

Estrategias europeas de Economía Circular aplicables al sector agrícola chileno

AL-INVEST Verde. Componente 1

**Alianza UE-América Latina para el
Crecimiento Sostenible y el Empleo**

Marzo 2026

Título	Vinculación entre agricultores y empresas agrícolas chilenas y europeas		
Acrónimo	AL-INVEST VERDR		
Referencia			
Inicio	01/01/2025	Duración	30 meses

A2.2 - Identificación de estrategias europeas de Economía Circular aplicables al sector agrícola chileno.

Fecha de inicio	01/08/2025	Fecha Entregable	11/03/2026
Paquete de trabajo	PT2		
Autores	Felipe Parada Molina (EUT), Cristian Riquelme Ahumada (EUT)		
Coautores			
Revisores	Sequa		
Versión	Draft para revisión		
Nivel de información	Sensible		

Abreviaciones y acrónimos

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
APL	Acuerdo de Producción Limpia
ASCC	Agencia de Sustentabilidad del Camio Climático
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
EC	Economía Circular
EL	Economía Lineal
GEI	Gases de Efecto Invernadero
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
INDAP	Instituto de Desarrollo Agropecuario
IoT	Internet de las cosas (Internet of the Things)
MIP	Manejo Integrado de Plagas
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
WFN	Water Footprint Network

Índice

Resumen Ejecutivo	7
1. Introducción: Economía circular y herramientas de medición	9
2. Economía Circular	10
2.1. Modelos de negocio de negocio circular	13
3. La Economía Circular en Europa: Enfoque en la Agricultura	17
3.1. Fundamentos de la Economía Circular en el Contexto Europeo	17
3.1.1. España: Estrategias y Compromisos	22
3.1.2. Líneas de acción del pacto por la economía circular en España	23
3.1.3. Aplicación de la Economía Circular en la Agricultura Española	23
3.2. Economía Circular en la Agricultura Chilena	25
3.2.1. Pilar Ambiental: Eco-Eficiencia y Regeneración.....	26
3.2.2. Pilar Económico: Competitividad y Valor Agregado.....	26
3.2.3. Pilar Social: Capital Humano y Licencia Social para Operar	27
3.3. Herramientas de la UE y sus puentes en Chile	28
3.3.1. Fondos tipo FEADER: Desarrollo rural, competitividad y sostenibilidad	28
3.3.2. Horizonte Europa: I+D+i y pilotaje	29
3.3.3. Farm-to-Fork: sistemas alimentarios sostenibles.....	29
3.3.4. Waste Framework: fin de residuo	29
3.3.5. Uso de aguas reusadas.....	30
4. Estrategias de Economía Circular para la Agricultura en Zonas Áridas de Chile.....	31
4.1. Tecnología y Eficiencia de Insumos.....	31
4.2. Valorización de Residuos Orgánicos y Biomasa	35
4.2.1. Marco normativo para el reciclaje orgánico a través de compostaje	36

5.1. Análisis técnico económico del manejo de residuos orgánicos	38
5.1.1. Manejos complementarios	42
6. Barreras y Limitaciones para la Implementación	42
7. Herramientas para la medición de la circularidad	48
7.1. Huella de Carbono.....	48
7.2. Huella Hídrica.....	50
7.2.1. Water Footprint Network	51
7.2.2. ISO 14046.....	51
7.3. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	53
7.4. Aplicación de indicadores ambientales en la agricultura chilena	56
Aplicación mediante el análisis de ciclo de vida:	56
Aplicación mediante la huella de carbono:	56
Aplicación mediante la huella de agua:	57
8. Conclusiones y lecciones aprendidas.....	58
9. Bibliografía.....	62
10. Anexos	73

Índice de Figuras

Figura 1. Concepto de Economía Circular y Economía lineal	11
Figura 2. Modelos de economía circular en la cadena de valor	14
Figura 3. Mapa de los actores involucrados en la circularidad agrícola.	44

Índice de Tablas

Tabla 1 Diferencia entre la economía lineal y circular (Chung & Le, 2023)	12
Tabla 2. Estrategia de circularidad 10R (adaptado de Morseletto 2020).....	13
Tabla 3. Ejemplos de aplicación de estrategias 10 R en la agricultura	16
Tabla 4. Líneas de acción adaptada del Ministerio para la Transición Ecológica	23
Tabla 5. Análisis de diferentes tecnologías de compostaje	39
Tabla 6. Ejemplos para la aplicación de estrategias circulares en la agricultura.	47
Tabla 7. Estudios de huella de carbono asociados a la agricultura	50
Tabla 8. Estudios de huella de agua asociados a la agricultura	53
Tabla 9. Estudios de Análisis de Ciclo de Vida asociados a agricultura	55
Tabla 10 Estrategias, fondos y aplicabilidad de la economía circular en Chile.	60

Resumen Ejecutivo

Europa ha consolidado la economía circular (EC) como un cambio estructural desde el modelo lineal hacia uno regenerativo, impulsado por el Pacto Verde Europeo y los Planes de Acción de EC (2015/2020). En agricultura, este enfoque se operacionaliza especialmente mediante la estrategia Farm-to-Fork y la Política Agrícola Común (CAP), que integran objetivos de sostenibilidad, competitividad y acción climática. El caso de España muestra una traducción práctica a través de “España Circular 2030” y el Pacto por la Economía Circular, promoviendo ecodiseño, jerarquía de residuos, trazabilidad, eficiencia productiva y soluciones digitales; en el ámbito agrícola esto se expresa en la valorización de residuos orgánicos (compost y biofertilizantes), el uso eficiente y circular del agua (reutilización y recirculación), la reducción de insumos sintéticos mediante bioinsumos y manejo integrado, y la incorporación de energías renovables.

Para Chile, y en particular para MIPYMEs agrícolas, la adopción efectiva de EC depende menos del marco conceptual y más de convertirla en decisiones operacionales medibles, con indicadores simples a escala predial o asociativa (agua, energía, residuos y emisiones). Se recomienda adaptar el enfoque europeo mediante “paquetes habilitantes” que combinen cofinanciamiento de inversión, asistencia técnica continua y articulación comercial (cooperativas, agroindustrias o exportadoras como compradores ancla), evitando que la innovación quede detenida en pilotos. En zonas áridas, la priorización es clara: primero circularidad hídrica y eficiencia (goteo, sensores, riego deficitario controlado, telemetría), luego reciclaje orgánico para mejorar suelos (compostaje escalable por etapas y, donde aplique, biochar y biofertilizantes), y finalmente soluciones de mayor complejidad (biodigestión/biogás) solo cuando exista masa crítica de sustratos y gobernanza asociativa.

La economía circular europea enfocada en la agricultura se apoya en dos pilares: financiamiento y reglas claras. Por el lado del financiamiento, existen programas que apoyan el desarrollo rural, la modernización del sector y proyectos de innovación (incluyendo pilotos y escalamiento), además de instrumentos de inversión que ayudan a llevar soluciones desde la prueba hasta su adopción en el mercado. Por el lado regulatorio, hay normas que facilitan que los residuos y subproductos se puedan usar de manera segura (por ejemplo, en fertilizantes), que definen cuándo un residuo puede transformarse en un producto útil y que establecen requisitos para reutilizar agua según el uso y los riesgos.

En Chile, hay herramientas que pueden cumplir funciones similares: INDAP para cofinanciar inversiones en predios junto con asesoría técnica, FIA y CORFO para impulsar innovación y escalamiento, y los Acuerdos de Producción Limpia (APL) coordinados por ASCC para ordenar compromisos y mejoras medibles. En regulación, destacan la Ley REP

y la Hoja de Ruta Chile Circular para mejorar la trazabilidad y gestión de residuos. Para agua, existen referencias técnicas de calidad para riego y un marco para el reúso de aguas grises, aunque todavía hay brechas para masificar el reúso agrícola de aguas servidas tratadas. En cambio, para compostaje el marco es más completo, con permisos, exigencias sanitarias y normas técnicas que ayudan a implementarlo de manera segura.

Las tecnologías se deben priorizar según cuatro criterios prácticos: cumplimiento normativo, posibilidad de escalar, costos y adaptación al territorio. Para MIPYMEs en zonas áridas, lo más aplicable suele ser el riego por goteo con sensores, la energía solar para bombeo (y, cuando corresponda, venta de excedentes a la red), el compostaje modular (desde pilas simples hasta sistemas con mayor control), y el manejo integrado de plagas junto con bioinsumos. Como opciones intermedias aparecen la hidroponía con recirculación y la agro voltaica en pilotos. Tecnologías más complejas, como biodigestión/biogás o valorización energética, normalmente requieren mayor escala, coordinación entre actores y un flujo continuo de residuos para que sean rentables. Los principales actores incluyen ministerios, servicios e instrumentos de fomento (INDAP, CORFO, FIA, CNR), además de SAG, INIA, universidades, municipios, cooperativas y agroindustrias; y en Europa, instituciones y redes de innovación. Las barreras más comunes son el alto costo inicial, la incertidumbre regulatoria en algunos temas (especialmente el reúso) y brechas de capacidades técnicas y logísticas. Para enfrentarlas, se recomienda combinar apoyo financiero (subsidios, créditos o leasing), simplificar y coordinar trámites a nivel territorial, fortalecer la asociatividad para ganar escala y usar indicadores simples de seguimiento para asegurar que las soluciones se sostengan en el tiempo.

1. Introducción: Economía circular y herramientas de medición

La economía circular se erige como un paradigma fundamental para abordar los crecientes desafíos ambientales y económicos del siglo XXI. Frente al modelo lineal (tomar, hacer y desechar), este enfoque propone un sistema regenerativo que busca cerrar los ciclos de materiales y energía, minimizando los residuos y reduciendo la presión sobre los ecosistemas naturales. La transición hacia este modelo no es solo una opción estratégica, sino una necesidad imperante para reconfigurar nuestros sistemas productivos y alinearlos con los límites planetarios. Este paradigma cobra una relevancia singular en el sector agrícola, un ámbito donde la eficiencia en el uso de recursos, la adaptación al cambio climático y la valorización de los subproductos son críticos. Inspirándose en la lógica intrínseca de los ecosistemas naturales (donde los desechos de un organismo son el recurso de otro), la economía circular en la agricultura busca emular ese equilibrio dinámico. Iniciativas globales, como el Pacto Verde Europeo y su estrategia "De la Granja a la Mesa", junto con instrumentos nacionales como el Pacto por la Economía Circular en España, están marcando una hoja de ruta clara que fomenta la innovación, la simbiosis entre sectores y la sostenibilidad.

Para materializar esta transición y pasar de la teoría a la práctica cuantificable, es esencial contar con herramientas robustas de evaluación ambiental. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se posiciona como una metodología clave, al ofrecer una perspectiva integral sobre los impactos de un producto o sistema, desde la extracción de las materias primas hasta el fin de su vida útil. Sin embargo, para obtener una visión holística, el ACV debe complementarse con otras métricas, como la medición de la huella de carbono (que cuantifica las emisiones de gases de efecto invernadero) y la huella hídrica (que evalúa el volumen total de agua utilizado). Juntas, estas herramientas permiten una diagnosis precisa de los puntos críticos y las oportunidades de mejora en los sistemas de producción.

La aplicación de estos principios y métricas adquiere una dimensión estratégica y urgente en el contexto de la agricultura en zonas desérticas y áridas. En estos entornos de condiciones extremas, la optimización de cada gota de agua y cada joule de energía es primordial. La integración de tecnologías como la energía solar para el bombeo de agua, la utilización de aguas regeneradas o la hidroponía, demuestra cómo es posible reducir la dependencia de insumos externos. Asimismo, la valorización de residuos orgánicos, mediante compostaje, digestión anaeróbica para producir biogás o su reutilización como alimento animal, se convierte en un pilar para cerrar los ciclos materiales in situ.

Para transitar hacia una agricultura circular en el desierto implica un rediseño profundo del modelo productivo. Mediante la aplicación de herramientas de evaluación como el ACV, la huella de carbono y la huella hídrica, y adoptando soluciones tecnológicas

innovadoras, es posible diseñar sistemas alimentarios no solo resilientes, sino también regenerativos, que contribuyan de forma decisiva a la seguridad alimentaria global y a la mitigación del cambio climático.

2. Economía Circular

La Economía circular (EC) es un concepto que surge en 1976 bajo el nombre de economía de circuito o lazo (del inglés *looped economy*), la cual se enfoca en desarrollar estrategias industriales que puedan prevenir la generación de residuos, desmaterialización de la economía industrial y mejorar la eficiencia de recursos (Ugalde, 2021). En la actualidad existen bastantes definiciones de EC (Mazur-Wierzbicka, 2021), no obstante, en este documento ésta se define como “Un sistema económico que valora los recursos manteniendo los materiales en uso el mayor tiempo posible, al tiempo que reduce la generación de residuo” (Ferdous et al., 2021), pudiendo operar a nivel micro (productos y empresas), meso (parques ecoindustriales) y macro (ciudad y países) (Zisopoulos et al., 2022). La EC se basa en tres principios fundamentales, los cuales son (a) Preservar y mejorar el capital natural mediante el control de las reservas finitas y el equilibrio de los flujos de recursos renovables; (b) Optimizar el rendimiento de los recursos mediante la circulación de productos, componentes y materiales con la máxima utilidad en todo momento, tanto en los ciclos técnicos como biológicos; (c) Fomentar la eficacia del sistema mediante la identificación y eliminación de las externalidades negativas (Upadhyay et al., 2024). En este sentido, la EC propone realizar una transición desde una Economía Linear (EL) a una circular, ya que en una EL (tradicional) se recolectan materias primas y se transforman en productos que los consumidores utilizan hasta desecharlos como residuos (tomar-fabricar-usar-eliminar), generando esto un impacto ecológico (Chung & Le, 2023), tal como se observa en la Figura 1.

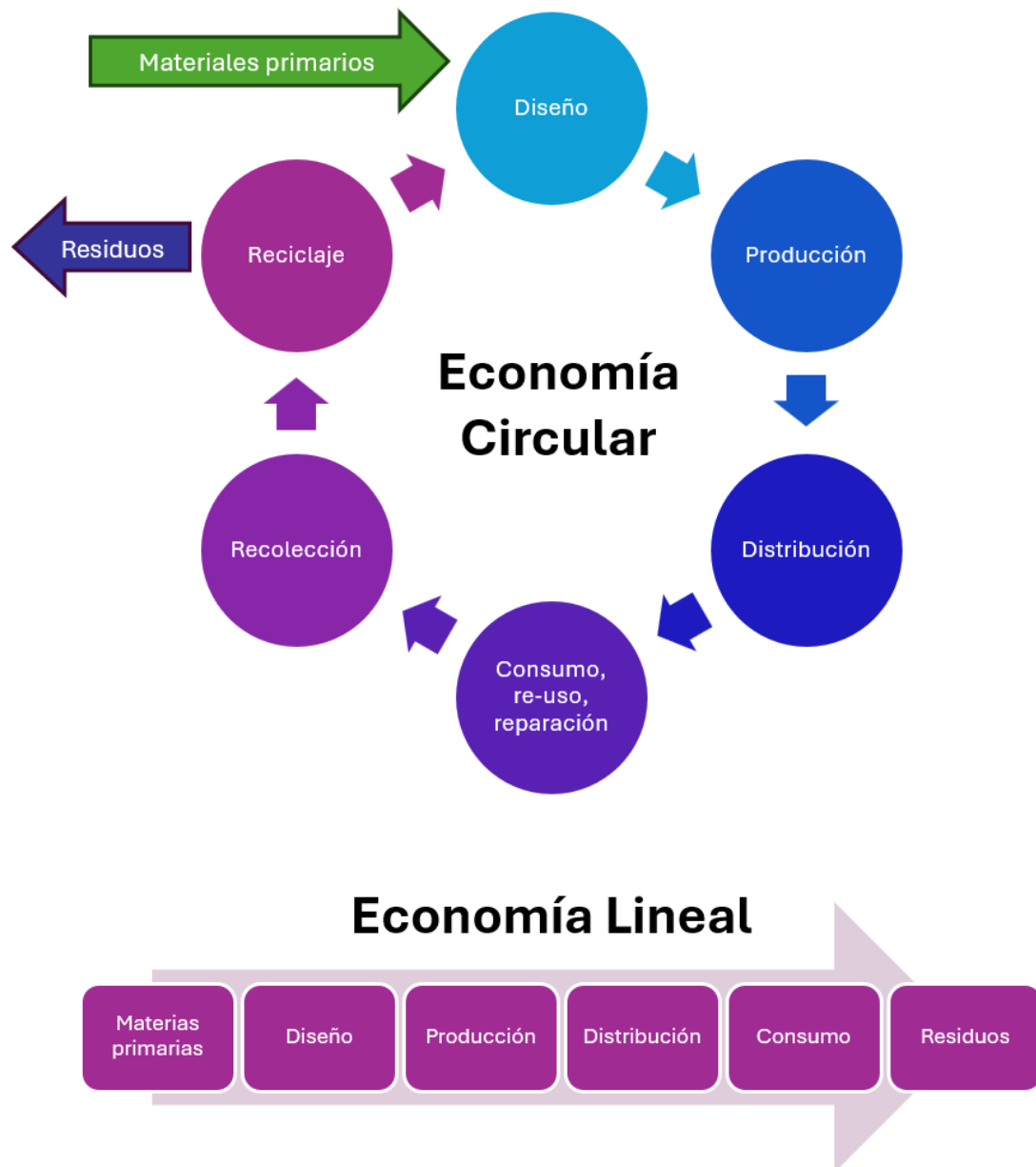


Figura 1. Concepto de Economía Circular y Economía lineal adaptado de (ECCA, 2017)

La EC, a diferencia de EL, prioriza disminuir el ingreso de materiales nuevos en sistemas de producción y reducir la cantidad de residuos producidos en la cadena de valor (ECCA, 2017). La Tabla 1 muestra las diferencias fundamentales entre ambos enfoques económicos, en términos de planificación, límites del sistema, reutilización, modelos de

negocio y tratamiento de los productos al final de su vida útil, en base a la información de Chung & Le (Chung & Le, 2023) (Tabla 1).

Tabla 1 Diferencia entre la economía lineal y circular (Chung & Le, 2023)

N°	Criterio	Economía Lineal	Economía Circular
1	Plan por pasos	Tomar-fabricar-utilizar-descartar	Reducir-reutilizar- reciclar
2	Límites del sistema	A corto plazo, desde la compra hasta la venta	Ciclos de vida múltiples y a largo plazo
3	Reutilización	Reciclaje de baja calidad	Reciclaje de alta calidad, en cascada y super reciclaje
4	Modelo de negocio	Se centra en los productos	Se centra en los servicios
5	Productos que han llegado al final de su vida útil	Invaluable y residuos	Valioso como recurso para su próximo uso

Por otra parte, una de las formas en que la EC ha sido aplicada en las empresas es a través de las estrategias R, actualmente las estrategias se clasifican en 10, siendo estas señaladas en la Tabla 2. Las categorías de la R1 a R3, se enfocan en estrategias en las que pueden utilizarse óptimamente los recursos agrícolas, mientras que R4 a R8 son estrategias que ponen su énfasis en extender la vida útil de los productos. En tanto R9 y R10, son estrategias que se enfocan en una aplicación útil de los recursos, siendo utilizadas en la fase de final de vida útil de los productos (Keeffe et al., 2025; Morsetto, 2020).

Tabla 2. Estrategia de circularidad 10R (adaptado de Morseletto, 2020).

Categoría	Nivel de Circularidad	Estrategia	Definición
Prácticas más inteligentes	R1	Rechazar	Hacer que un producto resulte redundante abandonándolo u ofreciendo la misma función con un producto radicalmente diferente.
	R2	Repensar	Hacer un uso más intensivo de los productos (por ejemplo, compartiendo productos o comercializando productos multifuncionales).
	R3	Reducir	Aumentar la eficiencia en la fabricación o el uso de productos consumiendo menos recursos naturales.
Prolongar la vida útil de los recursos	R4	Reusar	Reutilización por parte de otro consumidor de un producto desechado que aún se encuentra en buen estado y cumple su función original.
	R5	Reparar	Reparación y mantenimiento de productos defectuosos para que puedan utilizarse con su función original.
	R6	Restaurar	Restaurar un producto antiguo y actualizarlo.
	R7	Remanufacturar	Utilizar partes de productos desechados en un nuevo producto con la misma función.
	R8	Readaptar	Utilizar productos desechados o partes de ellos en un nuevo producto con una función diferente.
Aplicación útil de los recursos	R9	Reciclar	Procesar materiales para obtener un producto de la misma calidad (alta calidad) o una calidad inferior (baja calidad).
	R10	Recuperar	Incineración de materiales con recuperación de energía

2.1. Modelos de negocio de negocio circular

Es fundamental que las empresas que quieran aplicar las estrategias de las 10 R puedan conocer que estrategias en concreto pueden utilizar (para ser más sustentables), sin embargo, para esto se necesita un marco estratégico que defina como las empresas pueden crear y entregar un producto/servicio, el cual sustenta una, o más, estrategias de las 10 R. Ante lo anterior, en 2020 la Unión Europea publicó un documento llamado “*Categorization System for the Circular Economy*”, el cual establece 14 categorías de actividades circulares, organizadas en cuatro modelos de negocios (Figura 2). De acuerdo

con European Investment Bank (European Investment Bank, 2020) estos modelos se agrupan en:

- **Modelos de diseño circular:** Se asocia en desarrollar y optimizar la circularidad de productos y procesos existentes, o nuevos a desarrollar.
 - **Modelos de uso óptimo:** Se enfoca en aumentar el valor y el uso de un producto durante una vida útil más prolongada.
 - **Modelos de recuperación de valor:** Se centra en maximizar la recuperación, y reciclaje de productos y materiales en nuevos productos (o recursos) útiles.
- Modelos de apoyo circular:** Se relaciona a la gestión y coordinación de redes de valor circular y los flujos de recursos, y otras actividades de apoyo en una red circular.

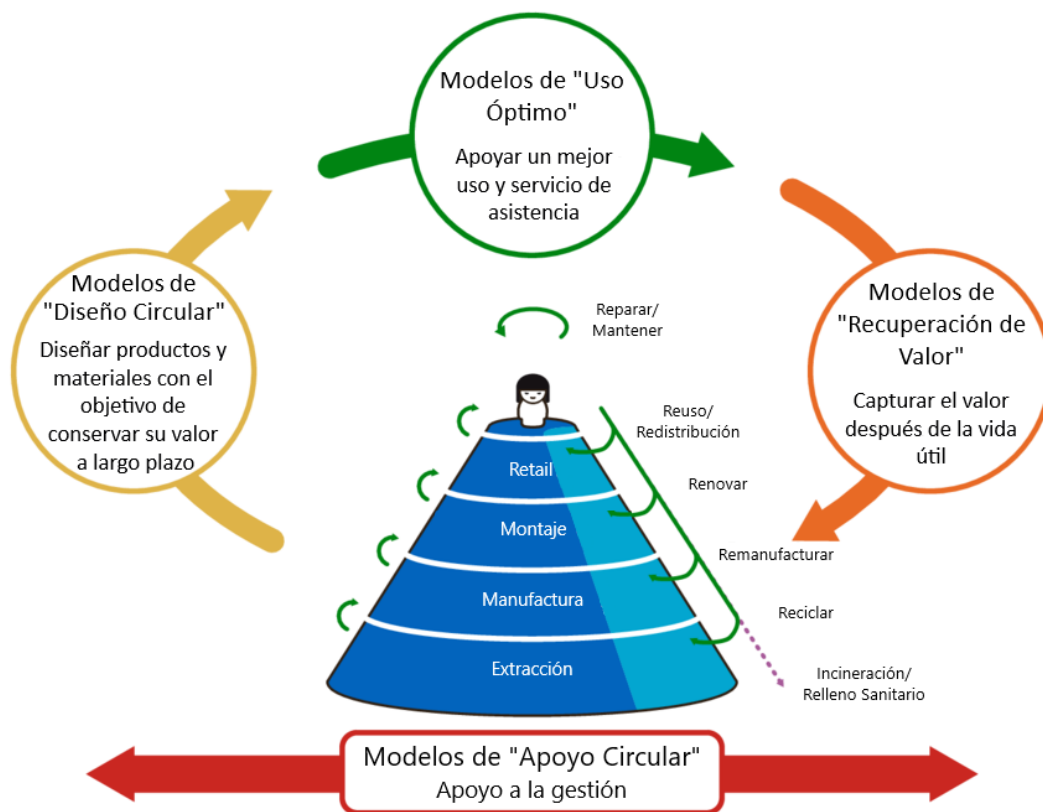


Figura 2. Modelos de economía circular en la cadena de valor. (adaptado European Investment Bank, 2020)

Los modelos de negocio circular son relevantes debido a que puede capturar el valor del producto/servicio al reducir el uso de recursos finitos y manteniendo los productos, materiales y componentes en mayor tiempo posible en ciclos de retorno, y con ello poder

reducir impactos ambientales, ahorrar costos, y generar nuevas fuentes de ingresos (Geissdoerfer et al., 2020). Estos modelos de negocio han sido aplicados en diversas áreas industriales, siendo una de estas el sector de la agricultura.

2.2 Aplicación de la economía circular en la agricultura

La agricultura es una actividad industrial que se caracteriza por trabajar con ecosistemas de la naturaleza para producir productos y servicios, utilizar los ciclos de agua y de nutrientes, manejar recursos como el suelo y agua, manejar sistemas de protección de cultivos, entre otros. La EC se ha puesto en práctica en la agricultura, principalmente para mejorar sus aspectos ambientales y procesos productivos. En este sentido, (Velasco-Munoz et al., 2021) indica que existen cuatro estrategias para adoptar modelos de agricultura circular en la agricultura, la cuales son: (1) estrechar los ciclos de recursos, (2) ralentizar los ciclos de recursos, (3) cerrar los ciclos de recursos, y (4) regenerar los flujos de recursos, describiéndose estos a continuación.

- Estrechar los ciclos de recursos: Se relaciona con mejorar las eficiencias en términos de nutrientes, costos, materiales, mano de obra, energía, capital y externalidades asociadas, como las emisiones de GEI, el agua contaminada o las sustancias tóxicas. Esta estrategia implica generar soluciones ecoeficientes que reducen la intensidad de recursos y los impactos ambientales por unidad de producto o servicio, permitiendo esto mejorar la eficiencia en el uso de materiales y eliminar las fugas de recursos. Un ejemplo de esto sería el uso de agua mediante riego por goteo.
- Ralentizar los ciclos de recursos: Implica prolongar e intensificar el uso de los productos para retener su valor en el tiempo. En este sentido, en el sector agrícola en múltiples ocasiones no es posible extender la vida útil de los recursos destinados a consumos. No obstante, la principal forma usada para desacelerar estos ciclos en la producción de alimentos es evitar que se descarten antes de ser consumidos como alimento, es decir, mantener los nutrientes dentro de la cadena alimentaria. La estrategia de ralentización también se aplica a todas las operaciones necesarias para extender la vida útil de la maquinaria e infraestructura usada en actividades agrícolas. Lo anterior es especialmente relevante en tipos de agricultura altamente técnicas, como la agricultura de invernadero, cultivos hidropónicos y los sistemas de riego por goteo.
- Cerrar los ciclos de recursos: Tiene como objetivo crear nuevo valor a través de la reutilización y el reciclaje de materiales usados. Esta estrategia, pone el foco en usar materiales descartados como reemplazo de materias vírgenes, incluyéndose también acá la producción de compost, bioenergía y uso de agua reusada. La

premisa de esta estrategia es que los costos marginales de usar materiales reutilizables y reciclables pueden ser menores que el uso de materiales vírgenes, pero se debe tener la precaución que los materiales reutilizados/reciclados cumplen con las necesidades técnicas y funcionales requeridas para la generación del producto/servicio a realizar.

- **Regenerar los flujos de recursos:** La regeneración incluye todas las acciones para preservar y mejorar el capital natural. Esta estrategia está vinculada a los recursos biológicos, ya que estos volverán a la tierra en forma de nutrientes al final de su ciclo de vida. Ejemplos de prácticas regenerativas son el uso de fertilizantes orgánicos, la siembra de cultivos de cobertura, la rotación de cultivos, la reducción de la labranza y el crecimiento de más variedades de cultivos para promover la agrobiodiversidad.

Dentro de la aplicación de la circularidad en la agricultura, se puede encontrar también la aplicación de las estrategias de las 10 R, observándose ejemplos de su aplicación en la Tabla 3.

Tabla 3. Ejemplos de aplicación de estrategias 10 R en la agricultura en base a información de Keeffe et al., (2025)

Nivel de Circularidad	Estrategia	Definición
R1	Rechazar	Abandonar el uso de insumos que no son absolutamente necesarios, por ejemplo evitar el uso de pesticidas sintéticos innecesarios
R2	Repensar	Usar en la granja acciones para reducir la necesidad de comprar insumos, como arrendar equipos agrícolas.
R3	Reducir	Optimizar el uso de fertilizantes químicos aplicando su cantidad exacta en el suelos y cultivos, otro ejemplo relevante es la reducción del consumo de agua mediante riego por goteo.
R4	Reusar	Reusó de aguas grises (previo tratamiento) para ser usadas en el riego de cultivos.
R5	Reparar	Arreglar equipos utilizados durante la producción de cultivos, como bombas, mangueras y sistemas de riego automatizado, puede extender la vida útil de estos, y evitar reemplazarlos por otros nuevos.
R6	Restaurar	Restaurar equipo agrícola, como tractores antiguos, a través de la actualización de componente y mejoras mecánicas (acá el producto no necesariamente implica que quede con una calidad de fábrica).
R7	Remanufacturar	Reacondicionar máquinas o aparatos utilizando, por ejemplo, piezas de otros equipos (acá el producto queda con una calidad de fábrica o mejor).
R8	Readaptar	Usar paja o residuos como material de cama para animales.
R9	Reciclar	Uso de residuos, como residuos vegetales y estiércol, para ser utilizado en compostaje.
R10	Recuperar	Utilización de estiércol para producción de biogás en biodigestores, para la generación de calor y/o electricidad.

La circularidad no es una única herramienta, sino un marco de pensamiento y un conjunto de indicadores que miden la eficiencia con la que un sistema agrícola se aproxima a un modelo de circuito cerrado, minimizando el desperdicio y la dependencia de nuevos recursos. En la agricultura del desierto, la circularidad es un imperativo para la resiliencia y la supervivencia, ya que busca valorizar cada recurso y residuo. Una métrica clave de circularidad es la tasa de reutilización de agua, que mide el porcentaje de agua tratada (por ejemplo, aguas residuales de la comunidad local) que se reincorpora al riego. Otro indicador fundamental es el porcentaje de subproductos valorizados, que cuantifica la cantidad de residuos agrícolas (restos de cosecha, estiércol, poda) que se reintroducen en el sistema. En lugar de ser un pasivo, estos residuos se convierten en activos, como el compost que mejora la salud del suelo y reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos. Las métricas de circularidad también pueden evaluar la eficiencia energética, midiendo la dependencia de combustibles fósiles frente al uso de energías renovables, como la energía solar, para el bombeo de agua y la maquinaria agrícola. Al medir y optimizar estas variables, la circularidad se convierte en el motor que impulsa la innovación, transformando los modelos agrícolas en el desierto de lineales y extractivos a regenerativos y sostenibles, garantizando la viabilidad del sector a largo plazo

La EC en la agricultura puede ser aplicada de diferentes formas, dependiendo de la realidad de cada país. En este sentido diversas acciones de gestión se han aplicado en países europeos y Chile, teniendo algunos países aplicaciones similares y otras completamente diferentes (Nowak-Marchewka et al., 2025; Reyes, 2021).

3. La Economía Circular en Europa: Enfoque en la Agricultura

3.1. Fundamentos de la Economía Circular en el Contexto Europeo

Como se menciona anteriormente, la economía circular representa un cambio fundamental en el paradigma económico tradicional, transformando el modelo lineal de "extraer-producir-desechar" hacia un sistema regenerativo donde los recursos mantienen su valor durante el mayor tiempo posible. En Europa, este concepto ha cobrado especial relevancia a través del Pacto Verde Europeo (Fetting, 2020), una estrategia integral que busca hacer de la Unión Europea alcance la neutralidad climática para 2050. Dentro de este marco se establecen directrices claras para la transición hacia una economía que maximice la eficiencia en el uso de recursos, minimice la generación de residuos y promueva la reutilización, reparación y reciclaje como pilares fundamentales.

La Unión Europea ha desarrollado dos planes de acción específicos, en 2015 el “Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular” (Comisión Europea, 2015) y su actualización en 2020, “Un nuevo Plan de Acción de Economía Circular para una Europa más limpia y competitiva” (Comisión Europea, 2020), que establecen objetivos ambiciosos para todos los estados miembros y sectores económicos. Para poder impulsar e implementar el desarrollo de la economía circular en la agricultura europea, se han creado fondos a los cuales las empresas pueden postular para poder desarrollar proyectos de innovación y desarrollo, ya sea a una escala experimental o mediante una tecnología sólidamente trabajada, siendo algunos de estos programas mostrados a continuación.

- **Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER/):** Financia actividades asociadas a la mejora de la sostenibilidad social, medioambiental y económica de las zonas rurales. Este fondo orienta sus inversiones a favorecer el desarrollo de las regiones más desfavorecidas, y a la reconversión de las regiones industriales en declive (Ministerio de Hacienda, 2025). Por otra parte, tiene tres objetivos a largo plazo, siendo el primero la mejora de la competitividad de la agricultura y la silvicultura, el segundo la gestión sostenible de los recursos naturales y promover la acción climática, mientras que el tercero se enfoca en lograr un desarrollo territorial equilibrado de las economías y comunidades rurales (Unión Europea, 2022). Los países de la UE que implementan la financiación del FEADER lo deben hacer a través de programas de desarrollo rural (PDR), y pueden elaborarse a nivel nacional o regional. También cada PDR debe trabajar en al menos cuatro de las siguientes seis prioridades del FEADER, tal como es señalado por (European Commission, 2025a):
 - Fomentar la transferencia de conocimientos y la innovación en la agricultura, la silvicultura y las zonas rurales.
 - Mejorar la viabilidad y la competitividad de todos los tipos de agricultura y promover tecnologías agrícolas innovadoras y la gestión forestal sostenible.
 - Promover la organización de la cadena alimentaria, el bienestar animal y la gestión de riesgos en la agricultura.
 - Promover la eficiencia de los recursos y apoyar la transición hacia una economía baja en carbono y resiliente al clima en los sectores agrícola, alimentario y forestal.
 - Restaurar, preservar y mejorar los ecosistemas relacionados con la agricultura y la silvicultura.
 - Promover la inclusión social, la reducción de la pobreza y el desarrollo económico en las zonas rurales.

El FEADER puede financiar acciones como inversiones productivas, apoyo en prácticas agrícolas sostenibles, diversificación de la economía rural, y cooperación, formación y desarrollo de capacidades rurales.

- **Horizonte Europa:** Es el principal programa de financiamiento de la Unión Europea para la investigación y la innovación. Éste facilita la colaboración y refuerza el impacto de la investigación y la innovación en el desarrollo, y apoya la creación y una mejor difusión de conocimientos y tecnologías. El programa puede financiar iniciativas asociadas I+D en bioeconomía y circularidad, transformación de cadenas agroalimentarias en modelos circulares, uso de biomasa y residuos agrícolas, proyectos de escalamiento y pilotaje, cultivos respetuosos con la biodiversidad, entre otros (European Commission, 2025b). Ejemplo de un proyecto financiado por este fondo es PHAntastic, el cual tiene como objetivo sustituir los plásticos agrícolas de uso generalizado por versiones de origen biológico y completamente biodegradables basadas mediante un polímero obtenido a partir de residuos agroalimentarios.
- **Programa LIFE:** Este instrumento de financiación de la UE se enfoca en apoyar a proyectos asociados a medio ambiente y la acción climática, y su objetivo general es contribuir a la implementación, actualización y desarrollo de la política/ legislación medioambiental y climática de la UE, a través de la cofinanciación de proyectos con valor añadido europeo. LIFE cuenta con 4 subprogramas, en el cual uno de ellos se encuentra asociado a economía circular y calidad de vida. En este sentido, este subprograma puede financiar proyectos relacionados a economía circular que valorizan residuos, recuperación de nutrientes desde residuos o aguas residuales, innovación y mejoras para gestión de recursos, y pilotajes que muestren soluciones circulares efectivamente útiles (MITECO, 2025). Ejemplo de un proyecto que es financiado por este fondo fue el LIFE Enrich, el cual se basó en la recuperación de nutrientes de aguas residuales para utilizar como fertilizantes para usos agrícolas.
- **Fondo Europeo de Bioeconomía Circular (FEBEC):** Es un fondo de capital riesgo privado, iniciado por la UE y respaldado por el Banco Europeo de Inversiones (BEI). Este instrumento está dedicado exclusivamente a invertir en empresas en fase de crecimiento de la bioeconomía europea, incluida la bioeconomía circular, y respalda a empresas con un alto potencial de innovación, rentabilidad favorable e impacto sostenible (ECBF, 2025). Las inversiones se centran en empresas o proyectos con un nivel de preparación tecnológica (TRL) de 6 a 9 y alguna tracción comercial inicial significativa, siendo uno de sus sectores industriales objetivos el sector agrícola y alimentario (ECBF, 2019). Un ejemplo de una empresa financiada

por este fonde fue RED Horticulture, el cual ofrece soluciones de iluminación LED fotobiológica para invernaderos, lo que reduce el consumo de energía. Estas luces LED utilizan tecnología basada en inteligencia artificial para activar los fotorreceptores de las plantas, lo que se traduce en mayores rendimientos.

- **European Investment Bank (EIB):** Es una entidad financiera cuyo principal objetivo en los países en desarrollo es proporcionar financiación y experiencia para proyectos de inversión sólidos y sustentable, enfocándose tanto en el sector privado como en el público (EIB, 2025b, 2025a). El EIB puede financiar proyectos de agricultura asociados a infraestructura de tratamiento o valorización de biomasa, modernización de agroindustrias y apoyo en proyectos de bioeconomía y tecnologías verdes (EIB, 2022, 2024). Un ejemplo de financiación mediante esta entidad fue el préstamo de 90 millones de euro que el EIB firmó con la Junta de Extremadura, para realizar inversiones en infraestructuras rurales básicas, medidas de prevención y recuperación ante desastres naturales, y protección y uso sostenible de los recursos naturales (EIB, 2025c).

Por otra parte, existen estrategias y marcos regulatorios asociados a la aplicación de la EC para la agricultura, los cuales permiten dar directrices o regulaciones asociados por ejemplo al uso de fertilizantes, gestión de residuos, entre otros, siendo estos presentados a continuación:

- **European Green Deal → Farm-to-Fork:** Según información de European Union (2020), la Estrategia «De la Granja a la Mesa» es fundamental en el Pacto Verde Europeo, cuyo objetivo es lograr sistemas alimentarios justos, saludables y respetuosos con el medio ambiente. Este tiene como objetivo acelerar la transición hacia un sistema alimentario sostenible que permita:
 - Tener un impacto ambiental neutro o positivo
 - Ayudar a mitigar el cambio climático y a adaptarse a sus efectos
 - Revertir la pérdida de biodiversidad
 - Garantizar la seguridad alimentaria, la nutrición y la salud pública, asegurando que todas las personas tengan acceso a alimentos suficientes, seguros, nutritivos y sustentable
 - Preservar la asequibilidad de los alimentos, generando al mismo tiempo una rentabilidad económica más justa

Esta estrategia permite en términos de economía circular reducir el desperdicio de alimentos, utilizando alimentos que no pueden ser consumidos para su valorización como alimentos para animales, uso en compostaje o para generación de biogás.

Además, fomenta el uso de fertilizantes orgánicos y bioplaguicidas (o control biológico de plagas), para permitir la reducción de plaguicidas y fertilizantes sintéticos.

- **Common Agricultural Policy (CAP):** Es una asociación entre Europa y sus agricultores, que garantiza un suministro estable de alimentos, preserva los ingresos de los agricultores, protege el medio ambiente y mantiene el dinamismo de las zonas rurales (Comisión Europea, 2025b). La CAP es el principal marco de políticas agrícola, y desde 2023 se orienta a un modelo más circular. Este programa se financia a través de dos fondos del presupuesto de la UE, siendo estos el Fondo Europeo de Garantía Agrícola (EAGF) y el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (EAFRD) (Institute for Government, 2017). Por otra parte, Comisión Europea (2025a) señala que los objetivos principales del CAP son:
 - Aumentar la productividad agrícola para garantizar un suministro estable de alimentos asequibles.
 - Garantizar un nivel de vida justo y unos ingresos estables para los agricultores.
 - Estabilizar los mercados y garantizar la disponibilidad de suministros.
 - Contribuir a la lucha contra el cambio climático y a la gestión sostenible de los recursos naturales.
 - Preservar las zonas y los paisajes rurales de toda la UE promoviendo el empleo y el crecimiento.
- **Reglamento de Productos Fertilizantes:** Esta normativa establece un marco armonizado para el comercio de fertilizantes dentro de la UE, incluyendo abonos, enmiendas del suelo, bioestimulantes y otros productos afines. Este reglamento contempla criterios de calidad, seguridad y protección medioambiental sobre fertilizantes. También, impulsa la innovación y la competitividad del sector fertilizante mediante la incorporación de nuevas categorías de productos (incluyendo bioestimulantes), la regulación de subproductos reutilizables y la aplicación de requisitos de etiquetado y trazabilidad, todo ello con la finalidad de garantizar un elevado nivel de protección de la salud humana y del medio ambiente en toda la UE Reglamento (EU) 1009 (2019).
- **Directivas de residuos / marco de fin de residuo (Waste Framework Directive):** Es la normativa europea de gestión de residuos, el cual establece un marco para la gestión y tratamiento de residuos de la UE. El marco tiene como objetivo proteger el medio ambiente y la salud humana, enfocando la importancia de una gestión adecuada de residuos, la recuperación y las técnicas de reciclaje para reducir la presión sobre los recursos. En este sentido, el marco este se relaciona con la agricultura en la valorización de residuos agrícolas y subproductos como recursos,

fomento del reciclaje y reutilización sobre la eliminación, claridad legal sobre el “fin de residuo” (end-of-waste) (European Commission, 2025c).

- **Uso de lodos de aguas residuales en la agricultura:** Esta directiva permite el uso de lodos de plantas de tratamientos en la agricultura (debido a su contenido de nutrientes), y establece que los lodos deben ser tratados para reducir su carga sanitaria, y especifica límites para el contenido de metales pesados (ej. cadmio, plomo, níquel, entre otros). Esta normativa señala que los lodos deben ser tratados mediante un proceso biológico, químico o térmico para reducir riesgos sanitarios antes de ser entregados al agricultor. Además, indica restricciones para el uso de lodos en zonas de pastizales y en suelos destinados a cultivos de hortalizas o frutas que estén normalmente en contacto directo con el suelo, y que se consuman normalmente en estado crudo (Directiva 278/CEE, 1986).
- **Uso de aguas reusadas:** Establece requisitos mínimos de calidad para el agua reutilizada y establece categorías de cultivos con diferentes niveles de tratamiento según el riesgo para la salud. Esta normativa establece clases de calidad de agua (A, B, C y D) según el tipo de cultivo y el método de riego, estableciendo límites para parámetros como *E. coli.*, DBO5, turbidez, entre otros. Además, señala que se debe elaborar un plan de gestión del riesgo que permita determinar agentes peligrosos y de riesgo, y medidas preventivas apropiadas. Por otra parte, este reglamento permite fomentar la economía circular ya que permite reducir el consumo de agua de fuentes convencionales, especialmente en zonas con escasez hídrica (Reglamento (UE) 741, 2020).

3.1.1. España: Estrategias y Compromisos

En este contexto general del pacto verde dentro de la Unión Europea (UE), España ha respondido a este desafío europeo mediante la implementación de políticas centradas en la Estrategia Española de Economía Circular "España Circular 2030" (MITECO, 2020). Esta estrategia sienta las bases para un nuevo modelo de producción y consumo donde el valor de productos, materiales y recursos se mantienen en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo la generación de residuos y valorizando aquellos que son inevitables. El marco institucional se complementa con el Pacto por la Economía Circular, una iniciativa pionera impulsada inicialmente por los Ministerios de Agricultura y Economía (actualmente bajo la coordinación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico) que ha logrado la adhesión de más de 400 entidades desde su creación en septiembre de 2017 (MITECO, 2017). Este pacto busca implicar a los principales agentes económicos y sociales en la transición hacia un modelo sostenible, estableciendo compromisos específicos que van desde la reducción del uso de recursos no renovables

hasta la promoción del consumo responsable y la evaluación de impactos sociales y ambientales empresariales.

3.1.2. Líneas de acción del pacto por la economía circular en España

Entre las medidas más significativas se encuentra la reducción del uso de recursos no renovables mediante la incorporación de materias primas secundarias provenientes de residuos, el fomento del ecodiseño y análisis de ciclo de vida que facilite la reparación y valorización final de productos, y la aplicación rigurosa de la jerarquía de residuos que prioriza la prevención, reutilización, reciclaje y trazabilidad. Asimismo, se promueve la innovación en eficiencia productiva a través de sistemas de gestión ambiental y procesos sostenibles, el impulso del consumo sostenible incluyendo productos sostenibles y soluciones digitales, y la promoción del consumo responsable con información transparente sobre duración y eficiencia de productos. Adicionalmente se establecen como medidas el fortalecimiento de la colaboración entre administraciones, sector científico y agentes económicos y sociales, la sensibilización social sobre la transición de la economía lineal a la circular, el establecimiento de indicadores comunes para medir avances, y la evaluación de impactos sociales y ambientales empresariales más allá de los beneficios económicos inmediatos.

3.1.3. Aplicación de la Economía Circular en la Agricultura Española

Las líneas de acción del Pacto por la Economía Circular en España se reflejan claramente en la agricultura, donde la gestión eficiente de recursos y residuos es esencial para la sostenibilidad. Prácticas como el uso de compost, el riego con agua regenerada o el diseño de envases biodegradables ejemplifican la aplicación del ecodiseño y la valorización de materiales. Estas acciones fortalecen una agricultura más sostenible, competitiva y coherente con los objetivos ambientales y sociales promovidos por la economía circular (Tabla 4).

Tabla 4. Líneas de acción adaptada del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2017)

Nº	Principio	Ejemplo en agricultura
1	Reducción del uso de recursos no renovables y uso de materias primas secundarias	Favorecer el uso responsable de compost o biofertilizantes a partir de restos de cosecha o estiércol. Reutilización de agua regenerada para riego, o sistemas de recirculación de agua para sistemas cerrados. Fomento de la maximización de plásticos agrícolas, búsqueda de alternativas de reciclados para acolchados o invernaderos. Diseño de envases biodegradables o reutilizables. Evitando los de un solo uso.
2	Ecodiseño y análisis de ciclo de vida	Uso eficiente de maquinaria agrícola, optimizada para sus labores. Sistemas de riego y fertilización de precisión que minimicen el uso insumos y pérdidas. Priorizar la planificación de cultivos para reducir desperdicio de cualquier tipo de insumo.
3	Jerarquía de residuos (prevención, reutilización, reciclaje, trazabilidad)	Maximizar la reutilización de insumos de un solo uso (Ej. bolsas y macetas de plantación) Identificar fuentes de reciclaje, tales como envases plásticos de fertilizantes o agroquímicos. Aplicar trazabilidad en el registro del destino de residuos agrícolas, con el fin de optimizar anualmente.
4	Innovación en eficiencia productiva y gestión ambiental	Agricultura de precisión, junto con el manejo de datos para la optimización de insumos. Fomento de sistemas agroforestales mixtos me mejoren la resiliencia y sostenibilidad.
5	Impulso del consumo sostenible y soluciones digitales	Incentivo de consumo de productos locales de temporada. Desarrollo de plataformas digitales que informan sobre origen y sostenibilidad. Desarrollo de las cadenas de valor, a través del establecimiento de redes de reciclaje.
6	Promoción de la producción y consumo responsable	Implementación de etiquetado de los métodos de cultivo y eficiencia de recursos, con el fin de fomentar las empresas que tengan un mejor perfil ambiental. Incentivos en la educación sobre conservación de alimentos para reducir desperdicio.
7	Fortalecimiento de colaboración entre administraciones, ciencia y agentes económicos	Fortalecimiento de proyectos inter-universidades, cooperativas y empresas agrícolas. Incentivos a programas públicos de innovación en economía circular aplicada a agricultura.
8	Sensibilización social y educación	Creación de campañas sobre desperdicio de alimentos y reciclaje de residuos agrícolas a nivel empresa y domiciliario. Formación de agricultores en prácticas sostenibles y uso eficiente de recursos.
9	Establecimiento de indicadores y evaluación de impactos	Medición de huella de carbono y agua en cultivos y productos agrícolas. Evaluación de impactos ambientales de explotaciones más allá de la rentabilidad económica.

En el sector agrícola español, la implementación de estos principios, han adquirido una importancia estratégica dada la relevancia del sector primario en la economía nacional, enfocándose en la optimización del uso de recursos. Un ejemplo de esto son los recursos hídricos, los cuales mediante sistemas de riego eficientes y la reutilización de aguas residuales tratadas. Por otra parte, la gestión integral de residuos orgánicos agrícolas transformándolos en compost y biofertilizantes que se reincorporan al ciclo productivo, y la implementación de prácticas agrarias sostenibles que preservan la salud del suelo y promueven la biodiversidad. Además, se fomenta la integración de energías renovables en las explotaciones agrícolas, especialmente la energía solar y biomasa, la diversificación de cultivos para reducir la dependencia de insumos externos, y el desarrollo de cadenas alimentarias locales que minimizan el transporte y fortalecen la economía rural. El sector también está adoptando tecnologías digitales para optimizar el uso de fertilizantes y pesticidas mediante agricultura de precisión, reduciendo así el impacto ambiental mientras mantiene la productividad.

3.2. Economía Circular en la Agricultura Chilena

En el escenario actual, donde el sector agrario ha cobrado una relevancia económica creciente se abre una oportunidad estratégica para liderar la transición hacia un modelo circular. Esto implica repensar los sistemas de producción agrícola para que los residuos orgánicos se transformen en insumos, se promueva el uso eficiente de recursos, y se fomente la innovación en el diseño de productos y procesos que minimicen el impacto ambiental.

La economía circular en la agricultura no solo puede mejorar la competitividad del sector, sino también fortalecer la resiliencia frente al cambio climático, generar empleo verde y contribuir a los compromisos internacionales de sostenibilidad asumidos por Chile. Para lograrlo, es fundamental articular esfuerzos entre el Estado, el sector privado, la academia y las comunidades rurales, promoviendo políticas públicas, incentivos económicos y programas de capacitación que faciliten esta transformación.

A nivel global Chile presenta importantes avances a nivel de sostenibilidad, como la creación del Ministerio del Medio Ambiente y la implementación de Acuerdos de Producción Limpia (APL). En este sentido, particularmente la agricultura chilena juega un rol fundamental en la sostenibilidad a nivel país. Ésta ha avanzado en prácticas sostenibles, como el uso de tecnologías de riego eficiente o prácticas de agricultura orgánica, pero se requiere una consolidación institucional más robusta para integrar plenamente la economía circular en el sector agroalimentario.

En la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático (ASCC) desde la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) es posible encontrar las APL que hoy se están implementando en Chile. Es posible evidenciar una estrategia central basada en los pilares de la sostenibilidad (ambiental, económico y ambiental) que impulsan la sostenibilidad empresarial mediante un enfoque triple. En lo ambiental, optimizan el uso de agua y energía, gestionan residuos y reducen emisiones. En lo económico, aumentan la eficiencia productiva y el acceso a mercados mediante certificaciones. En lo social, mejoran las condiciones laborales, capacitan a los trabajadores y fortalecen la relación con las comunidades. Aplicados sistemáticamente en sectores frutícolas y hortícolas.

Su fortaleza reside en la integración holística de los tres pilares de la sostenibilidad, materializados a través de objetivos operativos concretos y repetitivos que aseguran la cohesión del modelo.

3.2.1. Pilar Ambiental: Eco-Eficiencia y Regeneración

El enfoque ambiental es el más desarrollado en los APL, y se articula en torno a la minimización del impacto negativo y la optimización de recursos, yendo más allá del simple cumplimiento legal.

- **Gestión Hídrica y Energética:** La "optimización del consumo de agua y energía" es un objetivo universal. No se trata solo de ahorrar, sino de implementar sistemas de eficiencia que reduzcan la presión sobre recursos escasos, crucial para la adaptación al cambio climático.
- **Economía Circular de Residuos:** El objetivo de "prevenir, reducir y valorizar residuos sólidos y líquidos" es constante. Se evoluciona de la eliminación a la gestión, buscando transformar los residuos en subproductos (compost, biogás), cerrando ciclos y reduciendo la contaminación.
- **Agroecología y Salud del Suelo:** La implementación del "Manejo Integrado de Plagas (MIP)" y la "mejora de la fertilidad y calidad de suelos" son fundamentales. Esto reduce la carga de agroquímicos, protege la biodiversidad (incluyendo polinizadores, como se especifica en un APL) y construye resiliencia en los ecosistemas productivos.
- **Protección Atmosférica:** Objetivos como "disminuir las emisiones de GEI" y "mitigar emisiones atmosféricas" vinculan directamente la actividad frutícola con la acción climática, un aspecto de alta relevancia en mercados globales.
-

3.2.2. Pilar Económico: Competitividad y Valor Agregado

La sostenibilidad económica se entiende como la consecuencia directa de una mayor eficiencia y un posicionamiento estratégico en el mercado.

- **Eficiencia Productiva:** La "optimización de insumos" (agua, energía, fitosanitarios, fertilizantes) reduce costos operativos de manera directa, aumentando la rentabilidad.
- **Acceso a Mercados y Diferenciación:** Objetivos como "fortalecer la competitividad y exportaciones" y la búsqueda de "sellos de producción limpia (APL, orgánico, Huella de Carbono)" son clave. Estos acuerdos actúan como un pasaporte para mercados internacionales cada vez más exigentes en estándares ambientales y sociales.
- **Incorporación de Tecnología y Gestión:** La "incorporación de herramientas de gestión e indicadores de sustentabilidad" y de "nuevas tecnologías" proveen un lenguaje común para medir el desempeño y tomar mejores decisiones empresariales.
-

3.2.3. Pilar Social: Capital Humano y Licencia Social para Operar

El componente social asegura que la transición sostenible sea justa y genere valor para las personas directamente involucradas y las comunidades aledañas.

- **Higiene y Seguridad Laboral:** "Mejorar las condiciones de higiene y seguridad" es un pilar social omnipresente. Se busca reducir accidentes y enfermedades profesionales mediante sistemas de gestión preventiva, valorando el capital humano.
- **Capacitación Continua:** "Implementar acciones de capacitación" para productores y trabajadores es el mecanismo para internalizar la cultura de la sostenibilidad y asegurar la correcta implementación de las nuevas prácticas.
- **Relación con la Comunidad:** Objetivos como "mejorar la relación con el entorno y comunidades locales" (explícito en el APL de Cerezos) y, de manera más avanzada, "capacitar en su rol en el respeto de los Derechos Humanos" (APL Berries Los Ríos), reflejan una comprensión madura de la "licencia social para operar". Esto es vital para la sostenibilidad a largo plazo y la gestión de riesgos reputacionales.

Es posible ver una clara relación con las estrategias planeadas a nivel europeo, en particular con España respecto a las medidas implementadas en Chile. Estas medidas pueden ser enfocadas en sectores específicos de la agricultura en función de las necesidades específicas de los agricultores.

Chile cuenta con una amplia diversidad de regiones climáticas, el presente informe se centra en la agricultura del desierto. Donde es posible aplicar las aplicaciones antes mencionadas, implementando estrategias circulares innovadoras para optimizar sus limitados recursos. La gestión hídrica circular, con reutilización del 90% de aguas

residuales tratadas, tecnologías de riego de precisión como el goteo, y desalinización, son alternativas potencialmente aplicables.

Por otro lado, la valorización residuos agrícolas, como el compostaje, uso de biochar y biofertilizantes, pueden mejorar la fertilidad y retención hídrica de suelos áridos mientras reducen la dependencia de insumos sintéticos. La integración de tecnologías como agricultura vertical, acuaponía y sistemas hidropónicos con captación de agua atmosférica crea ciclos cerrados que recirculan nutrientes y agua. Estos sistemas, monitoreados con sensores IoT (Internet de las cosas - Internet of the Things), maximizan la eficiencia recursos minimizando pérdidas, estableciendo modelos productivos resilientes que convierten limitaciones desérticas en oportunidades de agricultura sustentable mediante la circularidad de recursos.

3.3. Herramientas de la UE y sus puentes en Chile

Este apartado vincula instrumentos del enfoque europeo de economía circular con sus equivalentes o vías de implementación en Chile, destacando su utilidad para MIPYMEs agrícolas. El objetivo es identificar qué instituciones nacionales cumplen funciones similares y qué ajustes son necesarios para que estas herramientas operen en un contexto donde predominan restricciones de escala, capacidades de gestión y acceso a mercado.

3.3.1. Fondos tipo FEADER: Desarrollo rural, competitividad y sostenibilidad

En Europa, los fondos tipo FEADER financian sostenibilidad, competitividad rural y cooperación, facilitando inversiones y modernización productiva. En Chile, el instrumento más cercano es INDAP, que combina fomento, cofinanciamiento y asesoría técnica para pequeños productores y organizaciones rurales, incluyendo líneas de transición sostenible e innovación predial. Para MIPYMEs, esto se traduce en inversiones prediales concretas (como compostaje, acopio, tecnificación de riego, manejo de suelos o mejoras energéticas) siempre acompañadas de asistencia técnica, ya que la adopción en pequeña escala depende de capacitación y soporte operativo. A diferencia de Europa, donde existe una arquitectura regional robusta para ejecutar estos fondos, en Chile suele funcionar mejor un “paquete” integrado que combine inversión + asesoría + articulación comercial. Esto responde a que la principal barrera no es solo financiera: también inciden la capacidad de ejecución, el cumplimiento normativo, la logística disponible y la existencia de compradores o canales que sostengan la inversión.

3.3.2. Horizonte Europa: I+D+i y pilotaje

Horizonte Europa impulsa investigación aplicada, pilotos y escalamiento tecnológico con foco en resultados. En Chile, el puente más directo es FIA, que promueve innovación ligada a recursos hídricos, cambio climático y sistemas alimentarios sostenibles, muy pertinente para circularidad en agricultura. En MIPYMEs, la aplicación típica se expresa en pilotos y validación de soluciones como bioinsumos, valorización de subproductos (orujo, vinaza, podas), envases sostenibles o tecnologías de eficiencia hídrica.

El ajuste crítico en Chile es evitar que los proyectos queden en la etapa piloto. Para superar el “valle de la muerte” entre prueba y adopción, se recomienda conectar tres componentes: piloto demostrativo + apoyo a la adopción operativa + comprador ancla (cooperativa, agroindustria o exportadora) que asegure demanda y escalabilidad.

3.3.3. Farm-to-Fork: sistemas alimentarios sostenibles

Farm-to-Fork busca reducir desperdicios, valorizar orgánicos (feed/compost/biogás) e impulsar bioinsumos. En Chile, esto se alinea con el rol de FIA en sistemas alimentarios sostenibles y con la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO) al 2040, que promueve masificación del compostaje/vermicompostaje e infraestructura para valorización. En MIPYMEs, los modelos circulares más directos siguen tres rutas: orgánicos a compost/biofertilizantes; subproductos energéticos a biogás; y mermas a alimentación animal o ingredientes, según el rubro.

El principal ajuste para Chile es logístico y territorial: la dispersión geográfica y la estacionalidad agrícola obligan a organizar acopio, pretratamiento y coordinación entre actores (cooperativas, asociaciones, municipios). Sin esa cooperación, los costos por tonelada suelen impedir la viabilidad económica.

3.3.4. Waste Framework: fin de residuo

En Europa, el enfoque “fin de residuo” entrega jerarquía de manejo y claridad legal para que ciertos residuos se conviertan en productos o materias primas secundarias. En Chile, el puente principal es la Ley REP (20.920), que establece obligaciones, metas y trazabilidad mediante sistemas de gestión; además, la Hoja de Ruta Chile Circular promueve ajustes regulatorios para facilitar reutilización y valorización. Para MIPYMEs agrícolas, esto implica formalizar la gestión de residuos prioritarios (p. ej., plásticos

agrícolas, envases, aceites) y vincularse a sistemas REP para reducir costos de disposición y riesgos regulatorios.

La adaptación clave es que en agricultura una gran fracción de los residuos es orgánica o biomasa estacional. Por ello, la valorización requiere normas técnicas y sanitarias claras (calidad, inocuidad, metales, patógenos) y trazabilidad que respalde el uso seguro y aceptado por el mercado.

3.3.5. Uso de aguas reusadas

La normativa europea (UE 2020/741) define estándares mínimos por tipo de cultivo y método de riego, e incorpora planes de gestión de riesgo. En Chile, la regulación es parcial: existe marco para aguas grises (Ley 21.075 y su reglamento sanitario), pero para el reúso agrícola de aguas servidas tratadas (AST) aún se reconocen brechas y discusión normativa. En la práctica, la referencia técnica para calidad de agua de riego se apoya en la NCh 1333.

Para acercarse a una lógica similar a la europea, se requieren dos elementos: (i) estándares de calidad específicos por uso agrícola (cultivo y método de riego) y (ii) un plan de gestión de riesgo replicable, idealmente en formato simple para MIPYMEs. Esto es importante porque el marco vigente se concentra en aguas grises y no habilita de manera completa el reúso agrícola de AST, lo que limita el escalamiento de soluciones de circularidad hídrica.

4. Estrategias de Economía Circular para la Agricultura en Zonas Áridas de Chile

La agricultura chilena avanza hacia una economía circular al dejar el modelo lineal y transformar residuos en recursos mediante un enfoque regenerativo. Este cambio es especialmente relevante en zonas áridas, donde la escasez hídrica exige maximizar la eficiencia en el uso de insumos críticos como agua y materia orgánica.

Entre las prácticas clave destaca el compostaje, que transforma restos de cosechas, estiércol y subproductos (ej. Biofertilizantes). Esta técnica mejora la estructura del suelo, incrementa su capacidad de retención hídrica y reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, cuya producción demanda altos consumos de agua y energía. Asimismo, la gestión integral de residuos busca reincorporar subproductos como restos de poda al ciclo productivo y generar sinergias intersectoriales, por ejemplo, utilizando residuos agroindustriales.

La tecnología aplicada a la eficiencia es crucial para mejorar la sostenibilidad de la producción agrícola, en este sentido los sistemas de riego por goteo y sensores de humedad permiten optimizar el uso del agua, mientras que la incorporación de energía solar para bombeo reduce costos y dependencia de combustibles fósiles. Estas estrategias no solo fortalecen la sostenibilidad y resiliencia del sector agrícola, sino que también posicionan a Chile como referente en producción responsable en entornos áridos.

4.1. Tecnología y Eficiencia de Insumos

- Riego por goteo

La adopción de tecnologías de agricultura de precisión resulta esencial para mejorar la eficiencia en el uso de recursos, especialmente en contextos de escasez hídrica. El riego por goteo se consolida como una de las técnicas más eficaces en la gestión del agua agrícola, al permitir su aplicación directa en la zona radicular de las plantas. Evan & Sadler (2008) señala que esta técnica de riego presenta una gran precisión, reduce significativamente las pérdidas por evaporación y al utilizarse en una amplia gama de terrenos, ha permitido su expansión para su uso en cultivos de riego en áreas con suelos problemáticos (ya sean tasas de infiltración muy bajas o altas), suelos afectados por la salinidad y agua de mala calidad que no se puede aprovechar con otros métodos de riego. Por otra parte, puede instalarse como un sistema de aplicación de agua superficial o subterráneas, sin embargo, los requisitos para su diseño y gestión adecuados varían considerablemente entre zonas húmedas y áridas, por lo que la tecnología y las técnicas adecuadas en una zona pueden no funcionar en otras. El riego por goteo tiene también la

ventaja de que puede ser aplicado a pequeña, mediana y gran escala, lo cual representa una gran oportunidad para las MIPYMEs agrícolas que deseen utilizar esta tecnología en sus actividades. También otras técnicas pueden complementarse al riego por goteo para mejorar el uso del agua en cultivos, siendo algunos de esto los sensores de humedad en suelos, los cuales pueden ser programados para entregar un riego basado en las necesidades del cultivo (Loconsole et al., 2025), y el riego deficitario, el cual aplica de una manera controlada una cantidad de agua por debajo de las necesidades totales del cultivo, y en momentos específicos (Ferrerres & Soriano, 2007). Actualmente, el uso de agua por goteo en la agricultura chilena se rige por la norma NCh 1333/78, la cual señala directrices como la calidad que debe tener el recurso hídrico para ser usado en cultivos. También, existen incentivos del Estado que pueden financiar hasta el 90% del costo del proyecto de riego por goteo, siendo la Ley 18.450/85 un elemento fundamental para este financiamiento (CNR, 2020). Respecto a los costos del riego por goteo, dependerán del tipo de cultivo, de la tecnología disponible, la topografía del terreno y el tipo de cultivo que se producido, pero estudios señalan que puede tener un costo entre 1500 a 5000 USD/ha*año (FAO, 1997; Rivulis, 2013; RMCG, 2018).

Las MIPYMEs de agricultura emplazadas en zonas áridas pueden implementar la estrategia de riego por goteo para poder mejorar su productividad. Lo anterior, debido a que este tipo de riego puede maximizar la eficiencia del uso de agua en zonas de escasez hídrica (debido a su mayor control) y reducir costos de operación. Además, es una estrategia hídrica que se encuentra ampliamente disponibles y que cuenta con incentivos estatales que pueden facilitar su implementación. También, el este riego puede ayudar mucho a huertos, hortalizas y cultivos de ciclo corto, no obstante se debe tener personal capacitado para operar y mantener el sistema de riego para evitar problemas operacionales.

- Hidroponia

La hidroponía se presenta también como una alternativa para la producción de productos agrícolas en zonas áridas, ya que esta tecnología puede presentar ventajas como reducir el consumo de agua, utilizar agua recuperada o escurrida, disminuir la evaporación y transpiración debido al control ambiental (Ping, 2023; Pomoni et al., 2023). El cultivo hidropónico no cuenta con una normativa específica en Chile, pero está regulada por normativas agrícolas generales y es fiscalizada por el SAG (Servicio Agrícola y Ganadero), y puede ser una buena alternativa en sectores áridos ya que el agua puede permanecer más tiempo en recirculación. Esta alternativa de cultivo puede tener un costo variable dependiendo de su tamaño y el tipo de producto que se desarrolle, aunque algunos estudios señalan que cultivos hidropónicos a pequeña escala tienen un costo de 53 USD/m² y para escala mediana 77 USD/m² (Folorunso et al., 2023).

- Reúso de aguas residuales

Actualmente se han desarrollado estrategias innovadoras asociadas a la economía circular, en la cual fuentes alternativas de agua son reincorporadas a la cadena valor de un producto, siendo una de éstas el uso de aguas residuales tratadas. Esta solución representa una alternativa especialmente viable cuando los centros de producción agrícola se ubican cercanas a zonas de alta actividad humana. Las aguas residuales al ser tratadas pueden tener una calidad que les permite ser reusadas para riego, permitiendo esto ventajas como la conservación de recursos hídricos asociados a agua dulce, aporte de nutrientes (contenidos en el agua residual), ser una fuente de agua estable en zonas de escasez hídrica y consumir menos energía que la desalinización. Estos sistemas de producción de agua reusada han sido usados en países como en Israel, Chipre y Australia, para poder ser usado en la agricultura. No obstante, estas aguas no convencionales deben ser monitoreadas en temas relacionados a su salinidad y presencia de ciertos contaminantes peligrosos para la salud (Jaramillo & Restrepo, 2017; Obijanya et al., 2025). A nivel de normativa, Chile cuenta con el Decreto Supremo 40/24 y la Ley 21075/25 los cuales establecen parámetros y requisitos para la reutilización segura de las aguas grises, las que pueden ser usadas en la agricultura. Por otra parte, se ha observado que el costo para producir aguas residuales reusadas (para uso agrícola) bordea los 0,02 a 0,80 USD/m³ (Areosa et al., 2024), en comparación al agua desalada que tiene un costo de producción de 0,52 a 1,30 USD/m³ (Kotagama et al., 2016).

Las MIPYMEs de zonas áridas pueden implementar la estrategia de reúso de aguas residuales para poder usar fuentes de aguas no convencionales. Este recurso hídrico puede ser aplicado actualmente mediante el uso de aguas grises en la agricultura, siempre y cuando estos no sean cultivos de frutas y hortalizas que crecen a ras de suelo y suelen ser consumidas crudas por las personas, o que sirvan de alimento a animales que pueden transmitir afecciones a la salud humana (Decreto 40, 2024). No obstante, se debe tener presente el realizar un adecuado tratamiento a las aguas grises para cumplir parámetros de calidad, y disminuir la salinidad de ésta en el caso de que los suelos agrícolas cuenten naturalmente con una alta cantidad de sales. Por otra parte, el uso de aguas grises se acopla con la nueva Ley de Riego (Ley 21.597/23) y los concursos de la Comisión Nacional de Riego, los cuales están priorizando proyectos que usen fuentes agua no convencionales y que promuevan la sostenibilidad.

- Sistemas fotovoltaicos

La energía representa un insumo crítico en la agricultura, debido a que este permite operaciones de riego, iluminación, funcionamiento de maquinarias, entre otros. En este sentido, la adopción de paneles solares en la agricultura permite a las MIPYMEs generar electricidad de forma autónoma, y reducir costes operativos, siendo lo anterior relevante

en momentos donde existe mayor radiación solar, ya que se ha visto que coinciden con los períodos de mayor demanda de riego en cultivos. Además, los costos asociados al uso de paneles solares (en base a su Levelized Cost of Electricity, LCE) pueden bordear los 0,037-0,14 USD/kWh (Mdallal et al., 2025; Pourasl et al., 2023), no obstante existe incentivos como los entregados por INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario), los cuales pueden cofinanciar hasta el 70-90% de la inversión. Adicionalmente, la Ley 21.118/18 (Net billing) permite que los productores vendan a la red el excedente de energía no consumida. También es importante destacar que sistemas innovadores como el agro-voltaicos se han ido desarrollando a lo largo de los años, para poder integrar en una misma área de suelo la agricultura (de cultivos resistentes a la sombra) junto a la producción de energía fotovoltaica. Lo anterior permite ventajas como la eficiencia en el uso del agua, debido a que el panel solar genera una sombra parcial, la cual reduce la temperatura del suelo cultivado, y con ello la evapotranspiración (siendo esto una ventaja en zonas áridas y semiáridas). Además, los paneles fotovoltaicos pueden reducir costos asociados al consumo de energía eléctrica, y generar un microclima que puede favorecer a los cultivos que se encuentran debajo de éste, ya que puede proteger con su sombra de golpes de calor o de radiación solar excesiva (Malu et al., 2017, Barron-gafford et al., 2019). Los proyectos agro-voltaicos se encuentran en etapa de estudios en Chile y han mostrado resultados positivos, por ejemplo Fraunhofer Chile y el INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias) han realizado estudios de sistemas agro-voltaicos en Curacaví, El Monte y Lampa, obteniéndose por ejemplo en esta última una reducción del 40% de la irradiación y un aumento del 29% de la humedad relativa del suelo debido al sombreado parcial de los módulos fotovoltaicos (Fraunhofer Chile, 2025). Estos resultados obtenidos permiten proyectar el uso de este tipo de agricultura en zonas con escasez hídrica, el cual puede ser una buena alternativa para MIPYMEs que deseen reducir gastos de consumo eléctrico en su producción de productos.

Si bien los cultivos agro fotovoltaico son una innovadora estrategia de producción, la cual esta aun en desarrollo, esta tiene un gran potencial para ser usadas por MIPYMEs en zonas áridas, ya que puede proteger cultivos de la radiación solar excesiva y generar energía eléctrica que puede ser usada en procesos productivos de la empresa. Además, en el caso de implementar este tipo de estrategias en el futuro se debe tener en consideración temas legales como si existen límites de cobertura del suelo por paneles (en países como Francia se encuentra esto limitado por Ley), temas técnicos como requisitos de rendimiento agronómico, y si existen subsidios gubernamentales que puedan apoyar esta estrategia.

Por último, en el contexto de la transición hacia una economía circular en la agricultura chilena, el Manejo Integrado de Plagas (MIP) se presenta como una herramienta clave para avanzar hacia sistemas agrícolas más sostenibles y eficientes en el uso de recursos. Este

enfoque se caracteriza por ser eficaz y respetuoso con el medio ambiente, y se basa en una combinación de prácticas sensatas. Los programas de MIP utilizan información actualizada y completa sobre los ciclos de vida de las plagas y su interacción con el medio ambiente (US-EPA, 2025). Esta información, en combinación con los métodos de control de plagas disponibles, se utiliza para controlar los daños causados por las plagas de la manera más económica y con el menor riesgo posible para las personas, la propiedad y el medio ambiente. En zonas áridas, donde la resiliencia del sistema depende en gran medida de la salud del suelo y del equilibrio ecológico, el MIP permite optimizar la productividad minimizando los impactos ambientales. Complementar estas prácticas con el monitoreo constante de poblaciones, el uso racional de insumos y la rotación de cultivos permite mantener los niveles de plagas por debajo del umbral económico de daño, reduciendo la necesidad de pesticidas. El MIP en Chile se rige mediante normativas como el Reglamento Sanitario de los Alimentos (DS 977/96), el cual exige que las instalaciones estén libres de plagas y cuenten con medidas de control permanentes, y el Reglamento de Pesticidas de Uso Sanitario y Doméstico (DS 157/07) que permite regular el almacenamiento, uso y manejo de plaguicidas.

4.2. Valorización de Residuos Orgánicos y Biomasa

En el norte de Chile, iniciativas como Agrodesierto están impulsando la transición hacia una economía circular mediante la valorización de residuos agrícolas y la adopción de prácticas sostenibles orientadas al uso eficiente del agua y a la regeneración de los suelos. Este enfoque busca transformar los subproductos generados por la actividad agrícola en insumos útiles para nuevos ciclos productivos, promoviendo un modelo donde nada se desperdicia y los recursos se mantienen en uso por más tiempo.

Uno de los ejes centrales de esta estrategia es el aprovechamiento de la biomasa para la elaboración de compost o biofertilizantes. Estos productos mejoran la estructura de los suelos áridos, aumentan su fertilidad y fortalecen su capacidad para retener agua, un factor crítico en entornos de alta escasez hídrica. De este modo, se reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, cuyo uso intensivo genera impactos ambientales y altos costos energéticos (Allohverdi et al., 2021). Por otra parte, los biofertilizantes son principalmente productos listos para usar que contienen microorganismos viables de importancia agrícola, es decir, es una forma moderna de fertilizante orgánico que contiene microorganismos beneficiosos (Khan et al., 2023), permitiendo estos reducir el uso de fertilizantes sintéticos y mejorar la salud y estructura del suelo. No obstante, uno de los mejores aprovechamientos de biomasa es el compostaje, el cual representa una práctica clave dentro de este proceso de valorización. A través de la descomposición controlada de restos de cosechas, estiércol y subproductos agroindustriales, se obtiene un material rico en nutrientes que favorece la vida microbiana del suelo y mejora su salud a

largo plazo. Su aplicación contribuye no solo a conservar la humedad, sino también a aumentar la productividad y estabilidad del ecosistema agrícola.

Finalmente, la valorización energética de los residuos agrícolas, mediante procesos como la digestión anaeróbica o la gasificación, permite generar fuentes de energía renovable que pueden ser aprovechadas directamente en las operaciones agrícolas. Esta integración de soluciones biológicas y energéticas cierra el ciclo de los recursos, disminuye la huella de carbono y consolida un modelo de producción más resiliente, eficiente y alineado con los principios de la economía circular en las zonas áridas del país.

4.2.1. Marco normativo para el reciclaje orgánico a través de compostaje

Chile cuenta con un marco normativo amplio que regula la instalación y operación de plantas de compostaje, en coherencia con sus políticas nacionales de gestión de residuos. En particular, el Ministerio del Medio Ambiente ha establecido lineamientos a través del desarrollo de planes como la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos 2020-2040 (MMA, 2021) además de normativas técnicas que orientan la correcta valorización de los residuos orgánicos.

En primer lugar, existen normas específicas asociadas al compostaje y a la gestión de residuos, como la NCh (H 3322:2013, 2013), que define los colores de contenedores para distintas fracciones de residuos; la (NCh 2880:2015, 2015), que establece los requisitos de calidad y clasificación del compost; y la (NCh 3382:2016, 2016), que entrega pautas para el diseño y la operación de plantas de compostaje. Estas normas técnicas permiten estandarizar procesos y garantizar la calidad del producto final.

En cuanto a los requisitos de uso de suelo, toda planta de compostaje debe emplazarse en un terreno compatible con los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) vigentes. Según la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (DS 47/1992), este tipo de instalaciones se enmarca dentro del uso de suelo “Infraestructura”, por lo que es indispensable verificar que el proyecto pueda ubicarse legalmente en la zona seleccionada.

Desde el punto de vista ambiental, es necesario determinar si el proyecto debe ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Las plantas destinadas a atender una población igual o superior a 5.000 habitantes —equivalente a una generación aproximada de 4 a 6 toneladas diarias de residuos domiciliarios— están obligadas a someterse a evaluación ambiental, generalmente mediante una Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Asimismo, deben obtener el Permiso Ambiental Sectorial (PAS) 140, aplicable a instalaciones dedicadas al tratamiento, selección o disposición de basuras y desperdicios. Si el proyecto presenta efectos ambientales significativos, de acuerdo con el artículo 11 de la Ley 19.300, deberá ingresar mediante un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

En materia sanitaria, todas las plantas de compostaje, independientemente de su obligación de ingresar al SEIA, deben contar con las autorizaciones sectoriales otorgadas por la SEREMI de Salud. Estas incluyen permisos para la construcción y operación de instalaciones destinadas al manejo de residuos, además de autorizaciones específicas que pueden variar entre regiones, como permisos de destinatario de residuos no peligrosos o autorizaciones para la disposición final en predios industriales.

El marco regulatorio aplicable se complementa con diversas disposiciones legales, entre ellas la Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente, la Ley 20.920 sobre responsabilidad extendida del productor, el Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (DS 1/2013), y el Código Sanitario (DFL 725). Cabe destacar que el compostaje se reconoce formalmente como una forma de reciclaje, y que las plantas que reciben más de 12 toneladas anuales deben reportar su actividad a través del RETC. A esto se suma la normativa local, compuesta por ordenanzas municipales e instrumentos de planificación territorial, que también deben considerarse para asegurar el cumplimiento íntegro del proyecto. En conjunto, este marco normativo establece los criterios técnicos, ambientales, sanitarios y territoriales necesarios para garantizar que las plantas de compostaje operen de manera segura, eficiente y alineada con las políticas nacionales de gestión de residuos y economía circular.

A modo de resumen es posible establecer a modo de resumen:

Leyes y Reglamentos

- **Ley N° 19.300** sobre Bases Generales del Medio Ambiente
 - Define tipologías de proyectos que deben ingresar al SEIA.
- **Ley N° 20.920** (REP y fomento al reciclaje)
 - Reconoce el compostaje como una forma de reciclaje.
 - Define obligaciones para gestores de residuos.
- **DFL N° 725 - Código Sanitario**
 - Regula permisos sanitarios para instalaciones de manejo de residuos.
 - Art. 79-80: autorizaciones para construcción y operación de plantas.
- **DS N° 40/2012 - Reglamento del SEIA (RSEIA)**
 - Establece el ingreso obligatorio al SEIA para plantas que atiendan ≥ 5.000 habitantes (tipología o.5).
 - Incluye el PAS 140 para plantas de tratamiento y disposición de residuos.
- **DS N° 1/2013 - Reglamento del RETC**
 - Obliga a plantas que reciben > 12 ton/año a reportar residuos en el RETC.
- **DS N° 47/1992 - Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)**
 - Define usos de suelo; las plantas de compostaje se clasifican como “Infraestructura”.

5. Normas Técnicas (INN)

- **NCh 3322:2013**
 - Colores de contenedores para fracciones de residuos.
- **NCh 2880:2015**

- Requisitos de calidad y clasificación del compost.
- **NCh 3382:2016**
 - Diseño y operación de plantas de compostaje.

5.1. Análisis técnico económico del manejo de residuos orgánicos

La gestión sostenible de los residuos orgánicos se ha convertido en un eje central para avanzar hacia sistemas agrícolas más resilientes, eficientes y alineados con los principios de la economía circular. En este contexto, el compostaje representa una alternativa estratégica para valorizar la biomasa y cerrar ciclos productivos mediante la transformación de desechos agrícolas en insumos que mejoran la fertilidad del suelo, aumentan la retención hídrica y reducen la dependencia de fertilizantes sintéticos. Sin embargo, la elección de la tecnología adecuada es un elemento decisivo para asegurar la viabilidad técnica, económica y ambiental de estas iniciativas, especialmente en territorios donde los recursos son limitados y las condiciones climáticas –como las zonas áridas o desérticas– exigen soluciones adaptativas y eficientes.

El análisis comparativo de distintas tecnologías de compostaje permite comprender sus ventajas, desventajas y niveles de inversión requeridos. Desde sistemas simples, de bajo costo y alta accesibilidad como las pilas estáticas, hasta alternativas más avanzadas y automatizadas como el compostaje en túneles o contenedores aireados, cada tecnología responde a diferentes escalas de operación, necesidades de control, disponibilidad de espacio y capacidades técnicas. Asimismo, su implementación gradual mediante un modelo escalable facilita el aprendizaje, reduce riesgos operativos y asegura una transición responsable hacia sistemas más complejos cuando las condiciones lo permiten.

En el ámbito agrícola, esta progresión tecnológica –basada en la modularidad y el control progresivo de los procesos– contribuye no solo a optimizar el manejo de residuos, sino también a fortalecer la sostenibilidad del sector mediante prácticas de valorización orgánica y energética. De forma complementaria, el marco regulatorio vigente en Chile establece lineamientos para garantizar la calidad del compost, minimizar impactos ambientales y orientar la instalación adecuada de plantas según las capacidades territoriales. Así, el compostaje se presenta como una herramienta clave para impulsar la resiliencia agrícola y promover modelos productivos circulares que respondan de manera efectiva a los desafíos climáticos y hídricos actuales (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis sobre ventajas y desventajas de diferentes tecnologías de compostaje (MINSAL, 2025)

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Costo Infraestructura
Pilas estáticas	Fácil manejo para residuos propios a escala agrícola y barrial. Bajo requerimiento de mano de obra.	Está limitado para capacidades bajas (menor a 500 toneladas anuales). No hay control sobre posibles problemas en el proceso y externalidades ambientales. Proceso lento (12 a 18 meses). Ocupación de espacio: 3 a 10 m ² /ton.	Baja
Pilas continuas con volteo	Uso flexible del espacio. Produce compost uniforme.	Requiere un espacio más amplio. Menos control sobre externalidades ambientales negativas (olores). Proceso lento (6 a 12 meses). Ocupación de espacio: >1,5 m ² /ton.	Baja - Media
Pilas aireadas	Eficiente para uso agrícola y municipal. Requiere menos espacio que la pila continua con volteo. Tecnología de complejidad media. Bajo requerimiento de mano de obra. Mayor control sobre externalidades ambientales negativas.	Alta inversión inicial. Proceso lento (6 a 12 meses). Ocupación de espacio: >1,7 m ² /ton.	Alta
Pilas aireadas con cubierta semipermeable	Diseño simple y modular. No requiere un edificio. Produce compost uniforme. Buen control sobre olores, plagas, etc. Proceso relativamente rápido (menor a seis meses).	Costo medio-alto. Ocupación de espacio: >1,2 m ² /ton.	Alta
Sistema de trincheras en naves cerradas	Equipo automatizado. Mayor control sobre posibles externalidades ambientales negativas. Uso eficiente del espacio. Proceso relativamente rápido (menor a seis meses).	Alta inversión inicial y de operación. Tecnología avanzada y con mayor complejidad. Ocupación de espacio: >0,3 m ² /ton.	Muy alta
Compostaje en túneles o contenedores aireados	Equipo automatizado. Mayor control sobre posibles externalidades ambientales negativas. Uso eficiente del espacio. Proceso relativamente rápido (menor a seis meses).	Mayor costo de capital y de operación que otro tipo de plantas. Tecnología avanzada y con mayor complejidad. Ocupación de espacio: >0,3 m ² /ton.	Muy alta

Escalabilidad de plantas de compostaje en un contexto agrícola

La gestión de residuos orgánicos mediante compostaje es una solución accesible, adaptable y con alto potencial socioambiental, especialmente en condiciones agrícolas que permitan el reciclaje orgánico. Para asegurar su escalabilidad de forma responsable, es clave seleccionar tecnologías acordes a la capacidad instalada, al espacio disponible y al nivel de inversión posible, siguiendo una estructura de 3 etapas.

Etapla 1: Arranque comunitario con pilas estáticas

En una primera etapa, se recomienda implementar pilas estáticas por su bajo costo de infraestructura y facilidad de manejo agrícolas. Este sistema demanda poca mano de obra y puede instalarse con materiales locales (palets, mallas, restos de poda y vegetales). Aunque el proceso es lento en comparación a otras tecnologías más intensivas, es una alternativa sólida para comenzar, siempre que se incorporen prácticas básicas de control como una mezcla equilibrada de materiales ricos en nitrógeno (verdes) y carbono (secos), más la aplicación de algún material estructurante. Este paso permite construir conocimiento práctico, generar confianza comunitaria y establecer rutinas operativas.

Etapla 2: Mejora operativa con pilas continuas y volteo

A medida que aumenta el volumen de residuos y la experiencia técnica, la transición hacia pilas continuas con volteo ofrece una mejora significativa en la uniformidad del compost, manteniendo costos bajos a medios, dependiendo del volumen tratado. Este sistema aprovecha mejor el espacio que las pilas estáticas y, aunque el proceso sigue siendo lento y el control de olores puede ser limitado (donde se recomienda hacer en espacios abiertos lejos de sitios habitacionales), el volteo periódico favorece la aireación y acelera la descomposición. En esta etapa, el uso de herramientas sencillas (horcas, carretillas, tamices y volteadores) y el diseño de flujos de trabajo (recepción, conformación de pilas, volteo, maduración, tamizado) permite incrementar la capacidad sin recurrir a equipos complejos. Es recomendable introducir cubiertas (lonas) para mantener la humedad e intentar mejorar el manejo de lixiviados.

Etapla 3: Modularidad y control con pilas aireadas y cubiertas semipermeables

Una tercera etapa adecuada para contextos de recursos limitados pero con mayor volumen y necesidad de control ambiental consiste en adoptar pilas aireadas con cubierta semipermeable. Esta tecnología, de costo medio-alto, no requiere edificios y ofrece un diseño modular, lo que permite escalar agregando módulos según la disponibilidad de recursos y el crecimiento de la demanda. Presenta un buen control de olores, plagas y drenajes. Para reducir costos, puede emplearse ventilación por sopladores de bajo consumo con temporizadores, tuberías perforadas económicas y cubiertas reutilizables. El

paso a esta fase debe apoyarse en capacitación técnica, protocolos de operación (medición de temperatura, humedad y oxigenación) y acuerdos de colaboración con productores locales para asegurar la salida del compost.

La escalabilidad del compostaje en contextos de recursos agrícolas se plantea priorizando tecnologías simples, modulares y de bajo costo, empezando por pilas estáticas, evolucionando hacia pilas continuas con volteo y consolidándose con pilas aireadas con cubierta. Este camino equilibra la necesidad de acceso y aprendizaje con la eficiencia y el control ambiental, favoreciendo proyectos sostenibles y replicables en distintos territorios.

De esta forma es posible dar respuesta a uno de los desafíos más grandes de la agricultura, donde los residuos agrícolas se transforman en insumos que pueden contribuir al reciclaje de nutrientes y mejorar la calidad de los suelos y el uso del agua. Este enfoque busca cerrar ciclos productivos, reducir desperdicios y fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas en entornos desérticos. La valorización de biomasa (proveniente de la agricultura) mediante la producción de compost y biofertilizantes. Estos insumos mejoran la estructura del suelo, incrementan su fertilidad y aumentan la capacidad de retención hídrica, factor clave en regiones con alta escasez de agua. Además, disminuyen la dependencia de fertilizantes sintéticos, reduciendo impactos ambientales y costos energéticos. Complementariamente, la valorización energética de residuos mediante digestión anaeróbica o gasificación permite generar energía renovable para las operaciones agrícolas, disminuyendo la huella de carbono y consolidando un modelo productivo más eficiente y sostenible. Para garantizar la implementación segura de estas prácticas, Chile cuenta con un marco normativo específico que regula el compostaje, la ubicación de plantas según los instrumentos de planificación territorial y la evaluación ambiental en proyectos de gran escala. Estas disposiciones aseguran la calidad del producto final y el cumplimiento sanitario.

La aplicación de estas estrategias circulares en la agricultura en el desierto se plantea en el marco de una implementación progresiva, este modelo permite avanzar hacia una agricultura resiliente, y alineada con los principios de la economía circular en zonas áridas.

5.1.1. Manejos complementarios

La poda constituye una práctica esencial para mantener la productividad y la sanidad de los cultivos, esto debido a que la poda mejora de la penetración de luz y la circulación del aire, reduciendo el microclima húmedo que favorece enfermedades. También reduce la competencia interna por recursos la planta (optimización de recursos), ya la poda permite redirigir energía, agua, nutrientes hacia brotes sanos y mejora de la vida útil de los cultivos (Agriculture Institute, 2023). Sin embargo, esta labor genera grandes volúmenes de biomasa residual (ramas y hojas) que tradicionalmente se han considerado un desecho. Desde la perspectiva de la economía circular, estos materiales adquieren un nuevo valor al ser gestionados como recursos capaces de reingresar al sistema productivo, reduciendo el desperdicio y fortaleciendo la sostenibilidad del agroecosistema.

Mediante su correcta gestión (que no afecte el rendimiento de la producción agrícola), puede ser utilizado como se forma una capa de materia orgánica que actúa como cubierta protectora. Al descomponerse, esta biomasa mejora la estructura y fertilidad del suelo, aporta nutrientes esenciales y reduce la evaporación, contribuyendo a una mayor retención de humedad en contextos de escasez hídrica.

Finalmente, una gestión integral de los residuos agrícolas busca aprovechar al máximo el potencial de cada subproducto, creando sinergias entre distintas actividades del sector. Los restos de poda pueden combinarse con otros residuos agroindustriales (como la pulpa de aceituna o los subproductos vitivinícolas, o cenizas) para la elaboración de compost, biofertilizantes o incluso alimento para ganado. De esta manera, se cierran los ciclos de nutrientes y materiales, se minimizan las pérdidas y se avanza hacia un modelo agrícola más eficiente, regenerativo y coherente con los principios de la economía circular.

6. Barreras y Limitaciones para la Implementación

Las principales limitantes para aplicar la economía circular en la agricultura chilena incluyen la alta generación de residuos con escasa valorización, un marco regulatorio aún incipiente y la falta de coordinación institucional. Además, la desigual cobertura territorial limita la recolección y tratamiento de residuos fuera de la zona central, dificultando una gestión integral de los ciclos productivos (Gallego-Schmid et al., 2025).

Además, el uso excesivo de fertilizantes, agua y su consecuente contaminación, constituyen problemas estructurales que exigen tecnologías más eficientes y enfoques restaurativos (Nuruzzaman et al., 2025).

Otro desafío clave es la falta de articulación entre los distintos actores del sector agrícola, lo que dificulta la transformación de las prácticas productivas tradicionales hacia modelos sostenibles (Gallego-Schmid et al., 2025).

La transición hacia una agricultura circular y resiliente requiere coordinación estratégica entre políticas públicas, ciencia, financiamiento y sector privado. En Chile, el Ministerio de Agricultura impulsa programas de riego eficiente, compostaje y valorización de residuos, mientras el Ministerio del Medio Ambiente regula estándares y metas de reducción de emisiones. El INDAP complementa estos esfuerzos mediante asistencia técnica y créditos para adopción tecnológica en zonas áridas. En Europa, la Comisión Europea lidera políticas sostenibles, armonización normativa y financiamiento de proyectos circulares, estableciendo un marco para cooperación internacional (Figura 3).

Entre los actores multisectoriales, la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático articula acuerdos voluntarios y certificaciones, mientras CORFO cofinancia innovación tecnológica. Europa moviliza redes UE-América Latina y plataformas como EIT Food, que aceleran soluciones circulares y fortalecen ecosistemas agroalimentarios. Centros de excelencia como Wageningen University & Research y sus contrapartes chilenas validan tecnologías en condiciones extremas. El sector privado—gremios agrícolas, empresas tecnológicas, startups y ONG ambientales—implementa prácticas circulares y sistemas de monitoreo social.

Para materializar esta visión, se proponen mecanismos clave:

1. Alianzas público-privadas con metas medibles entre ministerios, agencias, gremios y empresas para reducir residuos, optimizar agua y escalar compostaje, con indicadores auditados por entidades independientes.
2. Transferencia tecnológica validada en desierto, liderada por centros de excelencia y empresas europeas, con adopción territorial facilitada por INDAP. Soluciones prioritarias incluyen riego circular con telemetría y energía renovable (–25% consumo hídrico) y compostaje automatizado con biofertilizantes para sustituir fertilizantes químicos.
3. Financiamiento combinado mediante CORFO y programas europeos para pilotos y escalamiento, incorporando compras públicas innovadoras y proyectos de valorización energética de biomásas en plantas agroindustriales.
4. Formación continua y datos abiertos mediante escuelas de campo y plataformas interoperables que monitoricen indicadores de agua, energía, residuos y emisiones.

La integración de estos componentes permitirá avanzar hacia un modelo agroalimentario eficiente en recursos, alineado con objetivos climáticos globales. La cooperación birregional y la articulación multisectorial son esenciales para una transición justa, escalable y trazable.

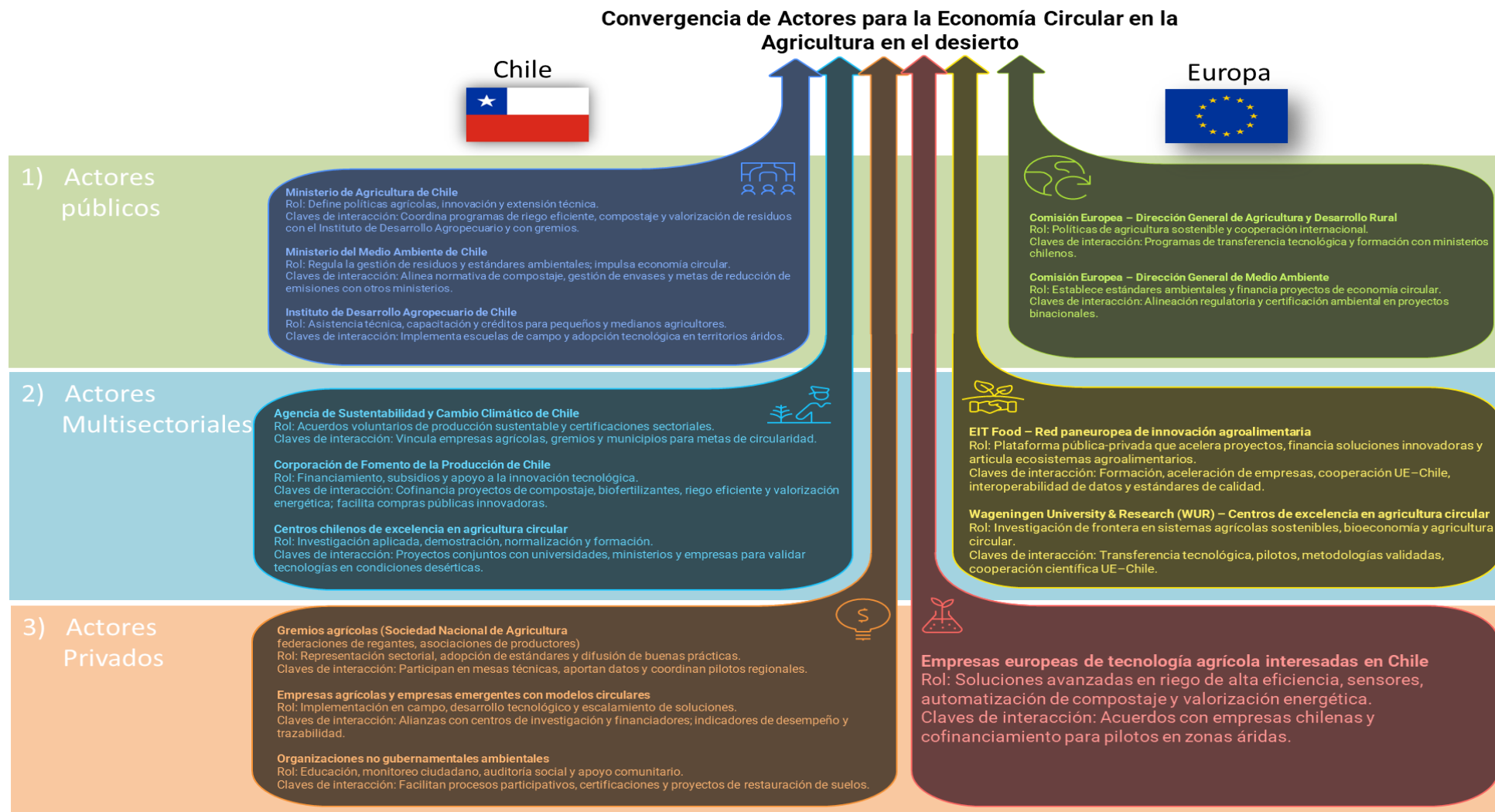


Figura 3. Mapa de los actores involucrados en la circularidad agrícola.

En conjunto, estos factores reflejan que Chile aún se encuentra en una etapa inicial de transición hacia la economía circular, requiriendo mayores esfuerzos en innovación, regulación y cooperación para avanzar hacia sistemas agrícolas verdaderamente regenerativos y con menor impacto ambiental.

Es posible estructurar las barreras antes mencionadas en 3 grandes ejes a resolver como desafíos.

- **Barreras Económicas y de Inversión:** Los altos costos iniciales de inversión para implementar nuevas tecnologías, como sistemas de riego eficientes o plantas de compostaje, representan una barrera significativa, especialmente para pequeños y medianos agricultores. La falta de acceso a financiamiento o incentivos adecuados puede frenar la adopción a gran escala.
- **Limitaciones Regulatorias y de Apoyo Institucional:** La ausencia de marcos regulatorios claros o la inseguridad en cuanto a incentivos y ayudas públicas genera incertidumbre. Es fundamental contar con políticas públicas que promuevan la economía circular, apoyen la innovación y faciliten la logística inversa para la gestión de residuos, como el reciclaje de envases fitosanitarios.
- **Obstáculos Tecnológicos y de Conocimiento:** Aunque las tecnologías existen, su obsolescencia, el alto costo de las piezas de repuesto o la falta de infraestructura de apoyo (por ejemplo, para la reparación de maquinaria o el establecimiento de cadenas de valor para subproductos) pueden ser un desafío. También es crucial aumentar la concienciación y la formación de los agricultores sobre los beneficios y la correcta implementación de estas prácticas.

En relación con las barreras es posible identificar diferentes alternativas y ejemplos de cómo poder abordarlas. En este sentido para impulsar alternativas centradas en el acceso al financiamiento, la regulación, la innovación y la formación. En el ámbito económico, se recomienda implementar créditos verdes, fondos mixtos público-privados, subsidios y esquemas de *leasing* tecnológico que permitan reducir los altos costos iniciales de inversión, especialmente para pequeños y medianos productores. En el plano regulatorio, es clave establecer políticas nacionales claras con metas e indicadores, ventanillas únicas para agilizar trámites e incentivos específicos para la reparación y reutilización de maquinaria agrícola.

En el ámbito tecnológico, la creación de centros regionales de transferencia, *clusters* de innovación y plataformas digitales puede facilitar la difusión de prácticas sostenibles y la adopción de tecnologías de gestión eficiente del agua y residuos. Asimismo, las alianzas entre universidades, empresas y organismos públicos permitirían desarrollar soluciones adaptadas a las condiciones productivas de cada territorio.

Finalmente, se propone integrar todas estas acciones en programas nacionales de apoyo sistémico que combinen financiamiento, regulación y capacitación, acompañados de monitoreo ambiental, certificaciones “agro-circulares” e incentivos de mercado. Este enfoque integral busca promover una transición justa y escalable hacia una agricultura chilena más eficiente, resiliente y sostenible.

En la Tabla 6 se muestran ejemplos asociados a las alternativas propuestas que apuntan al a resolución de estos desafíos.

Tabla 6. Ejemplos e iniciativas para la aplicación de estrategias circulares en la agricultura.

Barreras Identificadas	Alternativas o Soluciones Propuestas	Ejemplos Reales o Iniciativas en Chile	Fuente
Económicas y de inversión	Crear líneas de crédito verde o fondos mixtos público-privados.	Copeval S.A. recibió una inversión de inversión de la International Finance Corporation, para poder entregar financiamiento a más de 50.000 agricultores.	(IFC, 2025)
	Establecer subsidios y garantías para tecnologías sostenibles.	Proyecto BID CH-L1185: riego tecnificado para pequeños agricultores.	(IBD, 2025)
	Fomentar cooperativas o asociaciones para compartir maquinaria y costos.	Programas CORFO de Innovación Agrícola Sostenible.	(CORFO, 2021)
	Implementar esquemas de leasing tecnológico para acceso gradual.	Experiencia de leasing agrícola replicable para iniciativas privadas.	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2024
Regulatorias e institucionales	Desarrollar políticas nacionales de economía circular agrícola con metas e indicadores.	Estrategia Nacional de Economía Circular 2040.	(MMA, 2021)
	Crear ventanillas únicas para agilizar incentivos y permisos.	Incentivo a subsidios de riego - Ley 18.450.	(Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2025)
	Fortalecer redes para la gestión de residuos plásticos.	AgroRecicla: formación sobre reciclaje y logística inversa de envases.	(AFIPA, 2025; Agrorecicla, 2022)
Tecnológicas y de conocimiento	Impulsar plataformas digitales para gestión eficiente del agua y residuos.	CampoLimpio: reciclaje de envases	
		UTalca - CITRA: plataforma digital para optimizar riego.	(Universidad de Talca, 2021; Weltun Mapu, 2017)
	Desarrollar clusters tecnológicos agrícolas (mantenimiento, compostaje).	Cooperativa Weltun Mapu: plantas de compostaje agroindustrial.	
	Promover alianzas universidad-empresa para innovación agrícola local.	Proyecto AgroDesierto: prácticas circulares en zonas áridas.	(AgroDesierto, 2024)
		Convenios nacionales e internacionales con universidades locales.	(Universidad de Chile, 2025)

La adopción de la economía circular en la agricultura chilena, particularmente en las zonas áridas, no solo es una respuesta al desafío de la escasez hídrica, sino una oportunidad para aumentar la resiliencia, la sostenibilidad y la competitividad del sector. Superar estas barreras requerirá una colaboración estrecha entre el sector público, el privado y las instituciones de investigación y desarrollo.

7. Herramientas para la medición de la circularidad

Los beneficios que ofrece el uso de indicadores ambientales han sido analizados ampliamente, encontrándose que estos tienen la capacidad de transmitir información compleja de forma simplificada y útil, y permitir sensibilizar al público sobre temas relevantes. Además, se pueden utilizar como instrumentos de gestión y formulación, para definir objetivos y hacer seguimiento del progreso ambiental de la empresa, entre otros. Por otra parte, en lo que respecta a la EC, los indicadores asociados a circularidad pueden funcionar como un trampolín para la transición hacia prácticas más efectivas, también estos indicadores pueden cuantificar el rendimiento de las industrias (para su comparación), ser usados en etiquetas de productos (para informar las decisiones de los consumidores) y dar información base para cambios regulatorios. En este sentido, indicadores asociados a circularidad son relevante ya que la circularidad no necesariamente equivale a que un producto sea sostenible ambientalmente (aunque a menudo se asume que lo es), un ejemplo de lo anterior puede ser el caso de la mayor demanda de energía que pueden tener ciertos residuos cuando son reciclados, lo cual puede contrarrestar las ganancias ambientales obtenidas mediante la recuperación de material secundario (Saidani et al., 2019).

. Basado en lo anterior, la obtención de indicadores ambientales asociados a la circularidad como la huella de agua, huella de carbono y análisis de ciclo de vida (ACV) pueden contribuir importante con diagnosticar, guiar y validar el avance de las acciones circulares aplicadas por las empresas, siendo estas herramientas descritas a continuación:

7.1. Huella de Carbono

La huella de carbono es un indicador ambiental que está relacionada con el impacto ambiental que producen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) emitidas por actividades antropogénicas (ej. la quema de combustibles fósiles). Estos gases incrementan el efecto invernadero natural del planeta, causando el calentamiento global, siendo los gases más relevantes el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxidos de

nitrógeno (NO_x). La huella de carbono puede ser determinada a nivel de producto, servicios, ciudades y países, y se expresa como masa de CO_2 equivalente (CO_2eq), permitiendo esta unidad visualizar el impacto ambiental que tiene un GEI, mediante su equivalente en cantidades de CO_2 emitido (Muthu, 2020). Este indicador ambiental puede determinarse a través de emisiones directas e indirectas de GEI. La primera, está relacionada a la generación de gases invernadero de fuentes que pueden ser controladas directamente en las operaciones realizadas por empresas o individuos, como por ejemplo el uso de una máquina (propia) que funciona con combustibles fósiles. Mientras que la segunda, se asocia a fuentes de GEI que son emitidas por un tercero, en las cuales no se tiene control directo de las emisiones, siendo un ejemplo de esto la producción de electricidad de empresas energéticas (Ranganathan et al., 2001). La importancia en la cuantificación de este indicador ambiental radica en que entrega un perfil ambiental del producto u organización evaluada, y en base a ésta se pueden realizar estrategias de gestión ambiental que puedan reducir las emisiones de GEI, como también posibles costos.

La huella de carbono puede ser cuantificada a nivel de organizaciones y de productos/servicios a través de metodologías estandarizadas como la ISO 14064 e ISO 14040. La primera, señala los pasos a seguir para la cuantificación del indicador a nivel de organización, e indica que deben ser calculadas sus emisiones directas e indirectas de GEI. Estas últimas (indirectas) deben ser clasificadas por energía importada, transporte, productos y servicios usados por la organización, el uso de los productos de la organización y otras fuentes (Caro, 2018). En tanto la segunda, permite calcular la huella de carbono de productos a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, cuantificando sus emisiones de GEI generadas durante todo su ciclo de vida, siendo esto relevante para conocer en que parte de la cadena de valor se encuentran los mayores hotspot del producto (Pryshlakivsky & Searcy, 2013). También es importante destacar que la huella de carbono a nivel organizacional se cuantifica en base a un año (ej. 4567 kg CO_2 eq/año), mientras que la de producto se calcula por lo general en base a una unidad del producto evaluado (ej. 34,7 g CO_2 eq/kg de zanahoria)

La huella de carbono ha sido usada en el área de la agricultura para conocer los impactos ambientales producidos por productos agrícolas, y conocer en que parte de la cadena de valor se generaran sus mayores emisiones (y realizar una posible gestión ambiental sobre este), así como también conocer que prácticas agrícolas tienen menor impacto ambiental. En este sentido, estudios de huella de carbono de productos agrícolas son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Estudios de huella de carbono asociados a la agricultura

Nombre Estudio	Objetivo	Resultados	Autor (País)
Life Cycle Assessment of apple and peach production, distribution and consumption in Mediterranean fruit sector	Analizar ambientalmente todas las etapas del ciclo de vida de la producción frutícola mediterránea.	Cálculo de la huella de carbono muestra que la etapa minorista realiza una contribución del 39%, la etapa agrícola del 36%, el consumo del 23% y la disposición del 2%.	(Vinyes et al., 2017) (España)
Enhancing food security while reducing environmental impacts: Life cycle assessment of cultivation-irrigation systems and yield gap closure in paddy fields	Evaluar el impacto ambiental de diferentes sistemas de cultivo y riego, así como escenarios de reducción de las brechas de rendimiento en arrozales, ofreciendo perspectivas que respalden la toma de decisiones para mejorar la sostenibilidad de estas prácticas agrícolas	Cálculo de huella de carbono indica que los Sistemas DDSR (Siembra directa de arroz en seco) presentan un impacto ambiental menor en comparación con el trasplante; y pueden reducir el consumo de agua, electricidad, combustibles fósiles y uso de maquinaria.	(Darzi-naftchali et al., 2025) (Irán)
LCA of Barley Production: A Case Study from Cyprus	Investigar y analizar el impacto ambiental de la producción de cebada en tierras cultivables típicas de Chipre.	La huella de carbono de la cebada se puede reducir mediante la mejora de la gestión de nutrientes y las prácticas de cultivo.	(Stylianou et al., 2023) (Chipre)

7.2. Huella Hídrica

La huella de agua cuantifica el volumen de agua consumida para producir productos y servicios que consumimos, a lo largo de su cadena de valor (es decir a través de su ciclo de vida). Este indicador considera como consumo el agua extraída que se pierde por evaporación, o que no retorna a su cuenca de origen. Además, la huella de agua considera dentro de su cálculo los consumos de agua directos e indirectos, estando relacionada la primera al uso de agua que es controlada directamente en operaciones de empresas o individuos (ej. el agua usada por un agricultor para regar su plantación de tomates). En tanto la segunda, cuantifica el agua que es empleada para la producción de bienes o servicios de la cadena de valor de un producto, en el cual no se tiene control sobre su consumo (ej. la cantidad de agua usada para producir el fertilizante utilizado en una plantación de tomates), siendo esto importante ya que, en muchos casos, la mayor parte

del consumo de agua puede provenir de los consumos indirectos (Chapagain et al., 2017). Este indicador hídrico amplía el alcance de la contabilidad tradicional del agua tal como se conocía anteriormente (sólo cuantificar el consumo directamente usado), permitiendo una ventana de oportunidad para mejorar su gestión a lo largo de toda la cadena de producción y suministro (Hoekstra & Mekonnen, 2011).

En la actualidad, la huella de agua puede ser determinada principalmente mediante la metodología Water Footprint Network e ISO 14046, considerando ambas dentro de su cuantificación tanto los consumos de agua como la calidad de esta cuando es devuelta a la naturaleza, y siendo estas descritas a continuación.

7.2.1. Water Footprint Network

Esta metodología cuantifica el consumo de agua de un producto a lo largo de su cadena de valor, este cálculo es realizado a través de tres componentes conocidos como huella de agua azul, huella de agua verde y huella de agua gris (Hoekstra et al., 2011). Este indicador es evaluado en esta metodología como volumen de agua por unidad de producto (ej. 23 m³/kg de manzana).

- Huella de agua azul: Esta se asocia al consumo de agua dulce (superficiales y subterráneas) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. El consumo de agua azul suele ser menor que la extracción de agua, ya que generalmente parte de esta regresa a las aguas subterráneas o superficiales donde fueron extraídas (Hoekstra & Mekonnen, 2011).
- Huella de agua verde: Se refiere al consumo de agua a través de la transpiración o evaporación de plantas (es decir, el agua del suelo que se origina a partir de la lluvia). El agua verde mantiene la vegetación natural (por ejemplo, bosques, prados, matorrales, tundra) y la agricultura de secano, aunque también juega un papel importante en la mayoría de la agricultura de regadío.
- Huella de agua gris: Es un indicador del grado de contaminación del agua dulce, y es definido como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes según los estándares existentes de calidad del agua ambiental (Hoekstra & Mekonnen, 2011).

7.2.2. ISO 14046

La norma ISO 14046 (2014), plantea una metodología que cuantifica el impacto ambiental que tiene el consumo de agua en la producción de productos y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida. Este indicador puede ser determinado mediante categorías de impacto asociadas a los componentes consumo de agua, escasez hídrica y calidad de agua

(contaminación). Debido a lo anterior, es importante indicar al principio del estudio los componentes que contemplarán este indicador hídrico, es decir si se determina sólo uno, dos o tres de los componentes que componen la huella de agua. Lo anterior permitirá conocer si la huella de agua es integral (contiene categorías de impacto para los 3 componentes), no integral (contiene categorías de impacto para 2 de los componentes) y en el caso de que sea seleccionada 1 categoría de impacto para estudiar 1 de los componentes de la huella de agua, esta deberá señalarse como huella de agua “*categoría de impacto seleccionada*” (ej. si se usa sólo la categoría eutrofización de agua dulce, se llamará huella de agua de eutrofización de agua dulce).

Tanto la ISO 14046 y la Water Footprint Network son similares en la forma de cuantificar metodológicamente el indicador ambiental, no obstante, su principal diferencia está en que la ISO 14046 se enfoca en presentar una evaluación de los impactos ambientales asociados al consumo del agua, mientras que el WFN se orienta en evaluar el volumen total de agua consumida (Stephan et al., 2017). La huella de agua ha sido aplicada en la agricultura para determinar los consumos e impactos que tiene el consumo de agua directo e indirecto en el ciclo de vida de los productos agrícolas. Lo anterior ha permitido identificar beneficios en el uso de fertilizantes naturales, gestionar de mejor manera el agua en zonas áridas, entre otros, tal como se puede observar en los casos de ejemplo de la Tabla 8.

Tabla 8. Estudios de huella de agua asociados a la agricultura

Nombre Estudio	Objetivo	Resultados	Autor (País)
Assessing the impact of water use in conventional and organic carrot production in Poland	Analizar la huella de agua de la producción de zanahoria convencional y orgánica en el sur de Polonia en términos de ACV.	Los resultados de la investigación muestran claramente que la producción orgánica de zanahoria trae beneficios ambientales, siendo uno de los responsables de esto el uso de compostaje (en reemplazo de fertilizantes artificiales)	(Kowalczyk & Kuboń, 2022) (Polonia)
Water footprint of Egyptian crops and its economics	El presente estudio tiene como objetivo estimar la huella de agua (HH) de los cultivos egipcios en las tierras antiguas y nuevas, dentro y fuera del valle del Nilo y el delta.	Los resultados mostraron que la contribución del agua verde a la huella hídrica total de los cultivos egipcios era pequeña en comparación con el agua azul	(El-Marsafawy & Ali Ibrahim Mohamed, 2021) (Egipto)

La huella hídrica es una herramienta de medición esencial que cuantifica el volumen total de agua dulce utilizada para la producción de un bien o servicio. En el contexto de la agricultura en zonas desérticas, su importancia se acentúa, ya que permite a agricultores y gestores de recursos hídricos comprender el verdadero impacto de sus prácticas en un entorno donde el agua es el recurso más escaso y valioso.

7.3. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que permite cuantificar los impactos ambientales asociados a productos y/o servicios a través de todo su ciclo de vida, es decir desde la extracción de las materias primas hasta la puerta de la fábrica, o su disposición final. Se basa en la ISO 14040 y 14044, y es una herramienta de gestión ambiental que se desarrolla mediante 4 etapas claves, los cuales son (1) objetivos y alcance, (2) análisis de

inventario, (3) análisis de impacto e (4) interpretación de resultados, siendo la segunda etapa clave, debido a que en esta se realiza la recolección de datos de entradas (insumos, materias primas, etc.) y salidas (emisiones al aire, suelo y agua). El ACV permite conocer el perfil ambiental de un producto evaluado (a través de una serie de categorías de impacto, ver anexo Tabla A1), y presentar en que parte del ciclo de vida del producto se encuentra los principales impactos ambientales (también conocidos como hotspot), y poder realizar posibles gestiones ambientales para reducir cargas ambientales (Curran, 2013). En este contexto, esta herramienta ha sido usada en estudios agrícolas para determinar los impactos que presentan cultivos orgánicos vs inorgánicos, uso de aguas residuales, selección de sistemas de riego, entre otros. La Tabla 9 presenta estudios agrícolas donde se ha aplicado el ACV.

Tabla 9. Estudios de Análisis de Ciclo de Vida asociados a agricultura

Nombre Estudio	Objetivo	Resultado	Autor (País)
Evaluación de dos estilos productivos de trigo chileno mediante metodología de análisis de ciclo de vida (ACV)	Evaluar los estilos convencional y orgánico mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV)	Los resultados identificaron que la producción de trigo orgánico presenta menores impactos ambientales que el cultivo convencional.	(Huerta et al., 2012) (Chile)
A Comparative Life Cycle Assessment of Crop Systems Irrigated with the Groundwater and Reclaimed Water in Northern China	Comparar los impactos ambientales del ciclo de vida de los sistemas de cultivos irrigados con agua subterránea y agua recuperada.	La sustitución del agua subterránea por agua regenerada como fuente de riego redujo significativamente el calentamiento global, la acidificación, la disminución de la capa de ozono, la formación de smog y los impactos respiratorios en el ciclo de vida de los sistemas de maíz, soja y trigo.	(Romeiko, 2019) (China)
Energy and Life Cycle Assessment of Potato Production under Groundwater and Surface Water Irrigation Systems in Egypt: A Pathway to Sustainable Agriculture	Evaluó el uso de energía y los impactos ambientales de la producción de papa bajo dos enfoques de riego distintos: riego por pivote central basado en pozos de agua subterránea (Sc-I) y riego por goteo utilizando agua superficial (Sc-II) en Egipto.	El Sc-II demostró el potencial para reducir el consumo de recursos y las emisiones, a la vez que mejora la productividad. El estudio también subraya la importancia de integrar sistemas de riego inteligentes y tecnologías de energía renovable, esencial para conservar los recursos hídricos y reducir las emisiones en la agricultura	(Abdelhamid et al., 2025) (Egipto)

7.4. Aplicación de indicadores ambientales en la agricultura chilena

La aplicación del ACV, huella de carbono y huella de agua en la agricultura de Chile puede dar beneficios a las empresas como el entregar información para certificaciones ambientales, diferenciarse de la competencia, aumentar la competitividad, gestionar recursos escasos y adaptarse al cambio climático. Además, pueden entregar información para la toma de decisiones, evidenciar mejoras de estrategias de circularidad, investigar el desarrollo de nuevas tecnologías y estrategias asociados a la producción de cultivos, entre otros. En este sentido, y bajo la realidad nacional, se presenta a continuación las aplicaciones en que pueden ser usadas las tres herramientas de gestión ambiental en zonas agrícolas chilenas que tienen una alta escasez hídrica.

Aplicación mediante el análisis de ciclo de vida:

- Realizar evaluaciones de impacto ambiental de un producto agrícola, especialmente si estos son comercializados en países extranjeros que requieren un perfil ambiental completo de productos.
- Poder identificar las etapas que generan los principales impactos ambientales del producto (especialmente en categorías de impacto de interés).
- Comparar diferentes tecnologías y alternativas de producción de cultivos, para conocer cual presenta una menor carga ambiental.
- Respalda ambientalmente estrategias de economía circular, como por ejemplo la reutilización de residuos, reducción de energía, uso de aguas reusadas (para conocer su impacto de toxicidad), entre otros.
- Poder generar información para el desarrollo de etiquetas ambientales asociadas a las declaraciones ambientales de producto.
- Entregar información para la toma de decisiones dentro de las empresas agrícolas.

Aplicación mediante la huella de carbono:

- Poder cuantificar las emisiones de GEI ya sea a nivel de empresa o de producto, y con ello determinar los procesos que contribuyen con las mayores cargas de CO₂ eq (para poder realizar gestión ambiental sobre estos)
- Realizar escenarios de comparación de estrategias de reducción de emisiones de GEI, pudiendo esto también ayudar a la neutralidad de carbono de productos y/o empresas.
- Poder apoyar modelos de economía circular donde se requiere respaldar la disminución de GEI por el uso de residuos agrícolas para su uso en energía, uso de fertilizantes orgánicos, entre otros.

Responder a las exigencias asociadas a la demanda de mercados, normativas, certificaciones y etiquetado de huella de carbono.

Aplicación mediante la huella de agua:

- Cuantificar el consumo de agua en la producción de productos agrícolas, identificando los procesos donde existen los mayores consumos, permitiendo la conservación del agua, en especial en zonas de escasez hídrica.
- Evaluar y comparar sistemas, o prácticas, de uso de agua para riego, de manera de reducir el consumo de agua de los productos.
- Diagnosticar sistemas de circularidad, como por ejemplo el uso de aguas reusadas y su impacto en zonas de estrés hídrico.
- Entregar información que permite apoyar políticas, o decisiones, sobre la gestión de agua.

8. Conclusiones y lecciones aprendidas

La implementación de enfoques de economía circular en las MIPYMEs agrícolas chilenas adquiere mayor efectividad cuando se traduce en decisiones operacionales verificables, con indicadores de desempeño definidos a escala predial, asociativa u organizacional. En este tipo de unidades productivas, los resultados dependen menos de la formulación conceptual y más de la capacidad de convertir el enfoque circular en prácticas concretas con seguimiento. En consecuencia, los esquemas más robustos son aquellos que integran financiamiento para inversiones con asistencia técnica, considerando que las restricciones de pequeña escala suelen concentrarse en la ejecución, la gestión cotidiana de los cambios y su sostenibilidad en el tiempo.

En el mismo sentido, la innovación orientada a circularidad requiere una planificación desde la demostración hacia la adopción, evitando que las iniciativas permanezcan como pilotos desconectados de la operación. Para ello, resulta recomendable estructurar rutas de escalamiento que incluyan soporte a la implementación, fortalecimiento de capacidades y acuerdos que contribuyan a asegurar continuidad y demanda, especialmente mediante vínculos con actores tractores o articuladores de mercado. Desde una perspectiva de priorización, la valorización de residuos orgánicos (particularmente mediante compostaje) aparece como una alternativa altamente replicable para MIPYMEs por sus requerimientos relativamente acotados y beneficios agronómicos directos. En contraste, soluciones de mayor complejidad, como la biodigestión y la producción de biogás, tienden a depender de condiciones habilitantes como la asociatividad, una masa crítica de sustratos y un abastecimiento continuo que permita justificar su inversión y operación. Dentro del presente trabajo ha desembocado en la Tabla 10, resumen que permite ver las recomendaciones recogidas y su aplicabilidad.

Por otra parte, herramientas como la huella de carbono, huella de agua y análisis de ciclo de vida pueden ser de gran ayuda para las MIPYMEs agrícolas, ya que pueden cuantificar el impacto que tienen sus productos y conocer cuales son los procesos donde deben realizar gestión para minimizar sus impactos. Además, el uso de estos indicadores ambientales puede servir como respaldo para validar la efectividad de estrategias de economía circular que utilizan las MIPYMEs, así como también poder dar información ambiental que es requerida por empresas extranjeras, o para la toma de decisiones internas de la empresa.

Finalmente, la cooperación territorial es un factor determinante para viabilizar la circularidad en MIPYMEs, al facilitar economías de escala en infraestructura, logística y servicios compartidos, además de reducir barreras de cumplimiento y gestión. En materia hídrica, el reúso constituye una línea estratégica con potencial, pero su expansión requiere capacidades de operación, control y gestión de riesgos, por lo que se recomienda una implementación gradual, comenzando por aplicaciones de menor complejidad y avanzando progresivamente hacia esquemas más exigentes.

Tabla 10 Estrategias, fondos y aplicabilidad para la implementación de la economía circular en Chile.

Estrategia	Fondo	Aplicabilidad	Recomendación
Estrategia circularidad (marco general)	-	Sirve como marco para priorizar acciones y formular proyectos circulares en agricultura (residuos, innovación, regulación, territorio).	Bajar a un plan predial/organizacional con 2-3 metas simples (p. ej., % valorización orgánica; m ³ /ha; costos de disposición evitados). Ej.: predio frutícola incorpora compostaje.
Manejos complementarios (adopción y soporte):	-	Alta aplicabilidad porque combina inversión y acompañamiento técnico, clave para MIPYMEs.	Implementar “paquete” inversión+asesoría: manejo de suelos + uso de compost + ajuste de fertilización con seguimiento técnico.
Poda (gestión/valorización): FIA + enfoque orgánicos	-	Útil en frutales/viñas donde la poda es flujo relevante y puede valorizarse localmente con bajo/medio CAPEX.	Piloto simple: triturado + compostaje (solo o mezclado). Ej.: poda + residuos vegetales → compost para suelo y reducción de compra de enmiendas.
Búsqueda de sinergia entre empresas locales (simbiosis): Territorio Circular (CORFO)	CORFO	Muy alta aplicabilidad: facilita redes y articulación territorial para coordinar flujos de residuos/insumos entre actores locales	Circuitos cortos: packings + productores → acopio de orgánicos para compost; cooperativa coordina retiro de plásticos agrícolas con gestor. ,
Tecnología y eficiencia de insumos	FIA + INDAP	Aplica para bajar costos de agua/energía/insumos e introducir tecnología con validación y escalamiento.	Ruta recomendada: piloto → adopción. Ej.: sensores de riego se validan (FIA) y luego se adoptan a escala con inversión/asesoría (INDAP). ,

Riego por goteo	LEY 18500 fomento al riego	Alta aplicabilidad por impacto directo en eficiencia hídrica y resiliencia (especialmente en escasez).	Implementar por etapas y asegurar mantenimiento (filtros/presión). Ej.: goteo + programación por fenología para mejorar uniformidad y evitar pérdidas.
Sensores (humedad/telemetría/control)	FIA	Útil donde hay brecha de manejo de riego; requiere soporte para que la tecnología se use y se mantenga.	Ej.: sondas de humedad + protocolo simple de lectura semanal para decisiones de riego y fertirriego; capacitación breve y práctica.
Energía renovable (autoconsumo/eficiencia)	CORFO a través de SOFOFA hub	Aplicable en bombeo, packing, frío; requiere buen dimensionamiento por estacionalidad.	Diagnóstico energético breve + dimensionamiento por temporada. Ej.: solar para bombeo + eficiencia (motores/variadores) para mejorar retorno.
Reutilización de aguas residuales (aguas grises)	Ley 21.075	Alta aplicabilidad donde existan aguas grises y usos permitidos; exige aprobación sanitaria y operación controlada.	Ej.: aguas grises tratadas para riego de áreas no productivas/uso permitido; diseñar operación simple y control básico para cumplir SEREMI.
Valorización de residuos orgánicos y biomasa (marco país)	Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO) Chile 2040 a través de instituciones.	Muy alta aplicabilidad: respalda masificación de compostaje/vermicompostaje e infraestructura de valorización.	Definir escala (predial vs asociativa) y continuidad de flujo. Ej.: compostaje comunitario (feria/packing + productores) para bajar costos unitarios.
Compostaje (implementación directa)	INDAP a través del programa de desarrollo de inversiones (PDI)	Muy aplicable (CAPEX bajo/medio) y con beneficios agronómicos (suelo, retención de humedad, fertilidad).	Protocolo simple (mezcla, humedad, volteo, tiempos) . Ej.: compost predial para reducir fertilizantes.

9. Bibliografía

- Abdelhamid, M. A., Baraka, S. M., Ali, K. A. M., Zhang, Z., & Hendy, Z. M. (2025). Energy and Life Cycle Assessment of Potato Production under Groundwater and Surface Water Irrigation Systems in Egypt: A Pathway to Sustainable Agriculture. *Potato Research*, 68(3), 3447-3473. <https://doi.org/10.1007/s11540-025-09885-7>
- AFIPA. (2025). CampoLimpio impulsa la sostenibilidad agrícola con foco en la Ley REP y el reciclaje de envases. In *Asociación Nacional de Fabricantes e Importadores de Productos Fitosanitarios Agrícolas*. <https://www.afipa.cl/campolimpio-impulsa-la-sostenibilidad-agricola-con-foco-en-la-ley-rep-y-el-reciclaje-de-envases/>
- Agriculture Institute. (2023). *Understanding the Benefits of Pruning for Plant Health*. https://agriculture.institute/basic-horticulture/benefits-of-pruning-for-plant-health/?utm_source
- AgroDesierto. (2024). *AgroDesierto - Economía circular y sostenibilidad para la agricultura del norte de Chile*. <https://agrodesierto.cl/>
- Agrorecicla. (2022). Programa Agrorecicla. In *AgroRecicla: formación sobre reciclaje y logística inversa de envases*. <https://agrorecicla.cl/>
- Allohverdi, T., Mohanty, A. K., Roy, P., & Misra, M. (2021). A Review on Current Status of Biochar Uses in Agriculture. *Molecules*.
- Areosa, I., Martins, T. A. E., Lourinho, R., Batista, M., Brito, A. G., & Amaral, L. (2024). Treated wastewater reuse for irrigation: A feasibility study in Portugal. *Science of the Total Environment*, 954, 176698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176698>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2025). Ley 18450 - FOMENTO DE LA INVERSION PRIVADA EN OBRAS DE RIEGO Y DRENAJE (actualización). In www.bcn.cl/leychile. <https://www.bcn.cl/leychile>
- Caro, D. (2018). Carbon Footprint. In *Encyclopedia of Ecology, 2nd Edition* (2nd ed.). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10752-3>
- Chapagain, A. K., Network, W. F., & Hague, T. (2017). Water Footprint : State of the Art :

What , Why , and How ? In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (Vol. 4). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10164-2>

Chung, D. K., & Le, N. P. (2023). *of Agricultural Sciences Linear or Circular Economy : A Review of Theories , Practices , and Policy Recommendations for Vietnam*. 6(3), 1832-1845.

CNR. (2020). *Ley N°18.450 de fomento al riego y drenaje comisión nacional de riego*.
https://expochileagricola.cl/wp-content/uploads/2021/05/Tripticos-CNR_compressed-1.pdf

Comisión Europea. (2015). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52015DC0614>

Comisión Europea. (2020). *Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones - Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52020DC0098>

Comisión Europea. (2025a). *La política agrícola común en pocas palabras*.
https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-glance_es

Comisión Europea. (2025b). *Política agrícola común*.
https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy_es

CORFO, C. de F. de la P. (2021). *Programa Tecnológico para el Desarrollo de la Agricultura en Zonas Áridas - CORFO*.
https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatoria/pt_agricultura_zonas_aridas/

Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273-277.
<https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002>

Darzi-naftchali, A., Berger, M., & Batoukhteh, F. (2025). Heliyon Enhancing food security

while reducing environmental impacts : Life cycle assessment of cultivation-irrigation systems and yield gap closure in paddy fields. *Heliyon*, 11(2), e42028. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42028>

Decreto 40. (2024). *Aprueba Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias Básicas Para la Reutilización de Aguas Grises*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1203416>

Directiva 278/CEE. (1986). *Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:31986L0278>

ECBF. (2019). *European Circular Bioeconomy Fund (ECBF)*. <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/financing/european-circular-bioeconomy-fund-ecbf>

ECBF. (2025). *European Circular Bioeconomy Fund (ECBF)*. https://www.eib.org/en/products/equity/funds/european-circular-bioeconomy-fund?utm_source

ECCA. (2017). *Adopting Circular Economy for internationalization and global competitiveness of European SMEs in Building and Construction*. <http://circularconstruction.eu/wp-content/uploads/2016/06/D2.1-Circular-Construction-preliminary-review.pdf>

EIB. (2022). *Ukraine: EIB supports the modernisation of agriculture with USD 120 million*. <https://www.eib.org/en/press/news/ukraine-eib-supports-the-modernisation-of-agriculture-with-usd-120-million>

EIB. (2024). *Evaluation of EIB support for agriculture and bioeconomy outside the European Union from 2014 to 2023*. https://www.eib.org/files/publications/20240188_evaluation_support_for_agriculture_and_bioeconomy_outside_the_eu_2014_2023_en.pdf

EIB. (2025a). *EIB Group at a glance*. <https://www.eib.org/en/about/at-a-glance/index>

- EIB. (2025b). *European Investment Bank (EIB)*. https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-investment-bank-eib_en#overview
- EIB. (2025c). *Spain: EIB and Extremadura regional government sign €90 million loan to co-finance agriculture projects in the region*. <https://www.eib.org/en/press/all/2025-461-eib-and-extremadura-regional-government-sign-eur90-million-loan-to-co-finance-agriculture-projects-in-the-region>
- El-Marsafawy, S. M., & Ali Ibrahim Mohamed. (2021). Water footprint of Egyptian crops and its economics. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4711-4721. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.019>
- European Commission. (2025a). *Agriculture and rural development*. https://agriculture.ec.europa.eu/cap-my-country/rural-development_en
- European Commission. (2025b). *European Research Executive Agency*. https://rea.ec.europa.eu/funding-and-grants/horizon-europe-cluster-6-food-bioeconomy-natural-resources-agriculture-and-environment/circular-economy-and-bioeconomy-sectors_en?utm_source
- European Commission. (2025c). *Waste Framework Directive*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en
- European Investment Bank. (2020). *The EIB Circular Economy Guide - Supporting the circular transition*. https://www.eib.org/files/publications/thematic/circular_economy_guide_en.pdf
- European Union. (2020). *Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). *Methods and technologies to improve efficiency of water use*. 44(July), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>
- FAO. (1997). *Economics of irrigation*.

<https://www.fao.org/4/w7314e/w7314e0h.htm#TopOfPage>

Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., Aravinthan, T., Lokuge, W., & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction - A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 173(105745). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>

Fetting, C. (2020). *The European Green Deal*. https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf

Folorunso, E. A., Schmutz, Z., Gebauer, R., & Mraz, J. (2023). The economic viability of commercial-scale hydroponics: Nigeria as a case study. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18979>

Fraunhofer Chile. (2025). *Agri PV: energía fotovoltaica al servicio del sector agrícola*. https://www.fraunhofer.cl/es/proyectos/agro-pv.html?utm_source

Gallego-Schmid, A., Vásquez-Ibarra, L., Guerrero, A. B., Henninger, C. E., & Rebolledo-Leiva, R. (2025). Circular economy in a recently transitioned high-income country in Latin America and the Caribbean: Barriers, drivers, strengths, opportunities, key stakeholders and priorities in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144429>

Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741>

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*.

Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint of humanity*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>

- Huerta, H., Mu, E., & Navarro, M. (2012). Evaluation of two production methods of Chilean wheat by life cycle assessment (LCA). *IDESIA (Chile)*, 30, 101-110. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292012000200013>
- IBD, B. I. de D. (2025). *IDB Tokosova: Technified Irrigation for Family Farming in the Central South Zone of Chile*. <https://www.iadb.org/en/project/CH-L1185>
- IFC, C. F. I. (2025). IFC Invests CLP 23 Million in Securitized Bond Issued by Copeval to Support More Than 50,000 Farmers in Chile. In *IFC*. <https://www.ifc.org/en/pressroom/2025/ifc-invests-clp-23-million-in-securitized-bond-issued-by-copeval>
- Institute for Government. (2017). *Common Agricultural Policy*. <https://www.instituteforgovernment.org.uk/article/explainer/common-agricultural-policy>
- ISO 14046. (2014). *Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>
- Jaramillo, F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater Reuse in Agriculture : A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability*, 9(1734). <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Keeffe, O., Stein, S., Curran, M., Zikeli, S., Siegmund-schultze, M., & Baumgart, L. (2025). How to square the circle? A conceptual framework synergising strategies for circular agriculture to tackle climate change and enhance overall on-farm sustainability. *Ambio*, 54, 1334-1352. <https://doi.org/10.1007/s13280-025-02154-4>
- Khan, A., Panthari, D., Sharma, R. S., Punetha, A., Singh, A. V., & Upadhayay, V. K. (2023). Chapter 6 - Biofertilizers: a microbial-assisted strategy to improve plant growth and soil health. In *Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management* (pp. 97-118). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91643-1.00007-7>
- Kotagama, H., Ahmed, M., & Al-Haddabi, M. (2016). Cost evaluation of desalination and sewage treatment based on plants operated in Oman and use of software models. *Desalination and Water Treatment*, 57(19), 8649-8656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1027274>

Kowalczyk, Z., & Kuboń, M. (2022). Assessing the impact of water use in conventional and organic carrot production in Poland. *Scientific Reports*, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07531-7>

Loconsole, D., Elia, M., Conversa, G., Lucia, B. De, Cristiano, G., & Elia, A. (2025). Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture. *Agronomy*, 15(12), 2788. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy15122788>

Mazur-Wierzbicka, E. (2021). Circular economy: advancement of European Union countries. *Environmental Sciences Europe*, 33(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00549-0>

Mdallal, A., Yasin, A., Mahmoud, M., Abdelkareem, M. A., Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2025). A comprehensive review on solar photovoltaics: Navigating generational shifts, innovations, and sustainability. *Sustainable Horizons*, 13, 100137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100137>

Ministerio de Hacienda. (2025). *Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural*. <https://fondoseuropeos.gob.es/es-es/fondosprogramas/Paginas/feader.aspx>

MITECO. (2025). ¿Qué es LIFE? <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/ayudas-subvenciones/programa-life/que-es-life.html>

MITECO, M. para la T. E. y el R. D. (2017). Pacto por una Economía Circular. In *Pacto por una Economía Circular*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/pacto-por-una-economia-circular.html>

MITECO, M. para la T. E. y el R. D. (2020). *ESPAÑA CIRCULAR 2030 - Estrategia Española de Economía Circular*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532_mod_tcm30-509532.pdf

MMA, M. del M. A. (2021). *HOJA DE RUTA PARA UN CHILE CIRCULAR AL 2040*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/HOJA-DE-RUTA-PARA-UN-CHILE-CIRCULAR-AL-2040-ES-VERSION-ABREVIADA.pdf>

- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Muthu, D. S. S. (2020). Textile processing and greenhouse gas emissions: methods for calculating the product carbon footprint of textile products. In *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain* (Second Edi).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819783-7.00003-X>
- Nowak-Marchewka, K., Osmólska, E., & Stoma, M. (2025). Progress and Challenges of Circular Economy in Selected EU Countries. *Sustainability (Switzerland)*, 17(1).
<https://doi.org/10.3390/su17010320>
- Nuruzzaman, M., Bahar, M. M., & Naidu, R. (2025). Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation. *Science of The Total Environment*, 962, 178398.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178398>
- Obijanya, C. C., Yakamercan, E., Karimi, M., Veluru, S., Simko, I., Eshkabilov, S., & Simsek, H. (2025). Agricultural Irrigation Using Treated Wastewater : Challenges and Opportunities. *Water*, 17(2083), 1-22.
- Ping, Y. (2023). Hydroponics : A Renewable and Efficient Modern Agriculture Technique. *Agrotechnology*, 12(1000315), 1000315. <https://doi.org/10.35248/2168-9891.23.12.315>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. *Energies*, 16(1690).
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16041690>
- Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 10, 3474-3493.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
- Pryshlakivsky, J., & Searcy, C. (2013). Fifteen years of ISO 14040 : a review. *Journal of Cleaner Production*, 57(15).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.038>

- Ranganathan, J., Murphy, A. J., Eaton, R., & McMahon, M. (2001). *Protocolo de gases de efecto invernadero*. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/protocolo_spanish.pdf
- Reglamento (EU) 1009. (2019). *Por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) n.o 1069/20*. <https://www.boe.es/doue/2019/170/L00001-00114.pdf>
- Reglamento (UE) 741. (2020). *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua (Texto pertinente a efectos del EEE)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32020R0741>
- Reyes, D. A. (2021). *Economía Circular: Un camino para la sustentabilidad agrícola*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. https://opia.fia.cl/601/articles-120619_archivo_01.pdf
- Rivulis. (2013). *Riego por goteo vs. Pivot Central: Análisis de Costo y Eficiencia en la Producción de Maíz*. <https://es.rivulis.com/row-crops/analisis-de-costos/>
- RMCG. (2018). *Comparison of irrigation system costs - update 2018*. [https://www.gbcma.vic.gov.au/downloads/Farm_Water_Program/2019-Comparison of irrigation system costs.pdf](https://www.gbcma.vic.gov.au/downloads/Farm_Water_Program/2019-Comparison_of_irrigation_system_costs.pdf)
- Romeiko, X. X. (2019). A Comparative Life Cycle Assessment of Crop Systems Irrigated with the Groundwater and Reclaimed Water in Northern China. *Sustainability*, 11(2743), 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su11102743>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542-559. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Stephan, P., Boulay, A.-M., Berger, M., Hadjikakou, M., & Motoshita, M. (2017). Ecological Indicators. *Ecological Indicators*, 72, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.051>

- Stylianou, M., Papamichael, I., Voukkali, I., Tsangas, M., Omirou, M., Ioannides, I. M., & Zorpas, A. A. (2023). LCA of Barley Production : A Case Study from Cyprus. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20(2417).
- Ugalde, O. (2021). EVOLUCIÓN HISTÓRICA-EPISTEMOLÓGICA NUEVO PARADIGMA DEL DESARROLLO? ECONOMY : TOWARDS A NEW DEVELOPMENT PARADIGM? *Economía & Sociedad*, 26, 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.15359/eyes.26-59.5>
- Unión Europea. (2022). *European Agricultural Fund for Rural Development*. https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/european-agricultural-fund-for-rural-development.html?utm_source
- Universidad de Chile. (2025). *U. de Chile y empresa estatal china concretan alianza para construir innovadora granja demostrativa en Maipú - Universidad de Chile*. <https://uchile.cl/noticias/230717/u-de-chile-firma-acuerdo-para-instalar-granja-demostrativa-0>
- Universidad de Talca. (2021). Crean plataforma para optimizar el riego de grandes y pequeños agricultores. In *Universidad de Talca*. <https://www.otalca.cl/noticias/crean-plataforma-para-optimizar-el-riego-de-grandes-y-pequenos-agricultores/>
- Upadhayay, S., Alqassimi, O., Khashadourian, E., Sherm, A., & Prajapati, D. (2024). Development in the Circular Economy Concept : Systematic Review in Context of an Umbrella Framework. *Sustainability*, 16(1500). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16041500>
- US-EPA. (2025). *Integrated Pest Management (IPM) Principles*. <https://www.epa.gov/safepestcontrol/integrated-pest-management-ipm-principles>
- Vinyes, E., Asin, L., Mu, P., Boschmonart, J., & Gasol, C. M. (2017). Life Cycle Assessment of apple and peach production , distribution and consumption in Mediterranean fruit sector. *Journal of Cleaner Production*, 149, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.102>
- Weltun Mapu. (2017). Cooperativa agrícola de reciclaje y valorización de residuos agroindustriales y comunitarios Weltun Mapu. In *Weltun Mapu*.

<https://weltunmapu.cl/>

Zisopoulos, F. K., Schraven, D. F. J., & Jong, M. De. (2022). Resources , Conservation & Recycling How robust is the circular economy in Europe ? An ascendancy analysis with Eurostat data between 2010 and 2018. *Resources, Conservation & Recycling*, 178(December 2021), 106032. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106032>

10. Anexos

Tabla A1. Ejemplo de categorías de impacto usados en ACV, en base a información de Product Environmental Footprint de la Unión Europea

Categoría de impacto	Abreviación	Unidad
Acidificación	AC	mol H ⁺ eq
Cambio climático	CC	kg CO ₂ eq
Ecotoxicidad en agua dulce	ECf	CTUe
Partículas en suspensión	PM	disease inc.
Eutrofización marina	Em	kg N eq
Eutrofización de agua dulce	Ef	kg P eq
Uso del suelo	LU	Pt
Agotamiento de la capa de ozono	OD	kg CFC11 eq
Formación fotoquímica de ozono	POF	kg NMVOC eq
Uso de recursos fósiles	RF	MJ
Uso de recursos minerales y metales	RM	kg Sb eq



Cofinanciado por
la Unión Europea



"AL-INVEST Verde" es un programa de 4 años financiado por la Unión Europea. AL-INVEST Verde movilizará los conocimientos técnicos y la inversión de la UE en apoyo de la creación de alianzas con el sector privado en AL. El objetivo global es promover el crecimiento sostenible y la creación de empleo apoyando la transición hacia una economía baja en carbono, eficiente en recursos y más circular en AL."

"Esta publicación ha sido realizada con el apoyo financiero de la Unión Europea a través de Sequa. Su contenido es responsabilidad exclusiva de Eurecat y no refleja necesariamente las opiniones de la Unión Europea, Sequa o del consorcio responsable de la ejecución del programa AL-INVEST Verde. "