^{-2}$	$1.86{\cdot}10^{-8}$	$5.70{\cdot}10^{-4}$	$9.21{\cdot}10^{-6}$	$1.97{\cdot}10^{-4}$	$2.15{\cdot}10^{-3}$	$6.11{\cdot}10^{-4}$	$6.42{\cdot}10^{-7}$	1.33	$2.44{\cdot}10^{2}$	$6.93{\cdot}10^{-9}$	$1.12{\cdot}10^{-7}$	$7.02{\cdot}10^{-3}$	$4.51{\cdot}10^{-4}$	$2.49{\cdot}10^{-4}$	$9.95{\cdot}10^{-2}$	$2.96{\cdot}10^{1}$	$6.75{\cdot}10^{-2}$	$7.24{\cdot}10^{-8}$	0
Riego	$1.36{\cdot}10^{-3}$	$4.66{\cdot}10^{-10}$	$4.36{\cdot}10^{-8}$	$2.32{\cdot}10^{-5}$	$3.00{\cdot}10^{-7}$	$1.05{\cdot}10^{-9}$	$5.11{\cdot}10^{-4}$	$2.47{\cdot}10^{-2}$	$1.35{\cdot}10^{1}$	$5.81{\cdot}10^{-6}$	$6.31{\cdot}10^{-5}$	$1.68{\cdot}10^{-5}$	$4.32{\cdot}10^{-1}$	$-3.10{\cdot}10^{-3}$	$2.21{\cdot}10^{-5}$	$3.32{\cdot}10^{-2}$	7.38	$1.27{\cdot}10^{-2}$	$3.09{\cdot}10^{-10}$	0
Almacenamiento	$7.13{\cdot}10^{-3}$	$2.44{\cdot}10^{-9}$	$2.29{\cdot}10^{-7}$	$1.22{\cdot}10^{-4}$	$1.57{\cdot}10^{-6}$	$5.52{\cdot}10^{-9}$	$2.68{\cdot}10^{-3}$	$1.30{\cdot}10^{-1}$	$7.08{\cdot}10^{1}$	$3.05{\cdot}10^{-5}$	$3.31{\cdot}10^{-4}$	$8.83{\cdot}10^{-5}$	$1.85{\cdot}10^{-9}$	$-1.63{\cdot}10^{-2}$	$1.16{\cdot}10^{-4}$	$1.74{\cdot}10^{-1}$	$3.88{\cdot}10^{1}$	$6.68{\cdot}10^{-2}$	$1.62{\cdot}10^{-9}$	0
Transporte de fruta	$7.25{\cdot}10^{-3}$	$1.63{\cdot}10^{-9}$	$4.95{\cdot}10^{-5}$	$5.51{\cdot}10^{-7}$	$1.90{\cdot}10^{-5}$	$2.08{\cdot}10^{-4}$	$5.71{\cdot}10^{-5}$	$2.49{\cdot}10^{-8}$	$1.10{\cdot}10^{-1}$	9.44	$4.00{\cdot}10^{-10}$	$2.21{\cdot}10^{-9}$	$5.17{\cdot}10^{-4}$	$-3.05{\cdot}10^{-5}$	$5.79{\cdot}10^{-5}$	$2.01{\cdot}10^{-2}$	6.95	$1.55{\cdot}10^{-2}$	$3.57{\cdot}10^{-9}$	0
Total	$\mathbf{3.70{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{3.71{\cdot}10^{-8}}$	$\mathbf{8.05{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{8.88{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{1.02{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{3.48{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{5.99{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{1.55{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{8.73{\cdot}10^{1}}$	$\mathbf{9.25{\cdot}10^{2}}$	$\mathbf{3.94{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{1.05{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{5.19{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{1.25{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{-1.40{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{4.75{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{2.01{\cdot}10^{2}}$	$\mathbf{8.94{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{1.07{\cdot}10^{-7}}$	$\mathbf{2.17{\cdot}10^{-11}}$

CC: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; **AO:** Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; **Ac:** Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; **EAD:** Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; **EM:** Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; **ET:** Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; **FO:** Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; **UMM:** Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; **URF:** Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; **ETox:** Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; **THc:** Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **THnc:** Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **EAA:** Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; **PE:** Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; **PRAS:** Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; **PRI:** Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; **PRFF:** Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; **RCO:** Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; **PBI:** Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; **PBD:** Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].

Unidad productiva 4

En la Tabla A.4 se presentan los resultados ambientales de la unidad productiva 4. La utilización de diésel para tareas del campo representó el punto crítico más importante. Concentró el 57 % del impacto en agotamiento de ozono, 50 % en acidificación, 71 % en eutrofización marina, 76 % en eutrofización terrestre, y 88 % en pérdida indirecta de biodiversidad. También fue relevante en cambio climático (43 %). Este perfil está en línea con las otras unidades productivas, y refleja tanto las emisiones directas del gasoil como sus impactos asociados en la cadena de suministro. Se recomienda trabajar en la reducción del consumo de combustible, planificación más eficiente de las labores y progresiva incorporación de maquinaria eléctrica o híbrida.

La producción de insumos agrícolas presentó impactos relevantes en ecotoxicidad (57 %), principalmente debido a la producción de óxido cuproso, ziram y glifosato. La optimización del uso y la mejora en el manejo pueden ayudar a reducir estos impactos.

El consumo de agua de riego fue un punto crítico, al concentrar el 89 % del impacto de escasez hídrica, en línea con el resto de las unidades productivas.

El consumo eléctrico en la etapa de almacenamiento presentó valores muy altos en múltiples categorías: 78 % en formación de ozono fotoquímico, 96 % en uso de minerales y metales, 93 % en recursos fósiles, 96 % en toxicidad humana (cáncer) y 95 % en toxicidad no cáncer. Además, aportó el 72 % del impacto en eutrofización de agua dulce y contribuciones intermedias en impactos sobre el suelo. Como se indicó las otras unidades productivas, parte de estos impactos pueden estar sobredimensionados por el uso de un mix eléctrico internacional en el modelado, aunque la demanda energética real del sistema sigue siendo elevada.

Por último, el uso del suelo se mantuvo como responsable del 90 % en potencial de erosión, 97 % en reducción de regeneración de aguas subterráneas, y 81 % en reducción de carbono orgánico del suelo. Estos impactos estructurales, ligados a la ocupación prolongada del suelo agrícola, deben abordarse desde una estrategia territorial más amplia, que incluya prácticas de restauración, conservación de hábitats y planificación de uso del suelo.

Tabla A.4. Impactos ambientales por etapa del sistema productivo para la unidad productiva 4, expresados por kilogramo.

Etapa	CC	AO	Ac	EAD	EM	ET	FO	UMM	URF	ETox	THc	THnc	EAA	PE	PRAS	PRI	PRFF	RCO	PBI	PBD
Producción de fertilizantes y pesticidas	$3.66{\cdot}10^{-2}$	$9.14{\cdot}10^{-9}$	$4.75{\cdot}10^{-4}$	$4.01{\cdot}10^{-5}$	$5.25{\cdot}10^{-5}$	$4.09{\cdot}10^{-4}$	$1.37{\cdot}10^{-4}$	$1.30{\cdot}10^{-6}$	$6.63{\cdot}10^{-1}$	$3.08{\cdot}10^{2}$	$3.49{\cdot}10^{-9}$	$1.74{\cdot}10^{-8}$	$3.81{\cdot}10^{-2}$	$3.28{\cdot}10^{-5}$	$1.06{\cdot}10^{-4}$	$1.91{\cdot}10^{-2}$	5.98	$3.42{\cdot}10^{-2}$	$3.65{\cdot}10^{-9}$	0
Emisiones aplicación fertilizantes y pesticidas	$3.88{\cdot}10^{-5}$	0	$1.07{\cdot}10^{-6}$	0	$1.14{\cdot}10^{-6}$	$4.95{\cdot}10^{-6}$	$1.85{\cdot}10^{-7}$	0	0	$1.23{\cdot}10^{-1}$	$2.66{\cdot}10^{-13}$	$2.32{\cdot}10^{-11}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Transporte de fertilizantes y pesticidas	$1.47{\cdot}10^{-3}$	$3.04{\cdot}10^{-10}$	$3.59{\cdot}10^{-5}$	$6.83{\cdot}10^{-8}$	$9.27{\cdot}10^{-6}$	$1.03{\cdot}10^{-4}$	$2.68{\cdot}10^{-5}$	$2.98{\cdot}10^{-9}$	$1.99{\cdot}10^{-2}$	1.12	$8.58{\cdot}10^{-11}$	$1.90{\cdot}10^{-10}$	$6.54{\cdot}10^{-5}$	$-1.05{\cdot}10^{-6}$	$4.04{\cdot}10^{-6}$	$1.37{\cdot}10^{-3}$	$4.72{\cdot}10^{-1}$	$1.09{\cdot}10^{-3}$	$1.99{\cdot}10^{-9}$	0
Uso del suelo para el cultivo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$1.90{\cdot}10^{-1}$	$-1.98{\cdot}10^{-2}$	$4.01{\cdot}10^{-2}$	$1.05{\cdot}10^{2}$	$7.84{\cdot}10^{-1}$	0	$2.89{\cdot}10^{-11}$
Utilización de combustible para tareas del campo	$3.87{\cdot}10^{-2}$	$1.74{\cdot}10^{-8}$	$5.32{\cdot}10^{-4}$	$8.58{\cdot}10^{-6}$	$1.84{\cdot}10^{-4}$	$2.01{\cdot}10^{-3}$	$5.70{\cdot}10^{-4}$	$5.98{\cdot}10^{-7}$	1.24	$2.28{\cdot}10^{2}$	$6.46{\cdot}10^{-9}$	$1.04{\cdot}10^{-7}$	$6.54{\cdot}10^{-3}$	$4.21{\cdot}10^{-4}$	$2.32{\cdot}10^{-4}$	$9.28{\cdot}10^{-2}$	$2.76{\cdot}10^{1}$	$6.29{\cdot}10^{-2}$	$6.75{\cdot}10^{-8}$	0
Riego	$3.89{\cdot}10^{-4}$	$1.33{\cdot}10^{-10}$	$1.25{\cdot}10^{-8}$	$6.64{\cdot}10^{-6}$	$8.59{\cdot}10^{-8}$	$3.01{\cdot}10^{-10}$	$1.46{\cdot}10^{-4}$	$7.08{\cdot}10^{-3}$	3.86	$1.66{\cdot}10^{-6}$	$1.81{\cdot}10^{-5}$	$4.82{\cdot}10^{-6}$	$3.68{\cdot}10^{-1}$	$-8.88{\cdot}10^{-4}$	$6.34{\cdot}10^{-6}$	$9.50{\cdot}10^{-3}$	2.11	$3.64{\cdot}10^{-3}$	$8.84{\cdot}10^{-11}$	0
Almacenamiento	$8.39{\cdot}10^{-3}$	$2.88{\cdot}10^{-9}$	$2.69{\cdot}10^{-7}$	$1.43{\cdot}10^{-4}$	$1.85{\cdot}10^{-6}$	$6.50{\cdot}10^{-9}$	$3.16{\cdot}10^{-3}$	$1.53{\cdot}10^{-1}$	$8.33{\cdot}10^{1}$	$3.59{\cdot}10^{-5}$	$3.90{\cdot}10^{-4}$	$1.04{\cdot}10^{-4}$	$2.18{\cdot}10^{-9}$	$-1.92{\cdot}10^{-2}$	$1.37{\cdot}10^{-4}$	$2.05{\cdot}10^{-1}$	$4.56{\cdot}10^{1}$	$7.86{\cdot}10^{-2}$	$1.91{\cdot}10^{-9}$	0
Transporte de fruta	$3.46{\cdot}10^{-3}$	$7.77{\cdot}10^{-10}$	$2.37{\cdot}10^{-5}$	$2.63{\cdot}10^{-7}$	$9.08{\cdot}10^{-6}$	$9.93{\cdot}10^{-5}$	$2.73{\cdot}10^{-5}$	$1.19{\cdot}10^{-8}$	$5.27{\cdot}10^{-2}$	4.51	$1.91{\cdot}10^{-10}$	$1.05{\cdot}10^{-9}$	$2.47{\cdot}10^{-4}$	$-1.46{\cdot}10^{-5}$	$2.77{\cdot}10^{-5}$	$9.59{\cdot}10^{-3}$	3.32	$7.39{\cdot}10^{-3}$	$1.71{\cdot}10^{-9}$	0
Total	$\mathbf{8.91{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{3.06{\cdot}10^{-8}}$	$\mathbf{1.07{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{1.99{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{2.58{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{2.62{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{4.07{\cdot}10^{-3}}$	$\mathbf{1.60{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{8.92{\cdot}10^{1}}$	$\mathbf{5.42{\cdot}10^{2}}$	$\mathbf{4.08{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{1.09{\cdot}10^{-4}}$	$\mathbf{4.13{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{1.70{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{-1.93{\cdot}10^{-2}}$	$\mathbf{3.78{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{1.90{\cdot}10^{2}}$	$\mathbf{9.72{\cdot}10^{-1}}$	$\mathbf{7.69{\cdot}10^{-8}}$	$\mathbf{2.89{\cdot}10^{-11}}$

CC: Cambio climático [kg CO_2 eq.·kg^{-1}]; **AO:** Agotamiento de ozono [kg CFC-11 eq.·kg^{-1}]; **Ac:** Acidificación [mol H^+ eq.·kg^{-1}]; **EAD:** Eutrofización en agua dulce [kg P eq.·kg^{-1}]; **EM:** Eutrofización marina [kg N eq.·kg^{-1}]; **ET:** Eutrofización terrestre [mol N eq.·kg^{-1}]; **FO:** Formación de ozono fotoquímico (salud humana) [kg NMVOC eq.·kg^{-1}]; **UMM:** Uso de recursos minerales y metales [kg Sb eq.·kg^{-1}]; **URF:** Uso de recursos fósiles [MJ·kg^{-1}]; **ETox:** Ecotoxicidad [CTUe·kg^{-1}]; **THc:** Toxicidad humana (cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **THnc:** Toxicidad humana (no cáncer) [CTUh·kg^{-1}]; **EAA:** Escasez de agua azul [m^3 eq. mundial·kg^{-1}]; **PE:** Potencial de erosión (ocupación) [kg·kg^{-1}]; **PRAS:** Potencial de Reducción de regeneración de aguas subterráneas [m^3·kg^{-1}]; **PRI:** Potencial de reducción de infiltración [m^3·kg^{-1}]; **PRFF:** Potencial de reducción de filtración fisicoquímica [mol·a·kg^{-1}]; **RCO:** Reducción de carbono orgánico del suelo [kg·kg^{-1}]; **PBI:** Pérdida de biodiversidad indirecta [especies·año·kg^{-1}]; **PBD:** Pérdida de biodiversidad directa [pérdida potencial de especies·kg^{-1}].



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ESPACIO
INTERDISCIPLINARIO

CENTRO
INTERDISCIPLINARIO
ALIMENTACIÓN
Y BIENESTAR

