

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**PROPUESTA TÉCNICA DE PRÁCTICAS AGRÍCOLAS SUSTENTABLES  
UTILIZADAS COMO BASE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA  
SIGESS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO**

**POR**

**KEVIN NICOLÁS MIRANDA ARAYA**

**MEMORIA PRESENTADA A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE**

**2026**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**PROPUESTA TÉCNICA DE PRÁCTICAS AGRÍCOLAS SUSTENTABLES  
UTILIZADAS COMO BASE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA  
SIGESS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO**

**POR**

**KEVIN NICOLAS MIRANDA ARAYA**

**MEMORIA PRESENTADA A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE**

**2026**

Aprobada por:

Profesor Asociado, Cristina Muñoz V.  
Ing. Agrónomo, Dra.

---

Guía

Profesor Titular, Mauricio Schoebitz C.  
Ing. Agrónomo, Dr.

---

Asesor

Profesional, Patricia Sanzana A.  
Ing. Forestal.

---

Asesor Externo

Profesor Asociado, Manuel Faúndez S.  
Ing. Agrónomo, Mg. Econ.

---

Decano

**TABLA DE CONTENIDOS**

	<b>Página</b>
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Materiales y métodos.....	3
Resultados y discusión.....	5
Conclusiones.....	22
Referencias.....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		<b>Página</b>
Figura 1	Mapa de zonas homogéneas agroecológicas de la Región del Biobío.....	6
Figura 2	Mapa de zonas con suelos erosionados de la Región del Biobío.....	7
Figura 3	Mapa de erosión potencial en la Región del Biobío.....	7
Figura 4	Indicadores de pobreza por ingresos y pobreza multidimensional.....	9
Figura 5	Comunas con mayor cantidad de prácticas período 2015-2024.....	9
Figura 6	Mapa focalización de comunas seleccionadas.....	11
Tabla 1	Magnitud del impacto en escala de colores.....	4
Tabla 2	Equivalencia entre magnitudes de impacto y puntaje asignado.....	5
Tabla 3	Descripción de los lineamientos del Programa SIGESS y su impacto. ....	12
Tabla 4	Componentes de impacto y su relación con los objetivos del SIGESS .....	13
Tabla 5	Incidencia de las prácticas agrícolas en los componentes de impacto del suelo y su compatibilidad con los objetivos del Programa SIGESS.....	14

## **PROPUESTA TÉCNICA DE PRÁCTICAS AGRÍCOLAS SUSTENTABLES UTILIZADAS COMO BASE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA SIGESS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO**

### **TECHNICAL PROPOSAL OF SUSTAINABLE AGRICULTURAL PRACTICES AS A BASIS FOR THE IMPLEMENTATION OF THE SIGESS PROGRAM IN THE BIOBÍO REGION**

**Palabras índice adicionales:** Degradación de suelos, focalización comunal, criterios de compatibilidad, instrumentos de fomento, manejo sostenible del suelo

#### **RESUMEN**

El Programa de Recuperación de Suelos Degradados (SIRSD-S) finalizó su vigencia, dando paso al nuevo Sistema de Incentivos para la Gestión Sostenible de los Suelos Agropecuarios (SIGESS), orientado a promover una gestión sustentable del recurso suelo. En este contexto, el presente estudio tuvo por objetivo formular una propuesta técnica de prácticas agrícolas con pertinencia para la Región del Biobío, como apoyo a la futura implementación del programa. Para ello, se sistematizaron prácticas bonificadas entre 2015 y 2024 realizadas por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y el Instituto de desarrollo Agropecuario (INDAP), se analizaron documentos oficiales legislativos y científicos, y se desarrolló una focalización comunal considerando criterios geográficos y socioeconómicos, identificándose comunas prioritarias como Cañete, Tirúa, Alto Biobío, Santa Bárbara, Santa Juana y Quilaco. La propuesta se estructuró mediante fichas técnico-conceptuales por práctica, evaluando seis componentes de impacto en el suelo —productividad, conservación, biodiversidad, agua, carbono y emisiones— establecidos en el presente estudio y clasificándolas según criterios de compatibilidad, alineándolas así con los objetivos del nuevo sistema de incentivos. La cartera de prácticas compatibles entrega una base técnica orientadora para la posible toma de decisiones y/o ejecución del programa en coherencia con la diversidad territorial de la Región del Biobío.

#### **SUMMARY**

The Degraded Soil Recovery Program (SIRSD-S) expired, giving rise to the processing of the Sistema de Incentivos para la Gestión Sostenible de los Suelos Agropecuarios (SIGESS), a national policy aimed at promoting sustainable soil

resource management in Chile. In this context, the objective of this study was to formulate a technical proposal of agricultural practices relevant to the Biobío Region, as a tool to support the future implementation of the program. To this end, practices subsidized between 2015 and 2024 by the Agricultural and Livestock Service (SAG) and the institute for Agricultural Development (INDAP) were systematized, official legislative and scientific documents were analyzed, and a communal-level focus was developed based on geographical and socioeconomic criteria, identifying priority communes such as Cañete, Tirúa, Alto Biobío, Santa Bárbara, Santa Juana, and Quilaco. The proposal was structured through technical-conceptual fact sheets for each practice, evaluating six soil impact components—productivity, conservation, biodiversity, water, carbon, and emissions—defined in this study and classifying practices according to compatibility criteria. The resulting portfolio of compatible practices provides a technical basis to guide decision-making and future program implementation in coherence with the territorial diversity of the Biobío Region.

## **INTRODUCCIÓN**

El suelo es un recurso natural limitado y no renovable, esencial para el equilibrio ecosistémico. Proporciona servicios ecosistémicos clave como la regulación hidrológica, almacenamiento de nutrientes y carbono, hábitat para microorganismos que sustentan cultivos y mantenimiento de la biodiversidad, todo vital para el bienestar humano y la resiliencia ambiental. En la agricultura, actúa como base de los sistemas productivos y de la seguridad alimentaria global. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Panel Técnico Intergubernamental sobre Suelos (ITPS) estiman que más del 95% de los alimentos dependen, directa o indirectamente, de este recurso (FAO y ITPS, 2015). Amenazas como la erosión, la pérdida de materia orgánica, la deforestación y el cambio climático comprometen su sostenibilidad. El Nuevo Atlas Mundial de Desertificación indica que, en 2018, más del 75% de la superficie terrestre mostraba degradación, proyectándose a un 90% para 2050 de no adoptarse medidas efectivas (Cherlet *et al.*, 2018).

En Chile, la erosión afecta 36,5 millones de hectáreas (48,7% del territorio total), con 18,1 millones en grado severo o muy severo (Centro de Información de Recursos Naturales [CIREN], 2010). A esto se suma la presión por el cambio

de uso de suelo debido a la expansión de parcelaciones rurales habitacionales, lo que representa un desafío para la sostenibilidad territorial (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], 2024).

Para enfrentar esto, el Estado impulsó instrumentos como el Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental de los Suelos Agropecuarios (SIRSD-S), iniciado en 1997 como Programa de Restauración de Suelos Degradados, formalizado en 1999 (Ley N.º 19.604), reestructurado en 2010 (Ley N.º 20.412) y prorrogado tras su término oficial mediante Ley de Presupuesto de la Nación. El programa otorga bonificaciones por concursos para prácticas agrícolas bonificables (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias [ODEPA], 2006; Cartes Sánchez, 2020). Chile también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Ley Marco de Cambio Climático (Ley N.º 21.455) y las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDC) asumidas en el Acuerdo de París, reconociendo el suelo como eje estratégico para mitigación y adaptación (Ministerio del Medio Ambiente, 2025). Actualmente se tramita el proyecto de ley del Sistema de Incentivos para la Gestión Sostenible de los Suelos (SIGESS), el cual busca fortalecer el recurso suelo y los sistemas productivos, frente a desafíos climáticos, ecológicos y sociales (Ministerio de Agricultura, 2023).

El presente documento tiene por objetivo formular una propuesta técnica de prácticas agrícolas utilizadas en la Región del Biobío, que sirva como herramienta de orientación para la implementación del futuro programa SIGESS en el territorio, considerando sus objetivos.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación adoptó un enfoque cualitativo y descriptivo, basado en análisis documental y sistematización de información técnica, científica y normativa del SIGESS, en la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura del Biobío. Se realizó una selección de comunas para delimitar escenarios representativos de condiciones críticas a nivel socioambiental dentro de la región. En particular, se consideraron comunas que presentan mayor degradación de suelos, limitaciones para el desarrollo rural y disponibilidad de información histórica.

1. Se elaboró una matriz de información a partir de la revisión documental de la Ley N.º 20.412, su reglamento (Decreto N.º 51) e información histórica

correspondiente a la ejecución de prácticas bonificadas bajo los planes de manejo del programa SIRSD-S (2015-2024), con datos de SAG e INDAP.

2. Se analizó el Boletín N.º 16.391-01 del programa SIGESS y antecedentes complementarios legislativos, sintetizando sus objetivos. Esto definió criterios de compatibilidad que analizan cuáles prácticas del SIRSD-S tienen coherencia con los objetivos del SIGESS, a través de la medición de componentes de impacto que permiten analizar la incidencia de dichas prácticas sobre el suelo.

3. Se elaboró una propuesta técnica de cartera de prácticas sustentables, como soporte para la implementación del Programa SIGESS en la Región del Biobío. La propuesta evaluó qué prácticas, actualmente vigentes, presentan una alta correspondencia con los objetivos del Programa SIGESS, de acuerdo con los criterios de compatibilidad.

Cada práctica evaluada constó de una ficha técnico-conceptual, que incluye una breve descripción respaldada por literatura científica. Esta descripción fundamenta los seis componentes de impacto definidos en el presente estudio: productividad, conservación del suelo, biodiversidad, agua, carbono, gases de efecto invernadero (GEI), así como la magnitud de dichos impactos. La magnitud expresa el grado de efecto que cada práctica tiene sobre el suelo en función de los seis componentes. Esta se representó mediante una escala cromática de seis niveles, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Magnitud del impacto en escala de colores.

<b>Simbología</b>	<b>Color</b>
Muy beneficioso	<b>Verde</b>
Moderadamente beneficioso	<b>Verde Claro</b>
Neutral (sin efecto positivo ni negativo)	<b>Amarillo</b>
Moderadamente perjudicial	<b>Naranja</b>
Muy perjudicial	<b>Marrón</b>
Sin evidencia disponible (no se ha reportado efecto)	<b>Sin Color</b>

Fuente: Tabla adaptada de ODEPA (2025).

**Metodología para la asignación de puntajes y clasificación de compatibilidad.** Para integrar de manera cuantitativa la información cualitativa sobre los efectos de cada práctica, se empleó un sistema de puntuación simple basado en el marco conceptual *Framework for Evaluating Sustainable Land*

*Management* (FESLM) de Smyth y Dumanski (1993). Este marco establece que las evaluaciones cualitativas pueden transformarse en escalas numéricas. En coherencia con este enfoque, cada categoría de magnitud de impacto utilizada se convirtió en un valor numérico dentro de una escala simétrica que representa beneficios y perjuicios relativos, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Equivalencia entre magnitudes de impacto y puntaje asignado.

<b>Magnitud de impacto</b>	<b>Puntaje Asignado</b>
Muy Beneficioso	+2
Moderadamente Beneficioso	+1
Neutral	0
Moderadamente Perjudicial	-1
Muy perjudicial	-2
Sin Evidencia	0*

Fuente Elaboración propia basada en información de Smyth y Dumanski (1993).

Nota: "0" no se asigna efecto por falta de respaldo.

Una vez asignados los puntajes a los componentes evaluados, se calculó un índice de compatibilidad para cada práctica utilizando la media aritmética de los puntajes obtenidos. El uso del promedio evita sesgos por cantidad de componentes y permite comparar prácticas bajo un criterio común (Smyth y Dumanski, 1993).

El promedio del puntaje permitió clasificar la compatibilidad de cada práctica con los lineamientos del SIGESS en cuatro niveles:

1. Compatibilidad Muy Alta:  $\geq 1,50$
2. Compatibilidad Alta:  $\geq 0,50$
3. Compatibilidad Media: entre 0,10 y 0,49
4. Compatibilidad Baja:  $< 0,10$

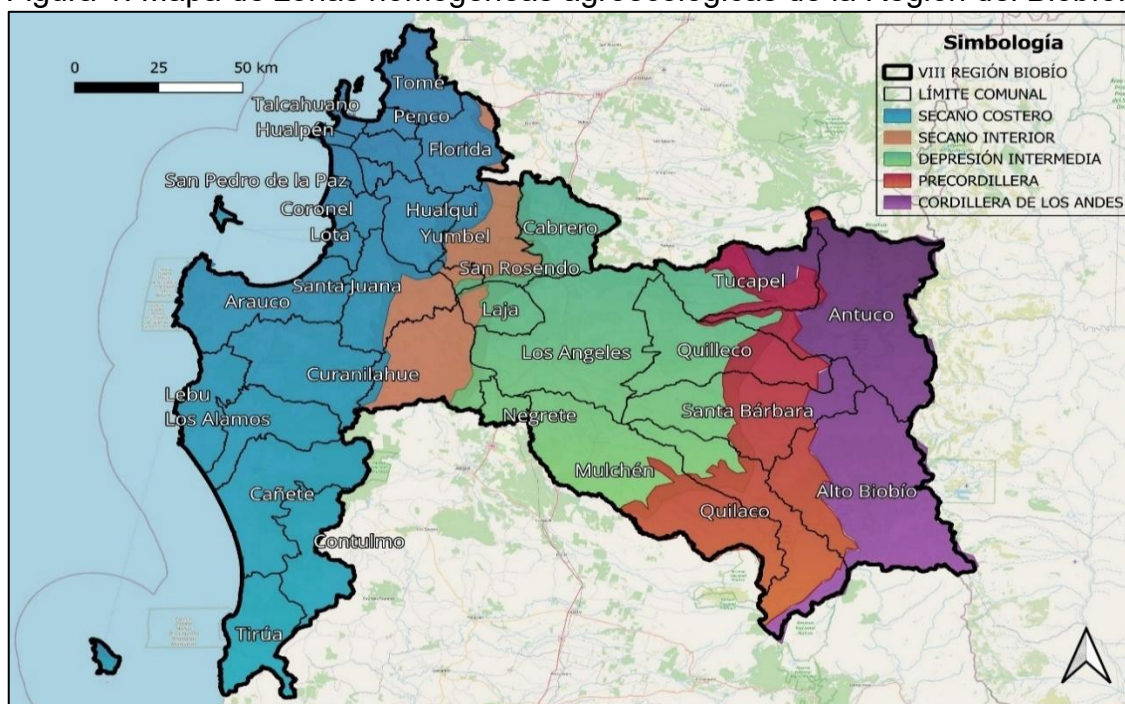
## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Focalización de comunas.** La selección de comunas definida para el análisis en la Región del Biobío consideró territorios que presentan antecedentes de pérdida de suelo, condición que permite analizar la pertinencia de prácticas orientadas a la recuperación y conservación del recurso. Según los datos reportados por González *et al.* (2023), existen territorios que cuentan con una marcada diversidad geográfica, climática y topográfica dentro de la Región, lo

que permite la delimitación de cinco zonas homogéneas agroclimáticas, cada una de estas zonas refleja condiciones ambientales y productivas particulares que influyen en la aptitud agrícola y en el manejo del territorio. Las distintas zonas se representan en la Figura 1.

La diferenciación de zonas homogéneas agroclimáticas presentes en el Biobío considera características geo-climáticas propias de cada territorio, lo que influye en la distribución y la magnitud de los procesos erosivos del suelo.

Figura 1. Mapa de zonas homogéneas agroecológicas de la Región del Biobío.

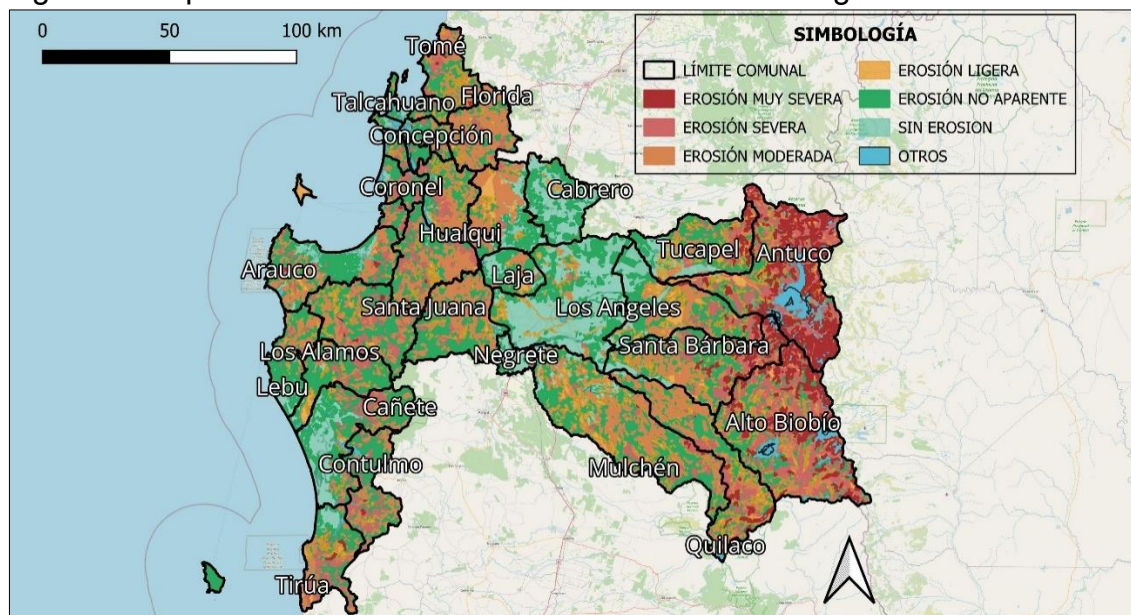


Fuente: Figura adaptada de González *et al.* (2023).

La erosión se define como el proceso mediante el cual los materiales del suelo son desprendidos y transportados por agentes externos, principalmente agua y viento, cuando la energía ejercida por estos supera la resistencia estructural del suelo (FAO, 1977).

En este contexto, dentro de la Región del Biobío, la erosión se manifiesta de manera heterogénea según las condiciones de cada zona, influenciada principalmente por diferencias en el relieve, clima, cobertura vegetal y uso del suelo. Esto se traduce en territorios con mayor presencia de erosión, así como distintos grados de severidad de esta misma, y también territorios propensos a tener un mayor riesgo de erosión futura. La distribución espacial de erosión dentro de la Región se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Mapa de zonas con suelos erosionados de la Región del Biobío.

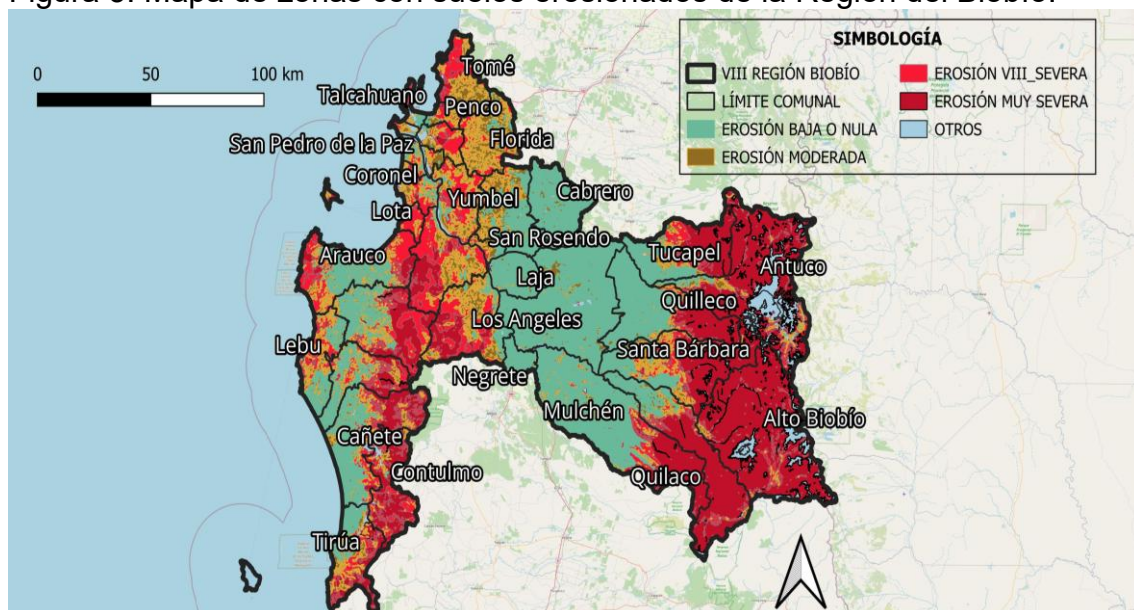


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CIREN (2010).

Dentro de este fenómeno se entiende la erosión potencial como la máxima vulnerabilidad natural del suelo a ser degradado por procesos erosivos, determinada por factores físicos del medio, como clima y topografía, bajo la suposición de ausencia de protección o medidas de manejo (FAO, 1977).

La distribución espacial correspondiente al riesgo de erosión potencial dentro de la Región se representa en la Figura 3; donde se evidencia extensas áreas clasificadas con riesgo alto, muy alto y severo, lo que refleja una elevada susceptibilidad frente a procesos de desprendimiento y transporte de partículas.

Figura 3. Mapa de zonas con suelos erosionados de la Región del Biobío.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CIREN (2010).

El patrón de riesgo de erosión se manifiesta con mayor intensidad en sectores costeros y áreas cordilleranas, zonas que, de acuerdo con sus características agroclimáticas y geomorfológicas, presentan condiciones propicias para el desarrollo de procesos erosivos. En este sentido el concepto de erosión potencial permite evaluar la vulnerabilidad natural del suelo frente a procesos de degradación, independientemente del nivel de erosión actualmente observado. De este modo, incluso en territorios donde la erosión actual es moderada, pueden existir condiciones que favorezcan la intensificación de procesos erosivos (FAO, 1977).

Adicionalmente a los factores físicos y ambientales asociados a la degradación del suelo, el desarrollo rural presenta limitaciones vinculadas a condiciones de vulnerabilidad socioeconómica, las cuales inciden directamente en la capacidad productiva, el acceso a recursos y la resiliencia. En este contexto, el Sistema de Indicadores de Calidad de Vida Rural (SICVIR), elaborado en el marco de la Política Nacional de Desarrollo Rural (PNDR, 2020), incluye, entre otros, el porcentaje de población en situación de pobreza por ingresos y el porcentaje de población en situación de pobreza multidimensional.

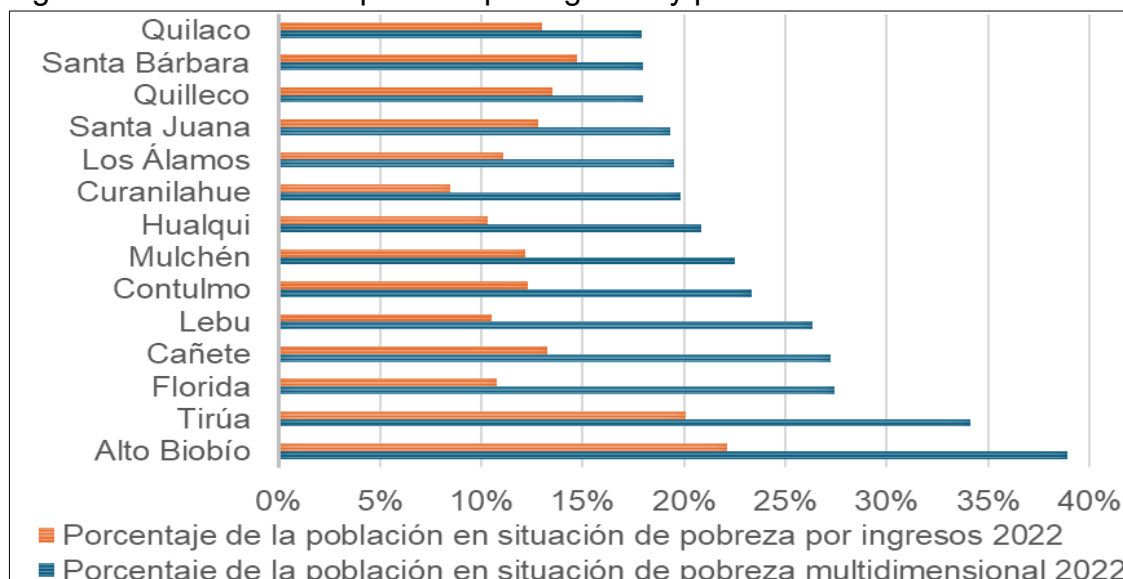
Ambos indicadores fueron utilizados en este estudio para caracterizar las condiciones socioeconómicas de las comunas, considerando que la pobreza por ingresos refleja restricciones económicas directas, mientras que la pobreza multidimensional incorpora carencias estructurales asociadas a educación, salud, trabajo y seguridad social, vivienda y entorno, redes y cohesión social.

La información comunal de ambos indicadores se presenta de manera integrada en la Figura 4, la cual permite comparar simultáneamente los niveles de pobreza por ingresos y la multidimensional. Las comunas analizadas fueron priorizadas considerando un indicador de pobreza por ingresos a partir del 13% y pobreza multidimensional a partir del 18%, lo que arrojó un total de 14 comunas, aportando una visión sintética y complementaria de las limitaciones socioeconómicas presentes en el territorio.

Paralelamente, se recopiló información de registros históricos disponibles asociados a la ejecución de prácticas agrícolas contenidas en los planes de manejo del Programa SIRSD-S, los cuales se distribuyen de manera heterogénea en la región. En este contexto, la Figura 5 presenta la distribución comunal de ejecución de prácticas correspondiente al período 2015 – 2024, con

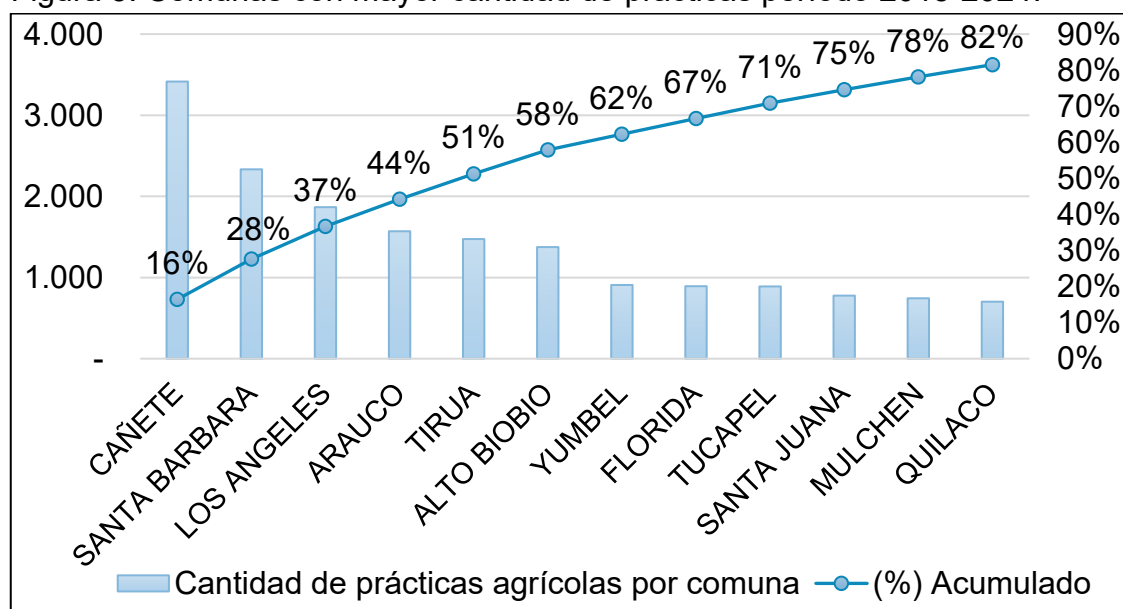
el propósito de identificar aquellas comunas con mayor trayectoria de implementación de prácticas orientadas a la recuperación de suelos y evaluar su pertinencia territorial en el marco del programa, así como su potencial impacto en relación con las condiciones agroecológicas y las limitaciones socioeconómicas presentes en la Región.

Figura 4. Indicadores de pobreza por ingresos y pobreza multidimensional.



Fuente: Elaboración propia basada en información del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2023).

Figura 5. Comunas con mayor cantidad de prácticas período 2015-2024.



Fuente: Elaboración propia a partir de Información histórica INDAP y SAG programa SIRSD-S (2015-2024) Región del Biobío.

A partir del análisis territorial presentado desde las figuras 1 a 5, se identificaron seis comunas con condiciones críticas en la Región del Biobío.

**Cañete, Tirúa y Santa Juana** se ubican en la zona de secano costero, caracterizada por un régimen de precipitaciones concentrado en los meses invernales (González *et al.*, 2023). **Santa Bárbara, Quilaco y Alto Biobío** se localizan en la zona de precordillera, asociada a altos niveles de precipitación y una configuración geomorfológica de origen sedimentario y volcánico (González *et al.*, 2023).

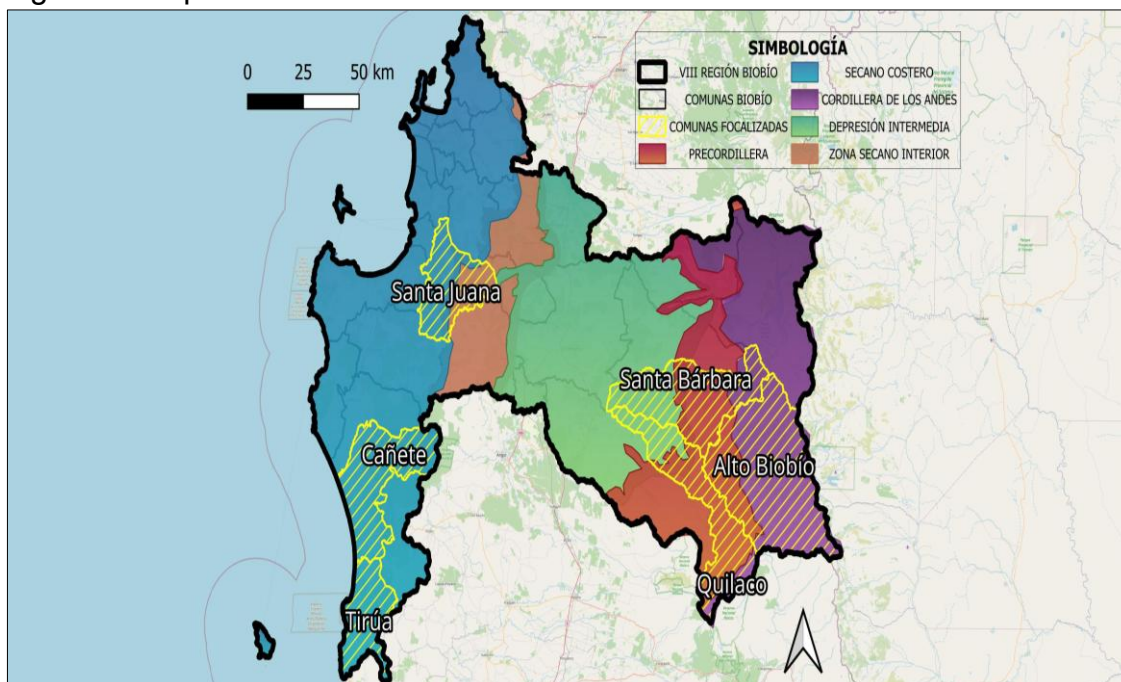
En ambos casos, la configuración topográfica combinada con precipitaciones estacionalmente concentradas favorece el aumento de la escorrentía superficial, reduciendo la capacidad del suelo para resistir la acción erosiva del agua (FAO, 1977). Estas condiciones contribuyen a la presencia de áreas con mayor vulnerabilidad frente a procesos de erosión.

Desde el punto de vista socioeconómico, estas comunas presentan niveles relevantes de pobreza por ingresos, destacando Alto Biobío (22,1%) y Tirúa (20,1%), así como Santa Bárbara (14,7%), Cañete (13,3%), Quilaco (13,0%) y Santa Juana (12,8%), lo que evidencia mayores limitaciones económicas para el desarrollo productivo local. De manera complementaria, el indicador de pobreza multidimensional refuerza este diagnóstico territorial, siendo las más destacadas Alto Biobío (38,9%), Tirúa (34,1%), Cañete (27,3%), Santa Juana (19,3%), Santa Bárbara (18,0%) y Quilaco (17,9%), reflejando limitaciones persistentes para el desarrollo productivo y social de estos territorios.

La información histórica sobre la ejecución de prácticas del Programa SIRSD-S, arrojó que, de un total de 23.478 prácticas, Cañete concentra el mayor número a nivel regional con un 16% y Santa Bárbara representa un 11%. En un nivel intermedio se ubican Tirúa con un 6% al igual que Alto Biobío, mientras que Quilaco considera un 4% al igual que Santa Juana. Esto permite vincular las comunas con una importante trayectoria de implementación del programa en relación con las problemáticas territoriales abordadas en el estudio, como condiciones de degradación de suelos y las limitaciones socioeconómicas presentes en dichos territorios.

La focalización comunal desarrollada en este estudio tiene un carácter orientador y su finalidad es ilustrar escenarios territoriales críticos presentes en la Región del Biobío, para contribuir a la futura implementación del Programa SIGESS considerando las particularidades territoriales. Esta se representa espacialmente en la Figura 6.

Figura 6. Mapa focalización de comunas seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia.

**Criterios de compatibilidad.** El Programa SIGESS establece una serie de directrices y objetivos orientados a la gestión sostenible de los suelos agropecuarios. La Tabla 3 resume estos lineamientos, detallando el impacto de cada uno en la contribución hacia el manejo sostenible de los suelos y la resiliencia de los sistemas productivos. En función de estos lineamientos, se definieron criterios de compatibilidad orientados a evaluar la influencia que las prácticas agrícolas ejecutadas bajo el programa SIRSD-S ejercen sobre la salud del suelo y los sistemas productivos sustentables, y su similitud con los objetivos del Programa SIGESS. Para ello se consideraron seis componentes de impacto: productividad, conservación del suelo, biodiversidad, agua, carbono y emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI) (ODEPA, 2025). La relación entre estos componentes de impacto y los objetivos del Programa SIGESS se presenta en la Tabla 4.

**Identificación de prácticas con mayor afinidad a los lineamientos** Con base en los criterios determinados se evaluaron las distintas prácticas agrícolas consideradas en el estudio que fueron históricamente ejecutadas bajo el programa SIRSD-S, y su compatibilidad con los objetivos del programa SIGESS, a través de los componentes de impacto del suelo, los puntajes asignados y su respectiva categoría de compatibilidad se presenta en la Tabla 5.

Tabla 3. Descripción de los lineamientos del Programa SIGESS y su impacto.

Lineamiento/ Objetivos	Descripción	Impacto en sostenibilidad y resiliencia
Recuperación y conservación de suelos	Gestionar todos los suelos agropecuarios, recuperando los degradados y protegiendo los sanos	Ayuda a sostener propiedades físicas y bioquímicas del suelo; aumenta resiliencia frente a variaciones climáticas favorece productividad a largo plazo
Productividad agrícola sustentable	Mejorar la productividad sin comprometer la sostenibilidad del suelo	Uso eficiente de recursos, adaptación a nuevos patrones climáticos; promueve sistemas productivos sostenibles
Adaptación y mitigación al cambio climático	Incorporar prácticas que reduzcan emisiones de GEI y aumenten resiliencia del sistema agrícola contra eventos climáticos extremos	Refuerza resiliencia de sistemas productivos, contribuye a captura de carbono y mitigación de impactos climáticos, asegurando la estabilidad agrícola y de los suelos
Capacitación y adopción de prácticas	Incrementar conocimiento de los productores para aplicar prácticas sostenibles	Asegura la correcta implementación de prácticas técnicas, fomentando sistemas productivos más resilientes y sostenibles
Nueva tabla de valores de actividades sostenibles	Establecer criterios de focalización de recursos y bonificación de prácticas sostenibles	Permite priorizar prácticas sostenibles, incluidas aquellas de mercados emergentes, aumentando la eficiencia del uso de recursos y fomentando resiliencia productiva
Soberanía alimentaria	Garantizar producción estable y autosuficiencia alimentaria mediante suelos bien manejados	Mejora la seguridad alimentaria regional, promoviendo sistemas agrícolas resistentes y sostenibles frente a variaciones climáticas
Gobernanza fortalecida	Coordinar, planificar y monitorear la ejecución del programa en distintos niveles territoriales	Facilita decisiones basadas en evidencia y focalización regional eficiente, asegurando la efectividad de las prácticas sostenibles y la resiliencia de los sistemas productivos

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Agricultura (2023).

Tabla 4. Componentes de impacto y su relación con los objetivos del SIGESS.

<b>Componente Impacto</b>	<b>Definición</b>	<b>Similitud con Objetivos del programa SIGESS</b>
Productividad	Mantiene y/o aumenta el rendimiento, la calidad de producción o disminuye los costos asociados al riego, al uso de agroquímicos, etc.	Vinculado a productividad agrícola sustentable y soberanía alimentaria
Conservación del suelo	Mantiene y/o mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo	Relacionado con recuperación y conservación de suelos, y la adaptación al cambio climático
Biodiversidad	Aumenta la riqueza y/o abundancia de flora y/o fauna al interior del predio	Contribuye a recuperación y conservación de suelos
Agua	Disminuye la cantidad de riego aplicado o aumenta la retención de agua en el suelo	Relacionado con productividad agrícola sustentable y adaptación al cambio climático
Carbono	Aumenta el contenido de carbono orgánico en el suelo	Vinculado a adaptación y mitigación al cambio climático, recuperación y conservación de suelos
Emisiones de gases de efecto invernadero	Disminuye o no aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero o promueve la captura de carbono en biomasa leñosa a nivel predial	Relacionado con adaptación y mitigación al cambio climático

Fuente: Tabla adaptada de ODEPA (2025).

Tabla 5. Incidencia de las prácticas agrícolas en los componentes de impacto del suelo y su compatibilidad con los objetivos del Programa SIGESS.

Práctica Agrícola	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Puntaje	Compat.
Enmienda orgánica							1,83	Muy Alta
Rotación de cultivos							1,83	Muy Alta
Acondicionamiento de rastrojo							1,67	Muy Alta
Establecimiento de praderas							1,50	Muy Alta
Regeneración de praderas							1,33	Alta
Cero labranzas							1,17	Alta
Cultivo de cobertura							1,17	Alta
Praderas suplementarias							1,00	Alta
Cortina cortaviento							1,00	Alta
Sistemas silvopastoriles, plantación Nativa							1,00	Alta
Establecimiento e incorporación de abono verde							1,00	Alta
Enmiendas calcáreas							0,83	Alta
Construcción microterrazza							0,67	Alta
Zanja de infiltración							0,67	Alta
Subsolador							0,67	Alta
Arado Cincel							0,50	Alta
Control de erosión de cárcavas							0,50	Alta
Protección contra lagomorfos en Sistema Silvopastoril							0,50	Alta
Panel Solar							0,50	Alta
Biofiltros para sedimentos							0,33	Media
Abrevadero de emergencia							0,17	Media
Aplicación de fósforo							0,00	Baja
Construcción de cerco							0,00	Baja
Limpieza Pica Pica ( <i>Ulex europaeus</i> )							0,00	Baja
Nivelación con pala mecánica							0,00	Baja
Despedrado							0,00	Baja
Limpieza matorral							-0,33	Baja

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Componentes de Impacto: C1 Productividad, C2 Conservación suelo, C3 Biodiversidad, C4 Agua, C5 Carbono del Suelo, C6 Emisiones GEI.

El análisis de información histórica de SAG e INDAP (período 2015 – 2024), arroja que las prácticas con mayor porcentaje de ejecución en las 6 comunas seleccionadas fueron: enmiendas calcáreas 24%, aplicación de fósforo 24%, y establecimiento de praderas 18% (sólo planes de manejo de esas 6 comunas).

La evaluación de las prácticas agrícolas arrojó que una gran parte de ellas presenta impactos beneficiosos directos sobre uno o más componentes del suelo, mientras que otras presentan efectos condicionales, dependientes del manejo o de su implementación conjunta con otras prácticas. Asimismo, se identificaron prácticas cuyo impacto es indirecto, en la medida en que no actúan directamente sobre las propiedades edáficas, sino que modifican condiciones del sistema productivo que pueden incidir de manera indirecta en los componentes del suelo. En varios casos, la clasificación de los impactos estuvo limitada por la ausencia de estudios específicos que evalúen de manera directa sus efectos a escala agrícola, lo que pone de manifiesto la existencia de brechas relevantes de información científica para ciertos componentes y prácticas.

Entre las prácticas que presentaron la mayor afinidad entre SIRSD-S y SIGESS destacan con compatibilidad muy alta: enmienda orgánica, rotación de cultivos, acondicionamiento de rastrojo y establecimiento de praderas, y compatibilidad alta: regeneración de praderas, cero labranza, cultivo de cobertura, praderas suplementarias, cortina cortaviento, sistemas silvopastoriles plantación nativa, establecimiento e incorporación de abono verde, enmiendas calcáreas, construcción micro terraza, zanja de infiltración, subsolador, arado cincel, control de erosión de cárcavas, protección lagomorfos sistema silvopastoril e instalación de panel solar.

#### **Ficha técnico-descriptiva de prácticas agrícolas consideradas en el presente estudio en base a la información histórica**

**Enmienda orgánica.** Incorporación de materiales de origen vegetal o animal para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Su aplicación incrementa la materia orgánica, favoreciendo la estabilidad de agregados, la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua (Diacono y Montemurro, 2010; Lal, 2020). El aporte sostenido estimula la actividad y diversidad microbiana y contribuye al aumento del carbono orgánico del suelo (Venter *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2018). Los efectos sobre las emisiones de gases

de efecto invernadero dependen del tipo y grado de estabilización del material, siendo generalmente más favorables los materiales maduros (Smith *et al.*, 2020).

**Rotación de cultivos.** Alternar distintas especies agrícolas en una misma superficie a lo largo del tiempo. Mejora la eficiencia en el uso de nutrientes y la estabilidad productiva a largo plazo (Rusinamhodzi *et al.*, 2011). A nivel del suelo, incrementa la materia orgánica y la estabilidad de los agregados, mejora la infiltración y reduce la erosión (Govaerts *et al.*, 2006). La diversificación de especies promueve mayor diversidad microbiana y fortalece la resiliencia biológica del sistema edáfico (Venter *et al.*, 2016). La inclusión de cultivos con distintos aportes de residuos y raíces contribuye al aumento del carbono orgánico del suelo (Liu *et al.*, 2022) y puede reducir las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) al optimizar el uso del nitrógeno en los sistemas productivos (Li *et al.*, 2023).

**Acondicionamiento de rastrojo.** Manejo de residuos posteriores a la cosecha, manteniéndolos como cobertura o incorporándolos al suelo. Protege frente a la erosión, mejora la estructura y favorece la infiltración y retención de humedad (Ruiz, 2015). La descomposición progresiva incrementa la materia orgánica, estimula la actividad biológica y favorece el secuestro de carbono (Ruiz, 2015).

**Establecimiento de praderas.** Contribuye a mayor estabilidad y productividad forrajera en el tiempo (Ashworth *et al.*, 2018; Whitehead *et al.*, 2020). Protege el suelo frente a la erosión, mejora la infiltración y reduce la escorrentía, favoreciendo la conservación del suelo y del agua (Pulley y Collins, 2019). La permanencia de raíces y el bajo nivel de disturbio incrementan el carbono orgánico del suelo en comparación con sistemas anuales (Dietz *et al.*, 2024). Estas condiciones se asocian a mayor eficiencia en el uso de recursos y menor intensidad de emisiones por unidad de producto (Whitehead *et al.*, 2020).

**Regeneración de praderas.** Restablecimiento de cobertura herbácea en áreas degradadas. Mejora la productividad al estabilizar el crecimiento del pastizal y la disponibilidad de forraje (Descalzi *et al.*, 2020). La recuperación de cobertura reduce la erosión y la compactación, restituyendo la estabilidad estructural y mejorando las propiedades físicas del suelo (Descalzi *et al.*, 2020; Dlamini y Chaplot, 2016). Las praderas regeneradas aumentan la retención y movimiento de agua en el perfil, favoreciendo el crecimiento bajo déficit hídrico (Descalzi *et al.*, 2020). Bajo manejo adecuado, puede favorecer parcialmente la biodiversidad

vegetal y arbórea asociada (Esquivel *et al.*, 2008) y contribuir al mantenimiento o aumento del carbono orgánico del suelo (Dlamini y Chaplot, 2016).

**Cero-labranza.** Establecimiento de cultivos sin remoción del suelo, manteniendo residuos como cobertura superficial. Contribuye a conservar la estructura, reducir la erosión y mejorar la infiltración y retención de agua, fortaleciendo la regulación hídrica en condiciones de déficit (Basche y DeLonge, 2019). Tras un período de adaptación, los rendimientos tienden a igualar o superar a los de la labranza convencional, con mayores beneficios en ambientes con limitaciones hídricas (Pittelkow *et al.*, 2015). La mantención de residuos en superficie favorece la acumulación de carbono orgánico en horizontes superficiales y contribuye al secuestro de carbono (Lal, 2004).

**Cultivo de cobertura.** Establecimiento de especies entre ciclos de cultivos principales. La cobertura viva o los residuos reducen la exposición del suelo a lluvia y viento, disminuyendo la erosión y favoreciendo la estabilidad estructural (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Su permanencia o incorporación mejora la infiltración y retención de agua, especialmente en seco y bajo labranza reducida (Basche *et al.*, 2014). En términos de carbono, pueden aumentar los aportes orgánicos; sin embargo, el incremento de carbono orgánico depende de la especie, frecuencia de uso y sistema de manejo (Seitz *et al.*, 2022).

**Praderas suplementarias.** Permiten mantener forraje en períodos de déficit estacional, mejorando la eficiencia del sistema y reduciendo la dependencia de insumos externos (Capstaff y Miller, 2018). Durante su ciclo, protegen el suelo frente a erosión y escorrentía, favorecen infiltración (De Baets *et al.*, 2011; Centeri *et al.*, 2022). Sus efectos dependen del manejo, ya que el pastoreo inadecuado puede generar compactación y pérdida de infiltración. Debido a su carácter anual, el aporte de carbono y beneficio estructural es transitorio y no acumulable a largo plazo (Centeri *et al.*, 2022).

**Cortina cortaviento.** Hileras arbóreas establecidas para reducir la velocidad del viento en áreas agrícolas, disminuyendo la erosión eólica y mejorando la estabilidad del suelo. La protección frente al viento modera el microclima y reduce la pérdida de humedad por evaporación, lo que favorece el crecimiento y rendimiento de los cultivos en zonas expuestas (Andreu *et al.*, 2008; Sotomayor *et al.*, 2020). Estas estructuras incrementan la heterogeneidad del paisaje

agrícola, generando hábitats para fauna benéfica y contribuyendo a la acumulación de carbono orgánico en el suelo (Enescu *et al.*, 2025).

**Sistemas silvopastoriles, plantación nativa.** Integran estratos leñosos y herbáceos bajo manejo ganadero, generando cambios edáficos y microclimáticos. La cobertura arbórea reduce la densidad aparente, mejora la estructura y estabilidad del suelo, incrementa el carbono orgánico mediante aportes de hojarasca y raíces, y aumenta la retención y disponibilidad de agua en el perfil. En términos productivos, pueden favorecer el desempeño del pastizal bajo manejo adecuado, con respuestas dependientes de la densidad arbórea (Amorim *et al.*, 2023). Presentan menores emisiones netas de GEI que los pastizales abiertos, asociadas a reducciones de N<sub>2</sub>O, dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y mayor captura de gas metano (CH<sub>4</sub>) (Baah-Acheamfour *et al.*, 2016).

**Establecimiento e incorporación de abono verde.** Siembra de cultivos destinados a producir biomasa para su incorporación antes del cultivo principal, aportando materia orgánica y mejorando la fertilidad. Su descomposición incrementa la disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno, y mejora la estructura del suelo mediante aumentos en agregación, porosidad y retención de agua. Estos efectos favorecen la conservación del suelo y estimulan la actividad biológica edáfica. La respuesta productiva y ambiental depende de la calidad del residuo, la sincronía entre mineralización y demanda del cultivo y las condiciones de manejo (Chimouriya *et al.*, 2018; Aulakh *et al.*, 2001).

**Enmiendas calcáreas (kg CaCO<sub>3</sub>).** Aplicación de materiales ricos en calcio para corregir acidez del suelo y mejorar las condiciones químicas y biológicas para el crecimiento vegetal. La neutralización del pH reduce la toxicidad por aluminio y manganeso, mejora la disponibilidad de fósforo y promueve mayor actividad microbiana (Fageria y Nascente, 2014). Asimismo, incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la estabilidad de agregados, favoreciendo la conservación del suelo y el agua (Lal, 2020). En suelos altamente intemperizados o con alta saturación de aluminio, puede aumentar significativamente la productividad (Caires *et al.*, 2011). Una aplicación excesiva puede inducir desequilibrios nutricionales y contribuir a emisiones de CO<sub>2</sub> (Hamilton *et al.*, 2007).

**Construcción de microterrazas.** Estructuras que desaceleran la escorrentía superficial, reduciendo la erosión y favoreciendo infiltración (USDA-NRCS, 2020;

Teuber and Espinoza, 2022). Disminuyen longitud efectiva de pendiente y mejoran retención de humedad en el perfil, lo que puede traducirse en mejor desempeño productivo en condiciones de secano (Tamagnone *et al.*, 2020). La estabilización vegetal de bermas y taludes aporta cobertura adicional, contribuyendo a la conservación del suelo y a la generación de microhábitats (USDA-NRCS, 2020). Existe evidencia incipiente en estructuras afines, como terrazas de desvío y canales vegetados que sugiere efectos condicionales sobre flujos de GEI asociados a la redistribución de agua en el suelo (Driscoll *et al.*, 2025).

**Zanja de infiltración.** Excavación en curva de nivel destinada a interceptar escorrentía superficial, retener temporalmente el agua y favorecer su infiltración en sistemas de secano. Reduce la energía del flujo, retiene sedimentos y disminuye la pérdida de suelo, aumentando la disponibilidad hídrica para la vegetación adyacente. La evidencia experimental muestra reducciones significativas de escorrentía y erosión, especialmente en laderas agrícolas y pastoriles cuando se combina con cobertura vegetal (Locatelli *et al.*, 2020).

**Subsolador.** Labranza vertical profunda destinada a romper capas compactadas sin invertir el suelo. Mejora la continuidad del sistema poroso, reduce la resistencia mecánica y facilita el desarrollo radicular en suelos con compactación subsuperficial. Incrementa la infiltración y el uso eficiente del agua, y mejora el rendimiento cuando la compactación limita el crecimiento radicular (Shen *et al.*, 2019). En manejo conservacionista, su uso continuado se asocia con mayor estabilidad de agregados e incrementos de carbono orgánico del suelo, especialmente combinado con siembra directa (Tian *et al.*, 2014).

**Arado cincel.** Labranza no inversiva de intensidad intermedia que afloja el suelo sin voltear horizontes, aliviando la compactación superficial y subsuperficial. Mejora temporalmente la porosidad, aireación y exploración radicular en suelos con restricciones físicas, favoreciendo el desempeño del cultivo (Nunes *et al.*, 2019). Genera menor perturbación del perfil que la labranza convencional y se asocia a mayor presencia de fauna edáfica (Ulrich *et al.*, 2010). Sin embargo, puede provocar aumentos transitorios de emisiones de CO<sub>2</sub> posteriores a la labor, sin efectos consistentes de acumulación de carbono (Ulrich *et al.*, 2010).

**Control de erosión de cárcavas.** Implementación de medidas estructurales para detener la erosión concentrada y estabilizar cauces activos, mediante

diques de retención y estructuras de disipación de energía. Reduce directamente la pérdida de suelo y el transporte de sedimentos, disminuye la conectividad hidrológica y la energía del escurrimiento, contribuyendo a la conservación del suelo y a una regulación más estable del flujo de agua en el área intervenida (Alfonso-Torreño *et al.*, 2022).

**Protección contra lagomorfos en sistema silvopastoril.** Instalación de barreras físicas selectivas, como tubos protectores, mallas o exclusiones parciales para evitar consumo de plántulas y especies leñosas jóvenes por conejos y liebres. La exclusión reduce presión de ramoneo, aumentando la supervivencia, el crecimiento y la biomasa de la vegetación establecida en comparación con áreas sin protección (Forsyth *et al.*, 2015; Kossoff *et al.*, 2024). Asimismo, favorece recuperación de especies sensibles y puede incrementar diversidad biológica asociada a mayor cobertura vegetal (Wearn and Gange, 2007).

**Panel solar.** Integración de estructuras fotovoltaicas elevadas sobre superficies agrícolas o ganaderas, permitiendo el uso simultáneo del suelo para producción y generación energética. Esta configuración modifica el microclima local al reducir la radiación directa, la temperatura superficial y la evaporación, lo que puede influir en el crecimiento vegetal y en la humedad del suelo, bajo ciertas condiciones. La evidencia experimental muestra efectos directos sobre la biodiversidad terrestre y la disponibilidad hídrica del suelo, así como respuestas productivas variables y dependientes del diseño del sistema y del tipo de cultivo (Barron-Gafford *et al.*, 2019; Dupraz *et al.*, 2011; Hassanpour Adeh *et al.*, 2018).

**Biofiltros para sedimentos.** Bandas de vegetación permanente establecidas entre áreas productivas y zonas de escurrimiento superficial, con el objetivo de interceptar el flujo de agua, disminuir su velocidad y retener partículas sólidas transportadas. Reducen de forma significativa la pérdida de suelo y la carga de sedimentos y fósforo particulado en la escorrentía superficial, mediante procesos físicos de decantación y filtración vegetal (Fasching, 2001; Vanrobaeys *et al.*, 2019).

**Abrevadero de emergencia.** Los abrevaderos de emergencia suministran agua controlada al ganado fuera de cauce, reduciendo el tránsito en riberas (Sheffield *et al.*, 1997). Esta práctica mejora la ganancia diaria de peso en bovinos por un consumo más constante (Bica *et al.*, 2021). Sin evidencia directa en

conservación del suelo, biodiversidad, retención hídrica, carbono edáfico o emisiones de GEI.

**Aplicación de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).** Consiste en la incorporación de fertilizantes fosfatados para corregir deficiencias de este nutriente esencial, favoreciendo el desarrollo radicular y la productividad de los cultivos (Withers *et al.*, 2014). No modifica directamente las propiedades físicas del suelo, por lo que su impacto sobre la conservación y el carbono orgánico se considera neutral en este estudio (Lal, 2020). Tampoco existe evidencia concluyente de efectos directos sobre la infiltración o retención de agua (Withers *et al.*, 2014). Un manejo excesivo puede generar efectos moderadamente perjudiciales sobre la biodiversidad del suelo y el balance de emisiones, asociados a acumulación de fósforo y a la huella energética de su producción y aplicación (Sharpley *et al.*, 2013; Smith *et al.*, 2020).

**Construcción de cercos.** Práctica estructural orientada a regular el acceso del ganado y organizar el uso del terreno mediante subdivisión de potreros o restricción temporal del pastoreo. Su función es principalmente operativa, al facilitar estrategias de manejo como rotación y control de carga animal (Briske *et al.*, 2008). Si bien constituye una herramienta clave para implementar esquemas de manejo, no existe evidencia empírica que permita atribuirle efectos ambientales o productivos directos cuando se analiza como práctica independiente (Briske *et al.*, 2008).

**Limpieza Pica Pica.** Remoción manual, mecánica o química de la especie exótica invasora *Ulex europaeus* L. para recuperar áreas productivas y limitar su expansión. Las especies exóticas invasoras pueden competir con la biodiversidad nativa y alterar procesos ecosistémicos, por lo que su control forma parte de estrategias de manejo ambiental (Tala, 2016). No obstante, no se identifican evaluaciones que atribuyan efectos ambientales o productivos directos a la práctica de limpieza considerada de manera independiente.

**Nivelación con pala mecánica.** Movimiento y redistribución del suelo superficial para corregir irregularidades, mejorar la uniformidad del riego por superficie y facilitar la mecanización. En sistemas irrigados, la nivelación de precisión incrementa la eficiencia en el uso del agua y la estabilidad del rendimiento (Jat *et al.*, 2015). Sin embargo, las operaciones de corte y relleno alteran los horizontes del suelo y sus propiedades físicas, aumentando la densidad

aparente y reduciendo la porosidad y estabilidad estructural (Parfitt *et al.*, 2014). También se ha documentado una disminución del carbono orgánico y de la biomasa microbiana en el corto plazo posterior a la intervención (Parfitt *et al.*, 2013).

**Despedrado.** Remoción manual o mecánica de piedras superficiales para facilitar labores agrícolas, tránsito de maquinaria y habilitación de la siembra en suelos pedregosos. Se enmarca en sistemas de recuperación de suelos con alta fracción gruesa, orientándose a la limpieza del horizonte superficial sin alterar significativamente el perfil cuando se realiza de forma somera (Toscano *et al.*, 2022). La literatura lo describe como una práctica operativa y no reporta evidencia experimental que permita atribuir efectos directos sobre propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo.

**Limpieza Matorral.** Remoción parcial o total de vegetación arbustiva para habilitar áreas productivas, principalmente de pastoreo. Bajo manejo adecuado puede incrementar temporalmente la cobertura herbácea; sin embargo, la eliminación completa de vegetación leñosa simplifica la estructura del ecosistema, expone el suelo a erosión y modifica la biodiversidad asociada. La evidencia global indica que los efectos de la remoción de plantas leñosas son altamente dependientes del contexto ambiental y del método aplicado, pudiendo generar reducciones en la estabilidad estructural y cambios persistentes en la composición del sistema (Ding y Eldridge, 2019).

## CONCLUSIONES

El análisis territorial evidenció niveles de degradación de suelo avanzado en comunas con alta vulnerabilidad socioeconómica, tales como Cañete, Tirúa, Alto Biobío, Santa Bárbara, Santa Juana y Quilaco, lo que representa un riesgo potencial para la sostenibilidad ambiental y productiva de estos territorios. Por tanto, estas comunas constituyen zonas de alta relevancia para la aplicación de prácticas de manejo y recuperación de suelos.

Las prácticas con mayor porcentaje de ejecución en las seis comunas seleccionadas fueron enmiendas calcáreas, aplicación de fósforo, y establecimiento de praderas, no son coincidentes con el análisis de compatibilidad con los objetivos del programa SIGESS. Las prácticas como la enmienda orgánica, rotación de cultivos, acondicionamiento de rastrojo, y

establecimiento de praderas obtuvieron los porcentajes más altos de compatibilidad, debido a su impacto positivo sobre múltiples componentes que inciden sobre el suelo.

La diversidad de efectos identificados que tienen las prácticas agrícolas sobre el suelo evidencia que no operan de manera aislada, sino que en interacción con otras prácticas y bajo determinadas condiciones de manejo. Por tanto, su análisis requiere un enfoque integrado que permita comprender cómo estas interacciones inciden en los componentes del suelo y en la magnitud de sus impactos.

## REFERENCIAS

1. Alfonso-Torreño, C., Alatorre-Rodríguez, F., Gómez-Feria, N., and Mier y Terán, G. (2022). Effects of gully control measures on sediment production and connectivity in wooded grasslands. *Catena*, 215, 106259. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106259>
2. Amorim, H. C. S., Ashworth, A. J., O'Brien, P. L., Thomas, A. L., Runkle, B. R. K., and Philipp, D. (2023). Temperate silvopastures provide greater ecosystem services than conventional pasture systems. *Scientific Reports*, 13, 18658. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45960-0>
3. Andreu, M. G., Tamang, B., Friedman, M. H., and Rockwood, D. (2008). The benefits of windbreaks for Florida growers. UF/IFAS Extension.
4. Ashworth, A. J., Toler, H. D., Allen, F. L., and Augé, R. M. (2018). Global meta-analysis reveals agro-grassland productivity varies based on species diversity over time. *PLOS ONE*, 13(7), Article e0200274. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200274>
5. Aulakh, M. S., Khera, T. S., Doran, J. W., and Bronson, K. F. (2001). Denitrification, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> fluxes in irrigated soils as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure. *Biology and Fertility of Soils*, 34(6), 375–389. <https://doi.org/10.1007/s003740100420>
6. Baah-Acheamfour, M., Carlyle, C. N., Bork, E. W., and Chang, S. X. (2016). Forest and grassland soils exhibit lower greenhouse gas emissions following conversion to silvopastoral systems. *Science of the Total Environment*, 565, 105–115.
7. Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., and Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, 848–855.

8. Basche, A. D., and DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(9), Article e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
9. Bica, G. S., Pinheiro Machado Filho, L. C., and Teixeira, D. L. (2021). Beef cattle on pasture have better performance when supplied with water trough than pond. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 616904. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.616904>
10. Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., and Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107, 2449–2474. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0086>
11. Briske, D. D., Derner, J. D., Brown, J. R., Fuhlendorf, S. D., Teague, W. R., Havstad, K. M., Gillen, R. L., Ash, A. J., and Willms, W. D. (2008). Rotational grazing on rangelands: Reconciliation of perception and experimental evidence. *Rangeland Ecology and Management*, 61(1), 3–17. <https://doi.org/10.2111/06-159R.1>
12. Caires, E. F., Joris, H. A. W., and Churka, S. (2011). Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. *Soil Use and Management*, 27(1), 45–53. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>
13. Cartes Sánchez, G. (2020). Aplicación del Programa SIRSD-S en suelos agropecuarios del sur de Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Ministerio de Agricultura Chile. [https://opia.fia.cl/601/articles-114789\\_archivo\\_01.pdf](https://opia.fia.cl/601/articles-114789_archivo_01.pdf)
14. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2010). Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/2102/PC14010.pdf>
15. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2010). *Erosión hídrica actual y potencial* [Conjunto de datos geoespaciales]. Ministerio de Agricultura de Chile, IDE Minagri. <https://ide.minagri.gob.cl/>
16. Chen, Z., Zhu, Z., Zhang, W., and Sun, S. (2024). Subsoiling tillage increased core microbiome associated with nitrogen fixation in the fallow season under rainfed maize monoculture. *Soil and Tillage Research*, 235, 105885.
17. Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., and von Maltitz, G. (Eds.). (2018). *World atlas of desertification* (3rd ed.). European

Commission, Joint Research Centre.  
[https://wad.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/atlas\\_pdf/JRC\\_WAD\\_fullVersion.pdf](https://wad.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/atlas_pdf/JRC_WAD_fullVersion.pdf)

18. Chimouriya, S., Lamichhane, J., and Gauchan, D. P. (2018). Green manure for restoring and improving soil nutrient quality. *International Journal of Research*, 5(20), 1064–1074
19. Descalzi, C. A., López, I. F., Kemp, P. D., Dörner, J., and Ordóñez, I. (2020). Pasture restoration improvement methods for temperate degraded pastures and consequences of the climatic seasonality on soil–pasture complex. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(1), 130–147.
20. Diacono, M., and Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(2), 401–422.
21. Dietz, C. L., Culman, S. W., and Dick, W. A. (2024). Soil carbon maintained by perennial grasslands over 30 years but lost in field crop systems in a temperate Mollisol. *Communications Earth and Environment*, 5(1), Article 162. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01500-w>
22. Ding, J., and Eldridge, D. J. (2019). Contrasting global effects of woody plant removal on ecosystem structure, function and composition. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 39, 125460. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2019.125460>
23. Dlamini, P., and Chaplot, V. (2016). The impact of land degradation on the quality of soils in a South African communal rangeland. In *Land degradation and desertification – a global crisis* (pp. 81–90). InTechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/63128>
24. Driscoll, B. A., Krzic, M., Comeau, L.-P., Eskelson, B. N. I., and Li, S. (2025). Response of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, and CH<sub>4</sub> fluxes to contour tillage, diversion terrace, grassed waterway, and tile drainage implementation. *Frontiers in Soil Science*, 5, 1453324. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1453324>
25. Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., and Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
26. Enescu, C. M., Mihalache, M., Ilie, L., Dincă, L., Constandache, C., and Murariu, G. (2025). Agricultural benefits of shelterbelts and windbreaks: A bibliometric analysis. *Agriculture*, 15(11), 1204.

27. Esquivel, M. J., Harvey, C. A., Finegan, B., Casanoves, F., and Skarpe, C. (2008). Effects of pasture management on the natural regeneration of neotropical trees. *Journal of Applied Ecology*, 45(1), 371–380.
28. Fageria, N. K., Nascente, A. S. (2014). Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 128, 221–275.
29. Fasching, R. A., Bauder, J. W. (2001). Evaluation of agricultural sediment load reductions using vegetative filter strips of cool season grasses. *Water Environment Research*, 73(5), 590–596.
30. FAO, ITPS. (2015). Status of the world's soil resources (SWSR) – Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199E.pdf>
31. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1977). *Assessing soil degradation (Soils Bulletin No. 34)*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ar114e>
32. Forsyth, D. M., Richardson, S. J., Brown, D., Nugent, G. (2015). Density-dependent effects of a widespread invasive herbivore on tree survival and biomass. *Ecosphere*, 6(2), 1–14.
33. González, J. (Ed.). (2023). *Agricultura de la Región del Biobío: Sinopsis agroeconómica y estadística (Libro INIA N° 43)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Quilamapu. Chillán, Chile. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/69257>
34. Govaerts, B., Sayre, K. D., Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 163–174.
35. Hamilton, S. K., Kurzman, A. L., Arango, C., Jin, L., and Robertson, G. P. (2007). Evidence for carbon sequestration by agricultural liming. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB2021.
36. Hassanpour Adeh, E., Selker, J. S., and Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11), e0203256.
37. Hu, T., Sørensen, P., and Olesen, J. E. (2018). Soil carbon varies between different organic and conventional management schemes in arable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 94, 79–88.

38. Izadpanah, M., Shabanpour, M., Abrishamkesh, S., and Bagheri, I. (2024). Land leveling and cover cropping impacts on chemical and biological properties of paddy soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 22(1), e1101.
39. Jat, M. L., Singh, Y., Gill, G., Sidhu, H. S., Aryal, J. P., Stirling, C., and Gerard, B. (2015). Laser-assisted precision land leveling impacts in irrigated intensive production systems of South Asia. In R. Lal and B. A. Stewart (Eds.), *Soil-specific farming: Precision agriculture* (pp. 323–352). CRC Press.
40. Kossoff, A., Schueller, S., Nossan, H., Slack, I., Avramidis, P., and Foufopoulos, J. (2024). Ecological impacts of introduced European rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) on island ecosystems in the Mediterranean. *Diversity*, 16(4), 244.
41. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22.
42. Lal, R. (2020). Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 1–9.
43. Li, Y., Chen, J., Drury, C. F., Liebig, M. A., Johnson, J. M. F., Wang, Z., Feng, H., and Abalos, D. (2023). The role of conservation agriculture practices in mitigating N<sub>2</sub>O emissions: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, 63.
44. Liu, X., Tan, S., Song, X., Wu, X., Zhao, G., Li, S., and Liang, G. (2022). Response of soil organic carbon content to crop rotation and its controls: A global synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 335, 108017.
45. Locatelli, B., Homberger, J.-M., Ochoa-Tocachi, B. F., Bonnesoeur, V., Román, F., Drenkhan, F., and Buytaert, W. (2020). Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas, Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica. *Forest Trends*.
46. Ministerio de Agricultura (2023). Proyecto de ley que establece un Sistema de Incentivos para la Gestión Sostenible de Suelos Agropecuarios (SIGESS) (Boletín N.º 16.391-01). <https://www.camara.cl/legislacion/proyectosdeley/tramitacion.aspx?prmlD=16959andprmBOLETIN=16391-01>
47. Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2023). Estimaciones comunales de

pobreza por ingresos y pobreza multidimensional, CASEN 2022 [Base de datos]. Observatorio Social.  
<https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/pobreza-comunal-2022>

48. Ministerio del Medio Ambiente. (2025). Anteproyecto NDC 2025 – Anexos. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/02/Anteproyecto-NDC-2025-anexos.pdf>
49. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2024). El impacto de las parcelas de agrado en Chile: Caracterización e impactos territoriales. Centro de Estudios de Ciudad y Territorio. [https://centrodeestudios.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2024/10/El-impacto-de-las-parcelas-de-agrado-en-Chile\\_Minvu-2024.pdf](https://centrodeestudios.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2024/10/El-impacto-de-las-parcelas-de-agrado-en-Chile_Minvu-2024.pdf)
50. Nunes, M. R., Denardin, J. E., Pauletto, E. A., Faganello, A., and Pinto, L. F. S. (2019). Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. *Soil and Tillage Research*, 186, 183–193.
51. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2025). Levantamiento de insumos para instrumentos de bonificación y focalización para el Sistema de Incentivos para la Gestión Sostenible de Suelos Agropecuarios (SIGESS): Informe final. Ministerio de Agricultura de Chile.
52. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2006). El sistema de incentivos para la recuperación de suelos degradados (SIRSD). En *Temporada Agrícola* N° 25 (pp. 101–106). Ministerio de Agricultura de Chile. <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/71460>
53. Parfitt, J. M. B., Timm, L. C., Reichardt, K., Pinto, L. F. S., Pauletto, E. A., and Castilhos, D. D. (2013). Chemical and biological attributes of a lowland soil affected by land leveling. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 48(11), 1489–1497.
54. Parfitt, J. M. B., Timm, L. C., Reichardt, K., and Pauletto, E. A. (2014). Impacts of land leveling on lowland soil physical properties. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 38, 315–326.
55. Pittelkow, C. M., *et al.* (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365–368.
56. Pulley, S., and Collins, A. L. (2019). Field-based determination of controls on runoff and fine sediment generation from lowland grazing livestock fields. *Journal of Environmental Management*, 249, Article 109365.

57. Ruiz, S. (2015). Rastrojo de cultivos y residuos forestales: Programa de transferencia de prácticas alternativas al uso del fuego en la Región del Biobío (Boletín INIA N° 308). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7856/NR40197.pdf>
58. Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J., and Giller, K. E. (2011). A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(4), 657–673.
59. Seitz, D., Goebes, P., Puerta, V. L., Pereira, E. I. P., Wittwer, R., Six, J., van der Heijden, M. G. A., and Scholten, T. (2022). The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. *Plant and Soil*, 476(1–2), 199–220.
60. Sharpley, A., Jarvie, H. P., Buda, A., May, L., Spears, B., and Kleinman, P. (2013). Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environmental Quality*, 42(5), 1308–1326.
61. Sheffield, R. E., Mostaghimi, S., Vaughan, D. H., Collins, E. R., Jr., and Allen, V. G. (1997). Off-stream water sources for grazing cattle as a stream bank stabilization and water quality BMP. *Transactions of the ASAE*, 40(3), 595–604.
62. Shen, Y., Han, H., and Ning, T. (2019). Effects of different subsoiling stages on soil physical properties, water use and maize yield in the North China Plain. *Plant, Soil and Environment*, 65(11), 556–562.
63. Smith, P., Soussana, J.-F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., *et al.* (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), 219–241.
64. Smyth, A. J., and Dumanski, J. (1993). A framework for evaluating sustainable land management. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), 401–406.
65. Sotomayor, A., Moya, I., Teuber, O., Lucero, A., Villarroel, A., Villalobos, E., and Barrales, L. (2020). Diseño, establecimiento y manejo de cortinas cortavientos (Manual N.º 43). Instituto Forestal (INFOR), Chile.
66. Tala, C. (2016). Especies exóticas invasoras: Una grave amenaza a nuestro patrimonio natural. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. <https://repositorioambiental.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/Presentación-amenazas-EEI-1.pdf>

67. Tamagnone, P., *et al.* (2020). Rainwater harvesting techniques to face water scarcity in African drylands: Efficiency assessment.
68. Teuber Winkler, O., and Espinoza Troncoso, S. (Eds.). (2022). Prácticas conservacionistas de suelo y agua en la Región de Aysén (Boletín INIA N° 444). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/e5119017-b3b8-4015-8b6e-83e7c9514459>
69. Tian, S., Wang, Y., Ning, T., Li, N., Zhao, H., Wang, B., Li, Z., and Chi, S. (2014). Continued no-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels. *Agronomy Journal*, 106(1), 212–218.
70. Toscano, P., Brambilla, M., Cutini, M., and Bisaglia, C. (2022). The stony soils reclamation systems in agricultural lands: A review. *Agricultural Sciences*, 13(4), 500–519.
71. Ulrich, S., Tischer, S., Hofmann, B., and Christen, O. (2010). Biological soil properties in a long-term tillage trial in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 483–489.
72. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2020). *Terrace (Conservation Practice Standard No. 600)*. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/terrace-ft-600-conservation-practice-standard>
73. Vanrobaeys, J. A., Owens, P. N., Lobb, D. A., Kieta, K. A., and Campbell, J. M. (2019). Seasonal efficacy of vegetated filter strips for phosphorus reduction in surface runoff. *Journal of Environmental Quality*, 48, 880–888.
74. Venter, Z. S., Jacobs, K., and Hawkins, H. J. (2016). The impact of crop rotation on soil microbial diversity: A meta-analysis. *Pedobiologia*, 59(4), 215–223.
75. Wearn, J. A., and Gange, A. C. (2007). Above-ground herbivory causes rapid and sustained changes in mycorrhizal colonization of grasses. *Oecologia*, 153, 953–962.
76. Whitehead, D., Schipper, L. A., and Moot, D. J. (2020). Management of grazed landscapes to increase soil carbon stocks and reduce GHG intensity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, Article 585913.
77. Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P., and Doody, D. G. (2014). Agriculture and eutrophication: Where do we go from here? *Sustainability*, 6(9), 5853–5875.