

# CAPITULO 5



INFORME PAÍS ESTADO DEL MEDIO AMBIENTE EN CHILE  
2018

## 5. SUELOS

### 5.1 ESTADO DE LOS SUELOS

La geografía de los suelos de Chile responde a la distribución espacial de los factores de formación de suelos en el país. A pesar de ser una nación pequeña, Chile cuenta con una enorme diversidad de suelos, contando con diez de los doce órdenes de suelo hasta ahora descritos por la taxonomía de suelos (Figura 5.1). A grandes rasgos, dos factores son claves para entender los suelos de Chile: el gradiente climático (reflejado principalmente en las precipitaciones) existente de norte a sur, y la particular fisiografía del país, cuya ubicación en un margen tectónico de convergencia de placas crea macrounidades fisiográficas que van paralelas a la línea de costa, las que se distribuyen de este a oeste en: Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes. Considerando ambos factores, a continuación se explican de manera integral y a gran escala los suelos según cuatro zonas: norte grande, norte chico, zona central y zona austral.

#### 5.1.1 El patrimonio edáfico

##### 5.1.1.1 Suelos del Norte Grande (18° - 25° S)

Esta zona alberga el desierto templado más árido del mundo, y en consecuencia aquí se pueden encontrar suelos únicos y característicos del Desierto de Atacama. En la Cordillera de la Costa, generalmente la roca aflora directamente a la superficie y hay escasa cobertura de suelos, los cuales cuando están presentes son delgados y muy poco desarrollados (Entisoles)<sup>1</sup>. Los suelos comienzan a hacerse más profundos hacia la Depresión Intermedia, donde por efecto de millones de años de hiperaridez, se han acumulado sales muy solubles en todo el perfil, las que se redistribuyen durante los escasos eventos de precipitación que ocurren en el desierto<sup>2,3</sup>. Es en la Depresión Intermedia donde se producen suelos únicos en el mundo, muy antiguos, bien desarrollados, con horizontes ricos en nitratos (el caliche) y otras sales muy solubles como la halita y sales de iodo<sup>4</sup>. Los suelos de la Depresión Intermedia están cubiertos por un horizonte muy poroso y permeable constituido de anhidrita, el que se conoce localmente como chusca. Estos suelos bien desarrollados (Aridisoles)

1 Díaz, C. y C. Wright. 1965

2 Ewing et al., 2006.

3 Michalski et al., 2004.

4 Ericksen, G. 1983.

se encuentran en una delgada franja que constituye la zona más seca en la Depresión Intermedia. Hacia el este, a medida que se aumenta en altitud, el gradiente de precipitaciones aumenta gradualmente y el caliche desaparece para dar paso a una región con suelos de desarrollo escaso (Entisoles) a intermedio (Inceptisoles), con algunos sectores de Depresiones cubiertos por acumulaciones evaporíticas de sales, los salares (Aridisoles) y bofedales con suelos ricos en materia orgánica (Histosoles). Estos últimos si bien escasos en superficie, son esenciales para ecosistemas de humedales únicos y frágiles, y para las comunidades altoandinas que subsisten de la ganadería de auquénidos<sup>5</sup>. Los escasos valles que atraviesan el Desierto de Atacama, como el Lluta, Azapa y Camarones tienen suelos delgados, poco desarrollados (Entisoles) donde se desarrolla la escasa agricultura que existe en la zona<sup>5</sup>.

#### 5.1.1.1 Suelos del Norte Chico (25° - 33° S)

En esta zona la Depresión intermedia, característica de otras áreas del país, se encuentra ausente, lo que explica que esta porción del territorio también sea conocida como de los Valles Transversales, la Cordillera de la Costa y de los Andes. Esta zona, además, coincide con un bajo ángulo de subducción de la placa de Nazca, lo que genera una ausencia de volcanismo.

En los valles que atraviesan el cordón montañoso existen suelos jóvenes de escaso desarrollo en las zonas más bajas (Entisoles e Inceptisoles), mientras que las terrazas fluviales y marinas más altas (y antiguas) pueden contener suelos bien desarrollados con horizontes de acumulación de arcilla, sílice, carbonatos o yeso (Aridisoles). La Cordillera de la Costa del Norte Chico experimenta una transición entre suelos de escaso desarrollo hacia el norte, con un continuo aumento del grado de meteorización y desarrollo a medida que se avanza hacia el sur. En ciertas zonas se alcanzan niveles de desarrollo que corresponderían a climas más húmedos, por lo que se ha señalado que estos suelos serían relictos de climas pasados, pero que por encontrarse actualmente en un clima árido se clasifican todos como Aridisoles.<sup>6</sup> La Cordillera de los Andes, por sus altas pendientes, cuenta con suelos de desarrollo bajo (Entisoles) a intermedio (Inceptisoles)<sup>7</sup>.

#### 5.1.1.2 Suelos de la Zona Central (33° - 43° S)

En la zona Central se pueden apreciar con mayor claridad las diferencias existentes entre los suelos que ocupan las tres macrounidades fisiográficas. La Cordillera de la Costa es la unidad más antigua, donde predomina un relieve ondulado en gran parte de su extensión, debido a la intensa meteorización que ha sufrido durante millones de años, lo que explica el intenso color rojo de los suelos que cubren sus laderas, siendo conocidos localmente como suelos rojo-arcillosos. Estos suelos son altos en bases de intercambio hacia el norte (Alfisolos) y dan paso hacia el sur a suelos que han sufrido mayor lavado durante su desarrollo y por ende, son bajos en bases de intercambio, los que a su vez se caracterizan por ser muy profundos en algunas zonas de la Cordillera de la Costa de la zona más lluviosa (Ultisoles)<sup>8</sup>. En la Depresión Intermedia se da un gradiente afín al paulatino aumento de las precipitaciones de norte a sur, que va desde suelos típicos de climas semiáridos de pasturas, desarrollados originalmente en un ecosistema de sabana de espino (*Acacia caven*) hoy dominado por una agricultura de riego de alta intensidad; éstos suelos se destacan por ser de reacción alcalina y tener un horizonte superficial oscuro rico en materia orgánica (Mollisoles). Entre las regiones de Valparaíso y Maule, existen sectores con presencia de suelos ricos en arcillas expansibles formados en ambientes lacustres (Vertisoles), los que dan paso a suelos volcánicos hacia el sur, conocidos localmente como Ñadis y Trumaos (Andisoles), que cubren extensas zonas desde los 37° S hacia el sur<sup>9,10</sup>. En algunas zonas de la Depresión Intermedia, en los cerros isla o en depósitos muy antiguos se pueden encontrar también suelos rojo-arcillosos (Alfisolos y Ultisoles).

La Cordillera de los Andes sigue un gradiente muy similar a la Depresión Intermedia de norte a sur, con Molisoles e Inceptisoles bajo los 2000 m.s.n.m. por el norte, que dan paso a los Trumaos (Andisoles) hacia el sur, a medida que aumentan las precipitaciones y la actividad volcánica, a la vez que disminuye la altura de la Cordillera de los Andes. Aunque casi desconocidos por la escasez de datos, las zonas más altas de la Cordillera de los Andes estarían principalmente formadas por suelos de desarrollo intermedio (Inceptisoles) a escaso (Entisoles) a medida que se sube en altitud<sup>11</sup>.

La Zona Central es a su vez la zona con mayor presión sobre el recurso suelo, lo que se da por la combinación de suelos fértiles, un clima propicio para la agricultura y abundante agua, lo que ha llevado al desarrollo de una agricultura de riego de alta intensidad<sup>12</sup>.

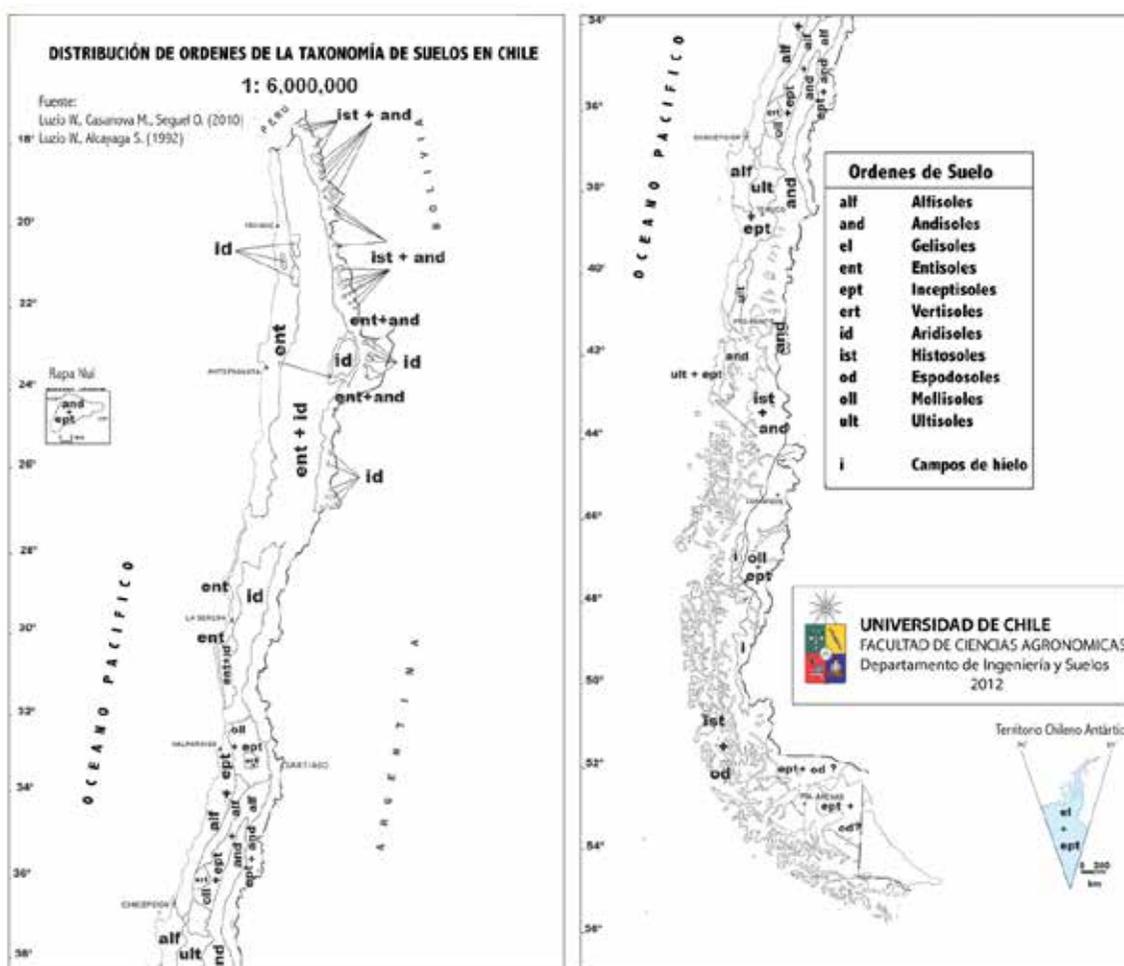
#### 5.1.1.3 Suelos de la Zona Austral (43° - 55° S)

Esta región es una de las más desconocidas en cuanto a los suelos presentes, y la información existente para la región se basa en un puñado de reportes e investigaciones que claramente son insuficientes para describir a cabalidad los suelos allí existentes. Desde el

5 Norambuena et al., 2011  
6 Veit, H. 1996.  
7 Casanova et al., 2013.  
8 Schaller et al., 2018.  
9 Luzio, W. 2010.  
10 Tosso, J. 1985.  
11 Casanova et al., 2013.  
12 Armesto et al., 2007.

punto de vista de la formación de suelos, se debe considerar que esta zona estaba completamente cubierta por campos de hielo durante la última glaciación hace aproximadamente 22 mil años<sup>13</sup>. En consecuencia es una zona con suelos muy jóvenes en términos edáficos, los que se han desarrollado sobre roca expuesta durante el proceso de desglaciación o sobre depósitos fluviales, glaciales o volcánicos recientes<sup>14</sup>. Debido a las altas y persistentes precipitaciones, los fiordos que bordean el Océano Pacífico están cubiertos por un manto casi continuo de turberas de diverso espesor (Histosoles), que constituyen probablemente la mayor reserva de carbono orgánico del país<sup>15</sup>. Hacia el oeste, en lo que se conoce como la Cordillera Patagónica, en la zona de transición entre el Bosque Siempreverde y el Bosque Caducifolio, hay una delgada franja de suelos ricos en materia orgánica que han sufrido intensos procesos de asociación entre materia orgánica y hierro (Espodosoles)<sup>16</sup>. En la zona de las pampas hacia el este, ya con un nivel de precipitaciones significativamente más bajo, los suelos se vuelven delgados y con escaso desarrollo (Inceptisoles), y en ciertas zonas donde las condiciones lo permiten se pueden encontrar suelos de estepa ricos en materia orgánica y bases de intercambio (Mollisoles)<sup>17</sup>. Los suelos de la zona norte a la zona austral del país, se representan en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Suelos de Chile.



FUENTE: Casanova et al., 2013.

- 13 Caldenius, C. 1932.  
14 Pfeiffer et al., 2010.  
15 Loisel, J y Z. Yu. 2013.  
16 Hepp, K. y N. Stolpe. 2014.  
17 Diaz et al., 1959.  
18 Frederiksen, P. 1988.

### 5.1.2 Capacidad de uso de los suelos

Chile no cuenta con una cartografía detallada de los suelos de todo el país. Solo un 24% de la superficie tiene estudios de reconocimiento de suelo a escalas menores a 1:100.000 que permitan conocer a escala local el tipo de suelos y sus potenciales de uso. Estos estudios que se han desarrollado en el país desde la década del 1950, y que han sido compilados por CIREN desde 1996, se concentran entre la provincia de Petorca por el norte y la Provincia de Llanquihue por el sur, en la zona con mayor intensidad de uso agrícola del país. El resto del país cuenta con estudios de reconocimiento de suelos de gran escala, los que se basan en pocos datos de terreno y en gran parte en datos satelitales y fotointerpretación, por lo que el uso de esta información debe hacerse con cautela considerando el alto nivel de incertidumbre de los datos utilizados.

La Figura 5.2 muestra una compilación realizada a partir de diversos estudios, sintetizando de manera general la distribución de las clases de capacidad de uso de suelos en el país. Aquí se puede destacar que un 46 % de la superficie del país está cubierta por suelos improductivos (ej. dunas, roca, hielo, desierto), es decir áreas que no contribuyen a la producción primaria de ningún tipo, o que su producción primaria es ínfima. El segundo lugar en superficie (19%) lo ocupan suelos de categoría VIII, que corresponden a aquellos suelos que no pueden ser destinados a actividades agrícolas, ganaderas o forestales, ya sea por ser muy frágiles o porque sus propiedades no lo permitirían, por lo que se recomienda su conservación, y cuya principal función debe estar orientada a la preservación de hoyas hidrográficas, recreación y vida silvestre. El tercer lugar (18%) en superficie lo ocupan los suelos de categoría VII, los que presentan severas limitaciones para ser utilizados en cultivos y solo se recomienda un uso forestal y en algunos casos pastoreo, con prácticas de conservación adecuadas que consideren la fragilidad de estos suelos e impidan su rápido deterioro.

Estas tres categorías en total suman 83%, lo que refleja que, desde un punto productivo, que Chile solo posee 17% de tierras en categoría I a V, factibles de ser empleadas en agricultura o ganadería. Estas suman 6,9 millones de hectáreas a nivel nacional, las que son ínfimas si se comparan con los 3 billones de hectáreas destinadas a la agricultura mundialmente, Representando solo un 0,23% del total de hectáreas a nivel mundial destinadas a la agricultura (3 billones). Esto es un promedio de 0,38 hectáreas potencialmente productivas por habitante. Otro estudio de la WWF, estimó que el consumo total de productos agrícolas de la población de Chile equivale a un promedio de 0,61 hectáreas globales por persona<sup>19</sup>, mientras que la estimación de la capacidad agrícola de los suelos del país se estima en 0,46 hectáreas globales por persona<sup>20</sup>. Basado en este estudio, los chilenos estarían consumiendo más de lo que el país es capaz de producir.

Si se consideran solo los suelos con mejores aptitudes agrícolas (Clases I, II y III), estos apenas suman el 3,3% de la superficie del país, con un total de 2.526.723 hectáreas. Teniendo en cuenta que esta superficie está continuamente amenazada por la sobreexplotación agrícola y la expansión urbana, es imprescindible considerar la adopción de medidas que permitan la sustentabilidad a largo plazo de los suelos de buena calidad, sobre todo si Chile pretende seguir desarrollando el sector agrícola como un componente esencial de su economía.

Cuadro 5.1. Superficie y participación según su capacidad de uso.

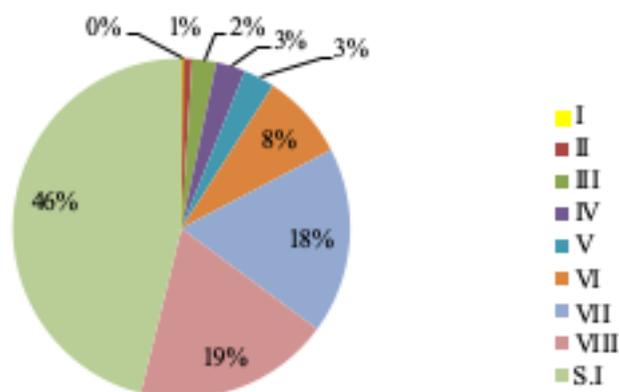
Tipo de uso	Aptitud de uso	Capacidad de uso	Superficie (ha)	Participación (%)
Suelos agrícolas arables	Sin limitaciones	I	111.346	0,15
		II	652.818	0,86
	Con limitaciones	III	1.762.559	2,33
		IV	2.106.619	2,79
<b>Subtotal (1)</b>			<b>4.633.342</b>	<b>6,13</b>
Suelos agrícolas no arables	Ganadera	V	2.271.144	3,00
	Ganadero - Forestal	VI	6.219.736	8,22
	Bosques	VII	13.430.602	17,76
<b>Subtotal</b>			<b>21.921.482</b>	<b>28,99</b>
Suelos no agrícolas	Conservación	VIII	14.200.000	18,78
Suelos improductivos			34.869.936	46,11
<b>TOTAL</b>			<b>75.624.760</b>	<b>100</b>

**FUENTE:** IREN, 1966; Santibáñez et al., 1996 y CONAF.CONAMA, 1999.

19 El concepto de hectárea global corresponde a la productividad promedio de los suelos agrícolas del planeta. 1 hectárea global corresponde entonces a una hectárea de productividad biológica promedio global.

20 Loh, J. y M. Wackernagel. 2004.

Figura 5.2. Superficie por capacidad de uso (I a VII) (%).



SI: sin información.

FUENTE: IREN, 1966; Santibáñez et al., 1996 y CONAF-CONAMA, 1999.

En el Cuadro 5.2 se muestran también datos sobre capacidad de uso de suelo por Región. Se destaca que la mayor cantidad de suelos con buenas aptitudes agrícolas se concentran en la zona Central y Centro Sur, desde las provincias de Aconcagua a Llanquihue.

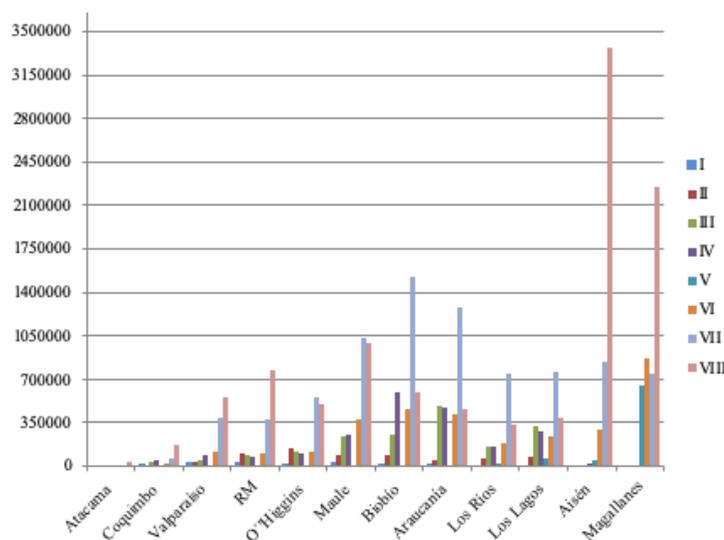
Cuadro 5.2. Superficie regional según su capacidad de uso (ha)

Capacidad de uso/ Región	I		II		III		IV		Subtotal	Subtotal	V	VI	VII	VIII
	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano	Riego	Secano						
Atacama			6.621		6.671		3.829		17.121			976	5.020	39.400
Coquimbo	1.860		12.832	98	38.450	807	27.875	19.771	81.017	20.676	308	21.578	66.541	172.351
Valparaíso	24.065		36.851	499	33.760	18.831	25.044	58.793	119.720	78.123	342	115.281	387.651	551.015
RM	29.380		99.817		87.301	2.354	26.924	48.021	243.422	50.375	701	108.378	383.522	773.532
O'Higgins	19.415		138.861		92.455	25.099	30.834	76.158	281.565	101.257	4.035	115.894	558.441	502.334
Maule	23.218		83.703	4.058	183.983	57.320	147.695	109.905	438.599	171.283	2.534	375.166	1.030.456	993.736
Biobío	11.819	15	82.888	1.037	178.560	71.009	79.328	511.513	352.595	583.574	3.031	458.775	1.527.012	601.170
Araucanía	1.574		34.682	8.347	63.468	422.812	4.265	474.229	103.989	905.388	7.565	413.439	1.272.384	456.954
Los Ríos				61.117		164.372		162.704		388.193	23.399	180.010	744.973	330.379
Los Lagos				81.408		315.306		280.523		677.237	56.457	235.801	756.753	389.399
Aisén								19.208			49.695	291.133	835.614	3.370.810
Magallanes											652.207	868.719	750.456	2.250.857
Total Nacional		15	496.255	156.564	684.648	1.077.910	345.794	1.760.825	1.638.028	2.976.106	800.274	3.185.150	8.318.823	10.431.937

FUENTE: IREN, 1966; IREN 1961-1964 y IREN-DECSA 1966.

En la Figura 5.3 se grafican las superficies por categoría de suelo para cada región. Como se pone de manifiesto, los suelos de categoría I son los menos representados a lo largo del país, encontrándose mayoritariamente en las regiones Metropolitana y Valparaíso, zonas donde al mismo tiempo se concentra el mayor desarrollo urbano e industrial. Por otra parte, los suelos aptos para conservación están presentes mayoritariamente en la zona austral, correspondientes a las regiones de Aysén y Magallanes, lo que se condice con que en esta área del país se destinan la mayor cantidad de tierras a áreas protegidas.

Figura 5.3. Superficie regional según capacidad de uso (ha)



FUENTE: REN, 1966; IREN 1961-1964 y IREN-DECSA 1966.

### 5.1.3 Estado de conservación de los suelos

En esta sección se entiende el estado de conservación de suelos como el grado de mantención de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En esa misma línea, la degradación (o deterioro) de suelos se define como un cambio en sus propiedades que resultan en una disminución en la capacidad del suelo de brindar un determinado servicio ecosistémico. Los servicios ecosistémicos del suelo son proporcionados a través de las funciones del suelo y dependen directamente de las propiedades de estos. La degradación de los suelos es un problema de larga data en Chile, con diversos impactos negativos sobre la provisión de servicios ecosistémicos. La degradación de suelos tiene como expresión la reducción en la calidad del mismo (Cuadro 5.3), la que se expresa de distintas maneras y está conectada con otros problemas ambientales como la pérdida de biodiversidad, el cambio climático y la contaminación, entre otros. En esta sección se ha agrupado el estado de conservación de suelos desde el punto de vista de su degradación física, química y biológica con la escasa información disponible hasta la fecha.

Cuadro 5.3. Principales problemas de degradación de los suelos

Tipo de Degradación	Sub-tipo de Degradación
Degradación Física	Erosión
	Compactación y encostramiento
	Subsidencia
	Anegamiento
Degradación Química	Exceso y/o falta de nutrientes
	Acidificación/Alcalinización
	Salinización
	Polución (metales pesados, pesticidas, desechos industriales)
Degradación Biológica	Pérdida de materia orgánica
	Pérdida de biodiversidad

FUENTE: Modificado de Casanova et al., 2013.

#### 5.1.3.1 Estado de degradación física

La degradación física de los suelos está relacionada principalmente con una disminución de la estructura del suelo que lleva a un incremento de la densidad aparente, una disminución de la porosidad e infiltración y por consiguiente un aumento en el escurrimiento superficial, Todo esto a la vez exagera la susceptibilidad del suelo a sufrir procesos de erosión por acción del agua y del viento.

## EROSIÓN<sup>21</sup>

La erosión es un fenómeno difícil de cuantificar, existiendo numerosas metodologías, tanto de campo como por modelos basados en datos satelitales que consideran rasgos superficiales y características del terreno, como curvatura y pendiente entre otras, las cuales tienen diferentes grados de incertidumbre y son difíciles de extrapolar ya que son muchos los factores que inciden sobre esta. A escala nacional, el catastro más reciente sobre el estado de la erosión en Chile es el realizado por CIREN en 2010<sup>22</sup>. Este estudio, publicado a escala 1:50.000 fue realizado con técnicas de percepción remota y análisis geomático, y no contó con puntos de control sistemáticos en todo el país, por lo que es importante señalar que se trata de un análisis referencial y no necesariamente refleja el estado de degradación física por acción antrópica de los suelos del país. Este trabajo más bien considera los rasgos de erosión superficial existentes (y visibles) en el terreno, pero no permite determinar la escala temporal de los procesos erosivos (tasa de erosión), ni tampoco permite distinguir si se trata de procesos inducidos naturalmente o por acción antrópica.

En cuanto a las tasas de erosión, a la fecha, el estudio más reciente a nivel nacional corresponde a la síntesis realizada por Carretier et al.<sup>23</sup>, donde se analiza la erosión a diferentes escalas temporales en todo el territorio nacional, basado en más de 485 datos de erosión tanto locales como de cuenca para todo el país (Figura 5.4). La Figura 5.4 combina la estimación del estado de la erosión actual (rasgos de erosión superficiales), la erosión a escala geológica y las tasas de erosión modernas basadas en datos medidos en campo y los datos de sedimentos en suspensión en 66 cuencas<sup>24</sup>. Si bien la zona norte presenta los mayores niveles de erosión basados en rasgos superficiales, es claro que estos se deben principalmente a una erosión de escala geológica de larga data, ya que ni las tasas de erosión naturales ni los sedimentos suspendidos reflejan tasas de erosión que puedan ser atribuidos a agentes antrópicos. De hecho, el área con precipitaciones menores a <100 mm correspondiente al norte grande, es donde se han medido las menores tasas de erosión a escala geológica en el planeta<sup>25</sup>. Por lo mismo, el análisis de esta sección se centra principalmente desde la región de Coquimbo al Sur, ya que el estudio del ciclo erosivo como un fenómeno geológico escapa del objetivo de este capítulo. Los datos de sedimentos arrastrados por los cauces muestran un aumento desde las latitudes 18° S hacia el sur, llegando a un máximo en la latitud 35° S, para luego decrecer hacia latitudes más altas<sup>26</sup>. Estos datos coinciden con los datos de erosión a escala geológica con los mayores gradientes de erosión presentes entre las latitudes 30° S y 40° S. En este sentido, la mayor erosión en el país tanto a escala geológica como moderna se produce en la zona central del país, con un máximo alrededor de los 35° S en la Región del Maule. Diversos estudios han señalado que la Cordillera de la Costa de la zona Mediterránea de Chile, entre las regiones de Valparaíso y Biobío es una de las zonas que más han sufrido de degradación de suelos por efecto antrópico<sup>27</sup>.

---

21 La erosión es la remoción del suelo de la superficie de la tierra por el agua, viento o labranza. La erosión hídrica ocurre principalmente cuando el flujo superficial transporta partículas del suelo desprendidas por el impacto de las gotas de lluvia o la escorrentía superficial, a menudo dando lugar a canales claramente definidos, tales como surcos o cárcavas. La erosión eólica ocurre cuando el suelo seco, suelto, sin cobertura es sometido a fuertes vientos y las partículas de suelo se desprenden de la superficie del suelo y son transportadas a otro lugar. La erosión por labranza es el movimiento directo del suelo pendiente abajo por los implementos de labranza y resulta en la redistribución del suelo dentro de un campo. La erosión es un proceso natural pero la tasa de erosión es típicamente incrementada (o acelerada) por la actividad humana.

22 Flores et al., 2010.

23 Carretier et al., 2018.

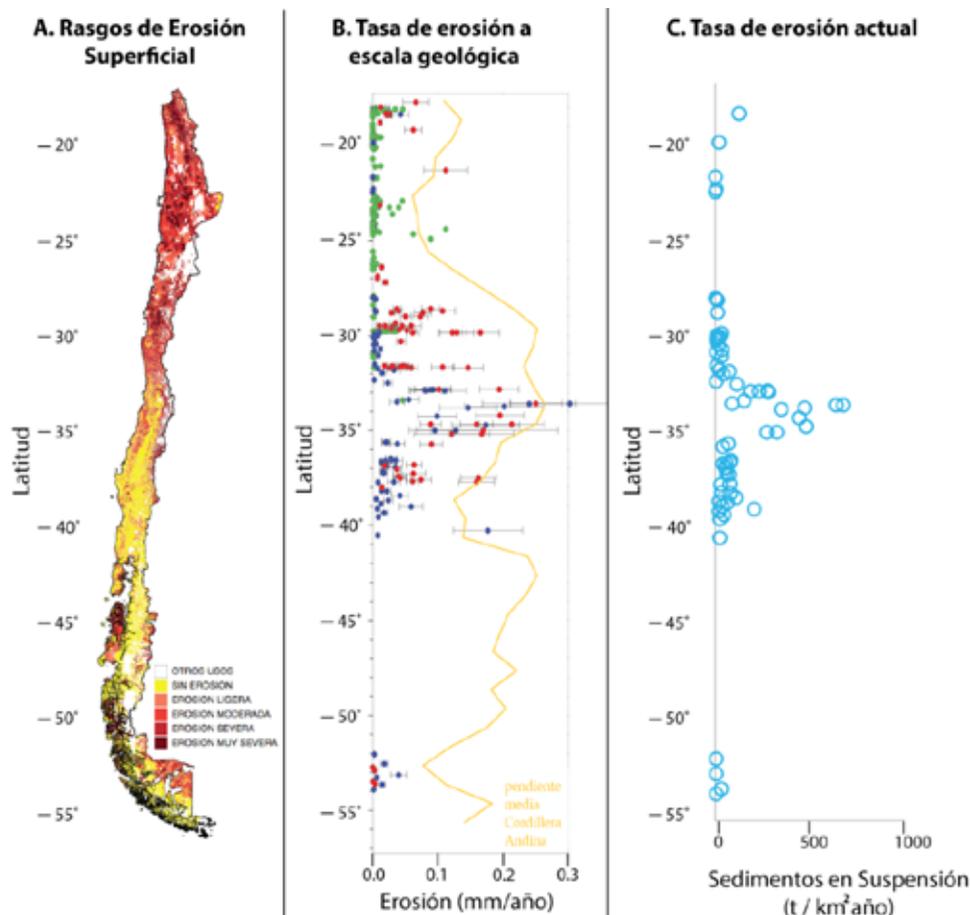
24 Pepín et al., 2010.

25 Owen et al., 2011.

26 Pepín et al., 2010.

27 Armesto et al., 2010.

Figura 5.4. Erosión de suelos a escala nacional, basados en: A. Rasgos superficiales de erosión (CIREN, 2010); B. Tasas de erosión a diferentes escalas (verde: erosión local; rojo: erosión a escala de cuenca de larga data; azul: erosión en base a sedimentos en suspensión; (Carretier et al., 2018); C. Tasas de erosión actual basados en carga de sedimentos en 66 cuencas (Pepin et al., 2010).



FUENTE: CIREN, 2010, Carretier et al., 2018 y Pepin et al., 2010.

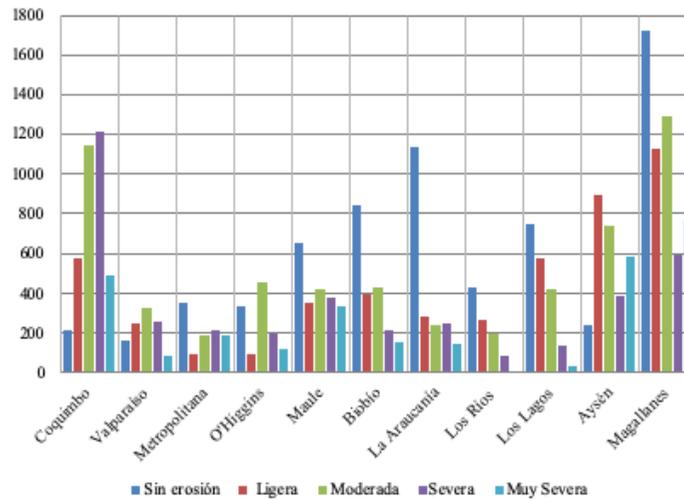
Según un estudio de erosión del INIA<sup>28</sup> y dejando fuera la zona del Norte Grande, las regiones de Coquimbo y Magallanes presentan las mayores superficies con rasgos de erosión, seguidas por las regiones de Los Lagos, del Maule y el Biobío (Figura 5.5, Cuadro 5.4). En la región de Coquimbo, con un 84% de su territorio afectado por erosión, la principal degradación estaría en los Valles, seguidos por la Cordillera de la Costa<sup>29</sup>. Entre las regiones Metropolitana y el Maule, la mayor degradación por erosión se da en la Cordillera de la Costa (Figura 5.6, Cuadro 5.5) lo que coincide con numerosos estudios que la señalan como una de las zonas más erosionadas del país<sup>30</sup>.

28 Pérez, C. y J. González, 2001.

29 IPCC, 2019.

30 Luzio, W. 2010.

Figura 5.5. Estados de erosión de suelos (ha)



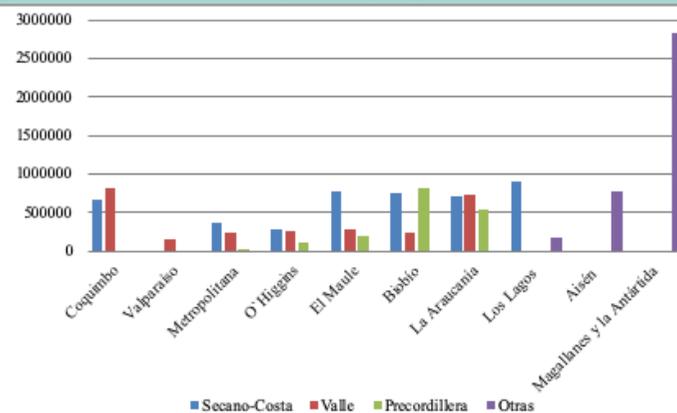
FUENTE: Pérez y González, 2001.

Cuadro 5.4. Superficie regional por grados de erosión (ha)

Región	Sin erosión	Ligera	Moderada	Severa	Muy Severa	No Aparente	Otras categorías
Coquimbo	210	572	1142	1214	492	26	404
Valparaíso	162	244	325	258	80	163	368
Metropolitana	354	93	189	213	187	68	435
O'Higgins	331	96	454	197	115	126	320
Maule	656	349	416	378	336	453	446
Biobío	840	393	429	212	149	1444	245
La Araucanía	1132	280	241	244	146	944	199
Los Ríos	427	262	198	80	6	688	177
Los Lagos	751	575	423	139	33	2143	770
Aysén	235	895	743	383	583	4551	3407
Magallanes	1721	1123	1289	590	761	3090	4633

FUENTE: Pérez y González, 2001.

Figura 5.6. Suelos erosionados por zona y Región (ha)



FUENTE: Pérez y González, 2001.

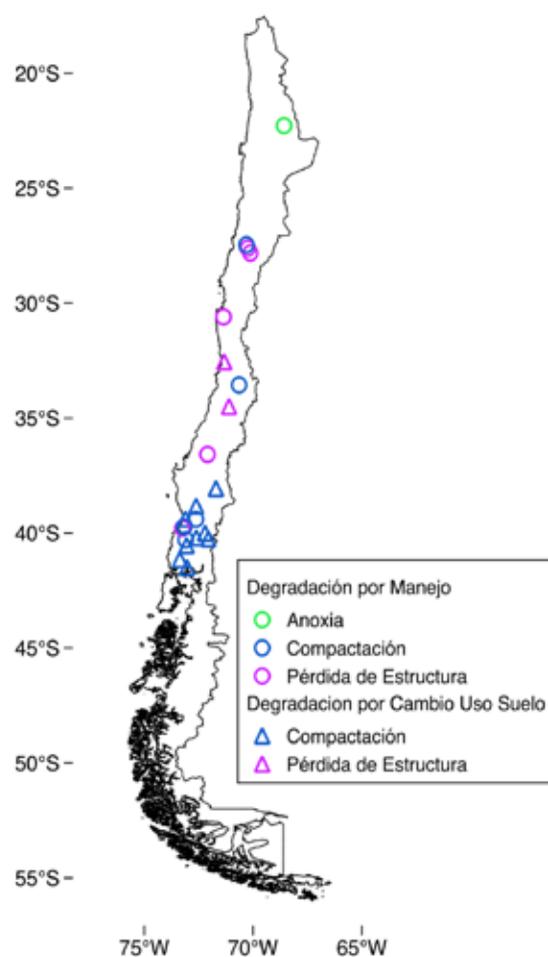
Cuadro 5.5. Suelos erosionados por Región y zona. (ha)

Región	Secano-Costa	Valle	Precordillera	Otras
Coquimbo	676712	819607	0	0
Valparaíso	0	165710	0	0
Metropolitana	359417	247001	31894	0
O` Higgins	287938	261070	119678	0
Maule	765786	294155	188129	0
Biobío	758873	245851	811847	0
La Araucanía	707266	743564	543208	0
Los Lagos	909960	0	0	174702
Aisén	0	0	0	772057
Magallanes y la Antártida	0	0	0	2819045

FUENTE: Pérez y González, 2001.

Por otra parte, en cuanto a la distribución de los suelos en Chile según nivel de erosión (Figura 5.7), la erosión severa y muy severa alcanza en Chile un 9 y 15% respectivamente, mientras que los suelos sin erosión corresponden solo al 9% del país.

Figura 5.7. Distribución de los suelos según grado de erosión.



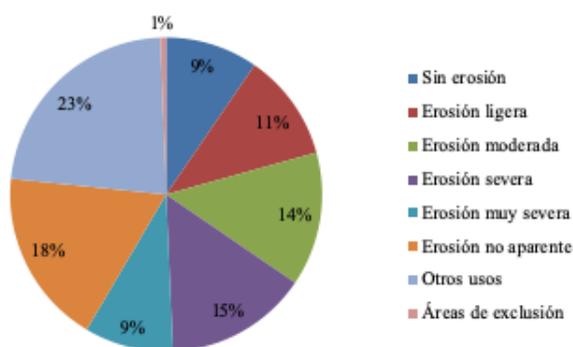
FUENTE: CIREN, 2010

### DEGRADACIÓN FÍSICA NO-EROSIVA

La degradación física no-erosiva del suelo involucra una amplia gama de problemas y procesos dentro de los cuales se puede mencionar el encostramiento, la reducción de permeabilidad, compactación, aireación pobre, subsidencia y pérdida de estructura. Estos procesos a la vez exacerban la susceptibilidad del suelo a sufrir procesos de erosión por acción del agua y del viento. No existen estudios que sintetizen la degradación física no-erosiva del suelo en Chile. Sin embargo, se han realizado una serie de trabajos que señalan la presencia de problemas de degradación física en diversas regiones del país, con énfasis en la zona central.

La Figura 5.8 sintetiza algunos trabajos de degradación física no-erosiva que cuentan con coordenadas de referencia en el país. En general, los problemas de degradación física se pueden atribuir a dos grandes causas: el cambio de uso de suelo y el mal manejo de estos, siendo los problemas detectados en la literatura para Chile la anoxia (o escasez de oxígeno en el espacio poroso), la compactación y la pérdida de estructura del suelo.

Figura 5.8. Problemas de degradación física no-erosiva.



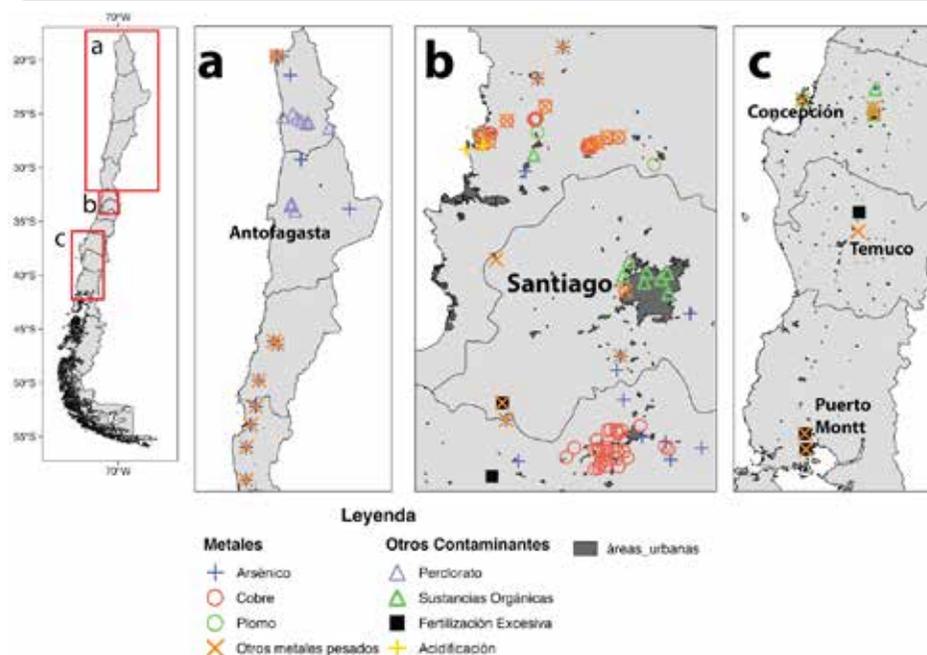
**FUENTE:** Casanova et al., 2013; Dorner et al., 2010a-b; Dorner et al., 2017; Ellies, 1995; Ferreyra et al., 1997; Fleige et al., 2016; Gayoso e Iroumé, 1991; Hernández et al., 2016; Martínez et al., 2008; Muñoz et al., 2012; Sandoval et al., 2007 y Seguel et al., 2015.

### ESTADO DE CONSERVACIÓN QUÍMICA

En Chile existen principalmente tres procesos de degradación química de los suelos: la acidificación, la salinización y la contaminación. Es importante considerar que en nuestro país existen algunas zonas que por condiciones naturales contienen suelos con altas concentraciones de sales o metales pesados, y que estas condiciones no necesariamente se deben a un proceso de degradación química por acción antrópica. Sin embargo, la vulnerabilidad de un suelo a sufrir procesos de degradación química depende del estado inicial del suelo y de sus propiedades; a modo de ejemplo, un suelo que contiene altos contenidos de sales de manera natural es más susceptible de ser degradado por procesos de salinización que un suelo con bajos contenidos de sales naturales.

La Figura 5.9 muestra la distribución de algunos problemas de degradación química de los suelos del país, incluyendo suelos ubicados en zonas urbanas y periurbanas. La zona norte tiene suelos que naturalmente tienen altos contenidos de perclorato y arsénico, aunque este último elemento también se puede encontrar en altas concentraciones en la zona central por efecto de actividades antrópicas. La zona central es la que cuenta con el mayor número de datos con problemas de contaminación química, los que se concentran principalmente en localidades de las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Cachapoal. La zona centro sur cuenta con reportes puntuales y aislados de metales pesados, sustancias orgánicas y exceso de fertilización, mientras que para la zona austral no se encontraron datos de degradación química.

Figura 5.9. Distribución de problemas de degradación química de suelos



**FUENTE:** Antilen et al., 2006; Bundschuh et al., 2002; Cáceres et al., 2009; Cáceres et al., 2013; Calderón et al., 2014; Calderón et al., 2016; Cazanga et al., 2008; Corradini et al., 2017; De Gregori et al., 2000; Donoso et al., 1999; Albornoz y Cartes, 2009; FIA, 2009; Gidhagen et al., 2002; Gonzalez et al., 2014; Henríquez et al., 2006; Lybrand et al., 2016; Molina et al., 2009; Núñez et al., 2010; Pinochet et al., 1999; Pizarro et al., 2010; Molina-Roco et al., 2018; Salazar et al., 2018; Takazawa et al., 2004; Tchernitchin et al., 2006; Tume et al., 2008; Tume et al., 2018 y Verdejo et al., 2016.

### ACIDIFICACIÓN

En Chile, la acidez natural de los suelos sigue una tendencia que va acorde al régimen de precipitaciones de éstos. La Figura 5.10 muestra un análisis en base a 710 perfiles de suelo, donde se observa que los valores de pH decrecen desde el extremo norte hacia el centro sur, para luego volver a incrementarse hacia el extremo sur. Los suelos más ácidos se encuentran alrededor de los 42° S en la región de Los Lagos, son principalmente Andisoles (trumaos) y Ultisoles (rojo arcillosos), y están ubicados en un clima con precipitaciones por sobre los 800 mm/año<sup>31</sup>. Los suelos con un pH < 5,8 son particularmente susceptibles a sufrir fitotoxicidad por exceso de aluminio disponible, lo que se puede acentuar con un mal manejo que implique aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados que aumentan la acidez, o en zonas cercanas a plantas de fundición de metales<sup>32,33</sup>.

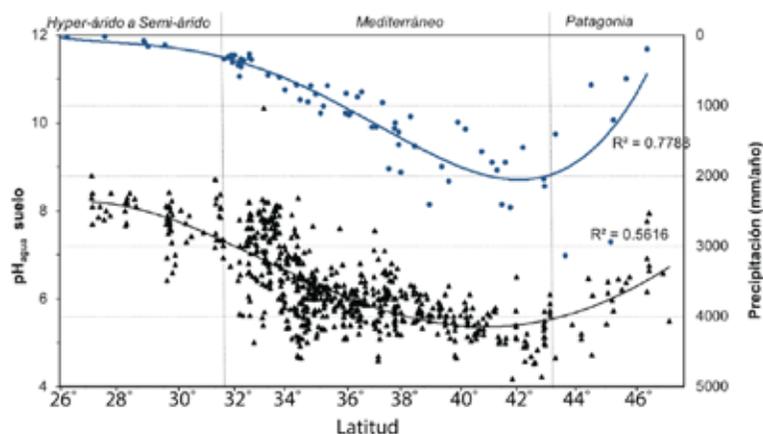


Figura 5.10. Precipitaciones medias anuales (azul) y acidez (negro) superficial de suelos en un gradiente latitudinal en Chile (modificado de Casanova et al., 2013)

**FUENTE:** Casanova et al., 2013.

31 Casanova et al., 2013.

32 Sadzawka, A. 2006.

33 León, O. y M. Carrasco. 2011.

## SALINIDAD Y SODICIDAD

Según el inventario global de recursos terrestres de la FAO<sup>34</sup>, Chile tiene alrededor de 759.000 ha de suelos afectados por salinidad y otros 33.000 ha afectados por sodicidad. La mayoría de esta superficie se encuentra en el norte del país, donde las sales se acumulan naturalmente debido a la escasa precipitación existente. Los escasos suelos agrícolas encontrados en la zona norte del país son particularmente susceptibles de sufrir procesos de salinización por mal manejo que provoquen serios problemas de degradación, principalmente por el uso de agua de riego deficitario con altos contenidos de sales.

## CONTAMINACIÓN

Se entiende por contaminación de un suelo a la presencia de un químico tóxico en el suelo, el cual en altas concentraciones tiene un efecto negativo sobre la salud humana o el ecosistema. La introducción de un contaminante puede estar dada por la actividad humana o ser de origen natural<sup>35</sup>. A grandes rasgos, los contaminantes del suelo se pueden dividir en contaminantes de origen orgánico y aquellos inorgánicos.

- Sustancias orgánicas contaminantes

Dentro de este concepto se agrupan una gran cantidad de compuestos orgánicos manufacturados como los solventes, cosméticos, refrigerantes, preservantes, pesticidas, herbicidas y antibióticos, además del petróleo y todos sus derivados. Muchos de estos compuestos son extremadamente tóxicos para los organismos, incluidos los humanos. Debido al intensivo uso en casi todas las actividades humanas, los compuestos orgánicos sintéticos se pueden encontrar en casi todos los ambientes. Los compuestos orgánicos más comunes en los suelos son los pesticidas, debido a su uso intensivo en la agricultura, mientras que los otros compuestos tienden a presentarse de forma más localizada. Uno de los grandes problemas de los pesticidas es su persistencia en el suelo. Si bien en Chile no hay levantamientos a escala nacional de este problema en el suelo, es esperable que se encuentren en distintos niveles en toda la zona de uso agrícola intensivo<sup>36 37 38 39</sup>. La información sobre otros compuestos tóxicos orgánicos es sumamente escasa y puntual, habiéndose detectado su presencia tanto en suelos agrícolas como en suelos urbanos.<sup>40 41 42 43 44</sup>

- Perclorato

El perclorato ocurre naturalmente en suelos de zonas áridas alrededor del mundo al caer de la atmósfera y acumularse en ambientes con escasa precipitación. El Desierto de Atacama en Chile tiene los suelos con mayores contenidos naturales de perclorato del mundo<sup>45</sup>. El perclorato en el Desierto de Atacama se distribuye ampliamente de manera natural en los suelos de las regiones de Tarapacá y Antofagasta; éste se encuentra junto con los depósitos de nitratos que son explotados para su utilización como fertilizante nitrogenado, los que a su vez se convierten en una fuente de percloratos para suelos donde son aplicados<sup>46</sup>. Se ha reportado que los fertilizantes de nitratos provenientes del caliche chileno tienen contenidos entre 0,01% y 0,03% de perclorato, el cual no es eliminado en los procesos productivos, acumulándose de manera sostenida en los suelos de las zonas agrícolas del país, con el potencial de contaminar las aguas subterráneas de zonas sin presencia natural de este compuesto. Numerosos estudios demuestran la acumulación de perclorato en frutas, verduras y productos derivados como el vino<sup>47 48 49</sup>. Si bien no hay consenso sobre el efecto negativo del perclorato sobre el medio ambiente y la salud humana, existen normas que restringen el contenido de este compuesto tanto en los EEUU y de la Unión Europea<sup>50</sup>, por lo que la presencia de perclorato en los alimentos que son exportados a esos países puede generar un potencial problema en el futuro para la industria exportadora.

34 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2010.

35 Chesworth, W. 2007.

36 Flores et al., 2009.

37 Hernández et al., 2008.

38 Seeger et al., 2010.

39 Suárez et al., 2013.

40 Cáceres-Jensen et al., 2009.

41 Cáceres-Jensen et al., 2013.

42 Corradini et al., 2019.

43 Muñoz-Quezada et al., 2012.

44 Takazawa et al., 2004.

45 Lybrand et al., 2016.

46 Calderón et al., 2014b.

47 Calderón et al., 2017.

48 Calderón et al., 2014a.

49 Wang et al., 2009.

50 EFSA. 2014.

- Fertilizantes

Los fertilizantes generan problemas ambientales que principalmente guardan relación con su uso excesivo y con la presencia de contaminantes asociados a estos. En el primer caso, el exceso de nutrientes, no aprovechados por los cultivos, como por ejemplo el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), puede perderse del perfil de suelo por procesos de lixiviación y escurrimiento superficial. Esto genera problemas de eutrofización en sistemas hidrológicos, reduciendo los niveles de oxígeno e impactando directamente la salud de los ecosistemas<sup>51</sup>. De hecho, en Chile una de las principales causas de la eutrofización de sistemas lacustres y cursos de agua se ha asociado precisamente a la fertilización excesiva de suelos de uso agrícola. Por otro lado, problemas de contaminación también pueden ocurrir por el uso de fertilizantes que traen asociados elementos que representan riesgos para la salud humana y ambiental. Como se ha mencionado anteriormente, el uso de fertilizantes nitrogenados naturales contiene perclorato. En otros casos, el sobre uso de fertilizantes fosfatados con concentraciones importantes de metales pesados, como por ejemplo el cobre y arsénico, ocasionando una acumulación de estos en los suelos y un riesgo latente de ingreso a cadenas tróficas<sup>52 53 54</sup>. El sobre uso de fertilizantes fosfatados es de especial relevancia en la zona centro-sur del país, caracterizada por la presencia de suelos volcánicos con alta capacidad de retención de fósforo debido a su mineralogía, donde la aplicación de este vital elemento se hace en grandes cantidades.

- Boro<sup>55</sup>

El boro es un elemento fundamental para el desarrollo de los vegetales, sin embargo en altas concentraciones es tóxico. En Chile, este elemento es naturalmente abundante en el extremo norte, mientras que en la zona mediterránea existen zonas con deficiencia de boro.

En el norte de Chile existen valles de uso agrícola que, aunque presentan condiciones agroclimáticas favorables para la agricultura, también presentan altas concentraciones de boro, situación que restringe su explotación a cultivos resistentes a este elemento. Cuando los suelos se encuentran contaminados con este elemento, solo es posible cultivar especies altamente tolerantes como maíz choclero, alfalfa, cebolla, ajo y betarraga, por lo que el abastecimiento de otras hortalizas debe suplirse con la exportación de otras regiones, encareciendo sus precios.

En Chile, la ulexita es la fuente natural de boro más importante, la cual se encuentra en los salares ubicados a gran altitud y usualmente, en la cabecera de fuente de aguas superficiales como el de Surire en la provincia de Parinacota. Esto ha generado que diferentes lugares del norte del país estén constituidos por valles de uso agrícola “boratados”, tanto en sus aguas superficiales como en el suelo. El contenido de boro en algunos ríos del norte del país se presenta a continuación en el Cuadro 5.6, contenido que en algunos casos limitan fuertemente el potencial agrícola de los valles, afectando particularmente a los suelos de Arica. Si bien experiencias de remoción de boro en aguas de regadío del valle de Lluta han demostrado que es posible retirar este elemento y ampliar el espectro de cultivos en la zona, el ascenso capilar con aguas ricas en boro desde napas subterráneas resulta en una continua presencia de este elemento en suelos agrícolas.

La presencia de boro también perjudica a la población humana a través del consumo de agua potable. Esto, ya que el agua de consumo en algunos casos excede a los 0,3 mg/l, valor máximo recomendado por la norma dictada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) respecto al agua potable.

Cuadro 5.6. Concentración de boro en aguas para riego en el Norte Grande

Sector	Fuente de agua	Boro (mg/l)
Lluta 1	Canal del río Lluta km 15	16.6
Lluta 2	Canal del río Lluta km 25	9.5
Chiza 1	Vertiente canalizada	2.2
Chiza 2	Vertiente en surgencia	1.9
Suca	Vertiente	1.9
Miñi-Miñe	Vertiente	1.3
Quipinta	Vertiente	3.1

Casablanca	Canal río Quebrada de Tarapacá	6
Loanzana	Canal río Quebrada de Tarapacá	4.6
Guatacondo	Vertiente	1.8
Copiapó	Canal río Copiapó	1.4
Huasco	Canal río Huasco	0.9
Taltal	Pozo	1.2
Toconao	Canal superficial	0.6
San Pedro	Canal superficial	1.1

FUENTE: Figueroa et al., 1998.

51 Pizarro et al., 2010a.

52 Bonomelli et al., 2002.

53 Escudey et al., 2004

54 Molina et al., 2009.

55 Alborno, G. y M. Cartes. 2009.

- Arsénico

El norte de Chile posee altos contenidos de arsénico en aguas y suelos que son de origen natural, el que ha afectado a las poblaciones humanas desde la prehistoria<sup>56</sup>. Si bien el As se encuentra de forma natural en los sistemas acuáticos y terrestres del norte grande, la intensa actividad minera de la zona ha aumentado su presencia a niveles muy elevados, habiendo sido detectado el elemento en partes comestibles de frutas y verduras. En la zona central de Chile también se ha detectado arsénico tanto en suelos agrícolas como suelos urbanos, principalmente en los valles del Aconcagua, Maipo y Cachapoal, lo que es atribuido a la presencia de actividades industriales como la minería<sup>57 58</sup>.

- Otros elementos contaminantes

Existe otra serie de elementos que en exceso tienen un efecto tóxico y que se acumulan en el suelo, dentro de los cuales se puede encontrar el Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Mercurio, Níquel, Selenio y Zinc. Algunos de estos elementos son esenciales para los ciclos biológicos y por ende se consideran micronutrientes (Ej. Cu, Se, Zn, Cr). En Chile, existen diversas fuentes de estos contaminantes que terminan en el suelo, dentro de las que se puede destacar el riego, las emisiones industriales (RILES y atmosféricas), los insumos agrícolas y los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas. Las aguas de la zona norte de Chile tienen naturalmente altos contenidos de As, Cu, Cr, Mo, Cd, Pb, Hg y SO<sub>4</sub>, ya sea por causas naturales o bien por acción antrópica. El riego con estas aguas provoca una concentración de estos elementos en el suelo, los que pueden provocar problemas en la salud al ser asimilados por plantas de consumo humano, o bien al incorporarse material particulado a la atmósfera por erosión eólica. (Cuadro 5.7)

En Chile, es particularmente preocupante el uso de agua de riego con altos niveles de contaminantes en la zona norte, ya que la aridez de la zona hace que estos elementos se acumulen a mayores tasas. De hecho existen casos críticos como el río Elqui, que presenta altos contenidos de As, Cu y Pb en las aguas de riego<sup>59</sup>. Es esperable que los contenidos de metales pesados en suelos de zonas urbanas sean altos, sin embargo los datos hasta ahora son muy escasos<sup>60 61</sup>. Muchos suelos aledaños o río abajo de zonas urbanas presentan altos niveles de contaminación por efecto del riego con aguas servidas antes que estas fueran tratadas<sup>62</sup>.

Cuadro 5.7. Contenido total promedio de elementos (mg/kg ss<sup>1</sup>) en los estratos superficiales de algunos suelos

Valle (Región)	Cobre	Plomo	Cinc	Cadmio	Arsénico	Manganeso
Huasco	31	15	81	<2,5		739
Elqui	87	31	179	<2,5		876
Limarí	65	33	92	<2,5		-
Ligua	72	8	81	0,19	8,2	-
Aconcagua	128	56	29	0,3		-
Puchuncaví	543	53	95	0,91	43,3	-
Mapocho	197	29	150	1,02		-
Maipo	72	24	107	0,45		921
Cachapoal	427	26	136	<5		678 (ribera norte)
						726 (ribera sur)
Tinguiririca	54	20	95	<3		687
Mataquito	38	18	82	<1		696
Maule	28	21	65	<1		688 (ribera norte)
						702 (ribera sur)

56 Bundschuh et al., 2012.

57 De Gregori et al., 2003.

58 Berasaluce et al., 2019.

59 Pizarro et al., 2010b.

60 Tume et al., 2008.

61 Tume et al., 2018.

62 Schalscha, B. y T. Ahumada. 1998.

Biobío	31	16	67	<1		957
IX Región	50	23	67	<1		2019
X Región	35	20	46	<1		999
Simpson	13	-	50	<1		888
Contaminación ligera*	100-200	500-1000	250-500	1-3	30-50	500-1000
Contaminación moderada*	200-500	1000-2000	500-1000	3-10	50-100	1000-2000
Contaminación severa*	>500	>2000	>1000	>10	>100	>2000

\*Rangos de Contaminación según norma Inglesa ICRCCL 59/83

FUENTE: SAG y Universidad de Chile, 2005.

### 5.1.3.3 Estado de conservación biológica

Se estima que un cuarto de las especies de la Tierra viven en el suelo, un gramo de suelo puede llegar a contener hasta un billón de células de bacterias consistentes en decenas de miles de taxas, constituyéndose por tanto el suelo en un ecosistema diverso, que cumple una serie de funciones que son vitales para el equilibrio terrestre. Dentro de estas funciones esenciales está procesar los desechos orgánicos provenientes de plantas, animales y humanos, regular el ciclo del carbono y del agua, controlar poblaciones de organismos patógenos y descontaminar desechos tóxicos; además es la principal fuente de farmacéuticos de control antibiótico. A pesar de su importancia, se sabe muy poco de la biología de los suelos. En esta sección se realiza una síntesis en base a algunos trabajos publicados sobre biodiversidad (macro, meso y microorganismos) y materia orgánica de los suelos. De esta última, si bien solo una parte está constituida de organismos vivos, se considera aquí por estar íntimamente ligada a las propiedades y funciones biológicas del suelo.

## BIODIVERSIDAD

- Microorganismos

Los microorganismos del suelo, o microflora edáfica, juegan un rol esencial en los ciclos biogeoquímicos del suelo entre los que se encuentran la intervención en procesos de fijación del nitrógeno atmosférico, liberación o retención de gases de efecto invernadero, descomposición de desechos o residuos orgánico y redistribución de nutrientes, degradación de pesticidas, supresión o control de patógenos asociados a plantas, y producción de compuestos bio-activos como vitaminas, hormonas y enzimas que estimulan el crecimiento de las plantas, entre otros, por lo que la biodiversidad de los microorganismos del suelo es un factor clave para un desarrollo sostenible.

Por tal motivo parece razonable incluir la biodiversidad de los microorganismos como un factor crítico al enfrentar el análisis de la degradación de los suelos. Los recientes avances en genómica y herramientas informáticas han ampliado la capacidad para caracterizar la biodiversidad de suelos. Estudios basados en el marcador ribosomal 16S han redefinido e incrementado nuestro conocimiento sobre la diversidad microbiana del planeta. Cálculos simples de la diversidad microbiana del suelo permiten estimar un rango promedio de 3.000 a 11.000 genomas distintos por gramo de suelo, alcanzando un millón de especies por tonelada.

Como ejemplo de las diversas funciones que cumplen estos organismos se encuentran las bacterias capaces de fomentar el crecimiento de las plantas, conocidas como bacterias promotoras del crecimiento vegetal o PGPB (por sus siglas en inglés plant growth promoting bacteria). Las PGPB son capaces de promover el crecimiento vegetal a través de la producción de auxina, fijación de nitrógeno y solubilización de fosfato entre otros. Estudios recientes en nuestro país, especialmente en algunas regiones, permiten tener las primeras estimaciones del estado de la biodiversidad microbiana de suelos y realizar una comparación con otras regiones del planeta. En esta sección, se entregan algunos antecedentes sobre la biodiversidad de comunidades de microorganismos del suelo, utilizando información recopilada en artículos que informan sobre la microbiología ambiental de los suelos en Chile. Sin embargo, también se han incluido las incógnitas que limitan nuestra capacidad de predecir el efecto que tendrá el cambio climático sobre la biodiversidad de microorganismos y calidad de los suelos en el país.

Como se menciona en la sección 5.2.4.2.1, suelos con un pH ácido (pH<5.8) son particularmente susceptibles a sufrir fitotoxicidad por exceso de aluminio disponible, lo que se puede acentuar con un mal manejo que implique aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados. El 50% de la producción de cereales se genera en el sur de Chile, una zona donde aproximadamente un 60% corresponden a suelos volcánicos derivados de cenizas ácidas (Andisoles), caracterizados por valores de pH de 4,5 a 5,5.

En estos valores de pH, el Al solubilizado queda disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas, limitando la producción

de los cultivos al reducir la absorción de nutrientes y aumentar la acumulación de especies reactivas de oxígeno. En este contexto, la presencia de microorganismos del suelo es una herramienta útil y amigable con el medio ambiente para aliviar los efectos tóxicos del Al en el crecimiento de las plantas. En particular, la colonización de la raíz por hongos micorrícicos arbusculares simbióticos y bacterias pueden aumentar la resistencia de las plantas a la acidez y los niveles fitotóxicos de Al en el ambiente. Estudios sobre la composición de microorganismos asociada a las raíces (rizósfera y endósfera) de cultivo de cereales y pastizales en Andisoles en Chile, indican una gran diversidad de bacterias en estos suelos, incluyendo la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno de los filo Proteobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes y Firmicutes.

Sin embargo, el conocimiento sobre las poblaciones bacterianas de fijación de nitrógeno asociadas con plantas es aún muy limitado. De acuerdo con Rilling et al. (2018), es crítico realizar un estudio exhaustivo sobre la abundancia, diversidad y actividad de las poblaciones bacterianas que fijan nitrógeno, a fin de implementar el uso de nuevos fertilizantes y estrategias agronómicas de gestión que permitan procesos de fertilización amigables con el ambiente, que además disminuyan el costo para los agricultores.

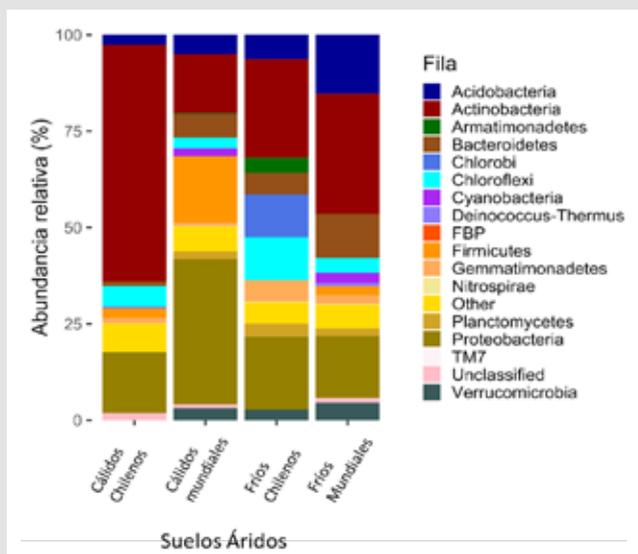
El ecosistema mediterráneo en Chile central posee una gran diversidad de plantas vasculares y es una de las regiones más importante de la producción de vino. Sin embargo, los cambios que introduce esta práctica agrícola pueden tener efectos importantes sobre la biodiversidad del suelo, principalmente debido a que modifica sus propiedades físicas y químicas. Análisis del efecto de estos cambios en la viticultura sobre la diversidad taxonómica y funcional de la comunidad de bacterias y hongos presentes en los suelos y plantas de viñedos en Chile central han sido recientemente descritos.

Mediante la comparación de suelos del bosque nativo circundante a los viñedos, los autores han podido establecer una línea de base de las condiciones del suelo en el área antes del establecimiento del viñedo. Los resultados de análisis metagenómicos sugieren que el suelo del bosque nativo puede constituir una reserva de biodiversidad de microorganismos y reducir los cambios derivados del cambio en el uso del suelo. Interesantemente, la actividad metabólica de los microorganismos parece ajustarse en una forma que no depende de la estructura taxonómica de la comunidad de microorganismos. Aunque se requiere ampliar a nuevos escenarios este tipo de estudios, es razonable pensar que la implementación de prácticas amigables con el medio ambiente por parte de la industria del vino puede ayudar a mantener la diversidad microbiana y las funciones del ecosistema asociadas con los hábitats naturales.

#### Recuadro 1. Biodiversidad de microorganismos del suelo asociado a plantas en ambientes naturales: la región de Atacama como laboratorio natural

Dos estudios recientes se han realizado sobre la composición, diversidad e interacción de las comunidades bacterianas asociadas a plantas nativas en ambientes extremos de Chile, en el desierto de Atacama (Zhang et al., 2019; Fernández-Gómez et al., 2019). En particular, las plantas *Distichlis spicata*, *Pluchea absinthioides* fueron muestreadas en un sitio próximo a la laguna Cejar (Zhang et al., 2019) y *Calamagrostis crispera*, *Nassella nardoides*, *Jarava frígida*, y *Pycnophyllum bryooides* en la ladera oeste de la Cordillera de los Andes, en la región de Atacama (Fernández-Gómez et al., 2019). El análisis meta genómico indica que, en general, entre plantas y bacterias se establecen interacciones especie-específica, lo cual sugiere que la disponibilidad de determinados microorganismos en el ambiente puede ser un factor clave para un reclutamiento especie-específico (Bulgarelli et al., 2013). En este contexto, los datos sugieren que el compartimento endófito de las plantas de la región oriental del desierto de Atacama, contiene bacterias que provienen de la rizósfera, la cual representa un subconjunto de las bacterias disponibles en el suelo desnudo que rodea la planta (Fernández-Gómez et al., 2019; Zhang et al., 2019). En esta región del norte del país, Mandakovic et al. (2018), generaron una base de datos de cerca de tres millones de secuencia de 16S rRNA a partir de DNA obtenido del suelo desnudo en ambientes no intervenidos, la cual permite identificar una diversidad de 4.437 especies de bacterias cuya distribución es explicada principalmente por el valor de pH del suelo. Un ejemplo de estudios de biodiversidad de microorganismos de suelo a nivel de país lo constituye el realizado por Karimi et al. (2018), en el cual un conjunto de 2.173 muestras de suelo que cubren todo el territorio francés fue realizado mediante técnicas de secuenciación masiva. Los resultados del estudio permiten establecer que los principales factores que determinan la biodiversidad de bacterias y arqueas son la textura del suelo, el pH y la cantidad de materia orgánica, información clave para monitorear y prevenir la degradación del suelo en función de los cambios de uso, especialmente asociado a la viticultura. Desde un punto de vista biogeográfico, también es importante conocer si la biodiversidad de microorganismos en los suelos de la región de Atacama se diferencia de otros suelos áridos del planeta. La Figura muestra que la proporción de bacterias de suelos áridos no agrícolas pertenecientes a diferentes filos varía respecto del patrón a nivel mundial (Vázquez et al., 2019; en preparación). El resultado indica que especies del filo Actinobacteria están más representadas en suelos áridos de Chile. Lo contrario sucede con miembros de los filo Proteobacteria y Firmicutes, lo cual sugiere que existen factores que nos diferencian de los suelos áridos presentes en otras regiones desérticas del planeta. Una colección de 100 especies de bacterias aisladas de la región de Atacama fue generada con el propósito de rescatar bacterias del suelo con potencial aplicación biotecnológica (Maza et al., 2019). Interesantemente, 16 especies presentaron potencial actividad PGP la cual puede permitir utilizar especies nativas de bacterias para programas de mejoramientos de suelos agrícolas en el norte de Chile. Considerados en conjunto, este tipo de estudio es necesario para conocer con precisión la diversidad de comunidades bacterianas del suelo asociado a plantas y establecer una línea base que permita evaluar el impacto de cambios en la calidad del suelo en nuestro país. Las barras verticales representan promedios de abundancias relativas de muestras extraídas de artículos incluidos en la búsqueda sistemática.

### Estructura de las comunidades bacterianas de suelos áridos según la temperatura media anual



Las barras indican abundancia relativa coloreadas por filas bacterianas, están sorteadas de acuerdo a la temperatura media anual clasificada como fría (-20-14°C) y cálidos (15-30°C) de forma local (suelos chilenos) y mundial.

**FUENTE:** Fernández-Gómez et al., 2019; Karimi et al., 2018; Mandakovic et al., 2018; Maza et al., 2019; Zhang et al., 2019 y Vázquez et al., 2019.

- Fauna edáfica

La fauna de suelo se puede clasificar según su tamaño (referido por ejemplo al ancho corporal) en megafauna (> 20 mm), macrofauna (2 - 20 mm), mesofauna (0.1 - 2 mm) y microfauna (< 0.2 mm).

#### **Megafauna y Macrofauna:**

Miles de organismos viven permanente o temporalmente en el suelo. Al igual que en la microfauna del suelo, los estudios destinados a comprender la fauna del suelo no son muy extensos, principalmente por la inmensa diversidad de organismos, pero también debido a que la importancia de estos organismos y sus funciones no es del todo comprendida. Los organismos más grandes que habitan el suelo son principalmente roedores, los cuales a pesar de su bajo número comparativo con otros organismos pueden jugar un rol fundamental en la formación y función del suelo debido principalmente a la mezcla y movimiento del material. En Chile, además de las dos especies introducidas de roedores existentes, se destacan dos especies nativas de mamíferos subterráneos, el Degú (*Octodon degus*) y cururo (*Spalacopus cyanus*) los que jugarían un rol importante en el desarrollo de suelos de ladera en la Cordillera de la Costa de Chile central<sup>63</sup>. Otros vertebrados que juegan un rol importante en cuanto a la bioturbación de suelo son los reptiles que en Chile alcanzan las 107 especies terrestres, dentro de los cuales se puede destacar las lagartijas del género *Liolaemus* con 12 especies.

El Cuadro 5.8 presenta algunos taxos de macrofauna con organismos descritos para el suelo en Chile. En cuanto a los invertebrados, se puede destacar las lombrices de tierra y una serie de taxos pertenecientes al filo de los artrópodos que pasan parte de su ciclo bajo el suelo. Las lombrices de tierra (*Oligochaeta*) son conocidas por su efecto benéfico por ser descomponedoras de material detrítico de origen vegetal o animal y al no alimentarse de plantas vivas no constituyen plagas. En los ambientes alterados, la especie más conocida es la introducida lombriz californiana (*Eisenia foetida*), mientras que del resto de las 84 especies conocidas para Chile tanto endémicas como introducidas, apenas se conoce su biología. Destacan dentro de los insectos el grupo de las abejas (*Apoidea*) con 373 especies, muchas de ellas nidifican en el suelo, algunas llegando a realizar túneles que llegan hasta los 70 cm de profundidad<sup>64</sup>. El grupo taxonómico más numeroso dentro de la macrofauna edáfica lo constituyen los insectos con alrededor de 2.000 especies ubicadas en grupos taxonómicos que realizan parte de su ciclo en el suelo, de los cuales más de la mitad está constituido por Coleópteros. Otros grupos relevantes corresponden a los chanchitos de tierra (*Isópodos*), ciempiés y milpiés.

63 Schaller et al., 2018.

64 Sarzetti et al., 2013.

Cuadro 5.8. Especies de organismos de megafauna y macrofauna edáfica en Chile

Taxa/Organismo				Especies	Géneros
Mamíferos*				4	4
Reptiles				107	67
			Lombrices de tierra (Oligochaetos)	84	24
Artrópodos	Crustáceos	Isopodos	Chanchitos de tierra	430	27
		Chilopodos	Ciempíes	66	32
		Diplopodos	Milpies	77	28
	Insectos			2102	526
		Dermapteros	Tijeretas	13	6
		Collembolos	Colémbolos	121	49
		Hymenopteros*		633	150
			Formicidae	62	22
			Mutillidae	28	6
			Scoliidae	2	2
			Vespidae	57	16
			Sphecoidea	111	37
			Apoidea	373	67
		Orthopteros*		49	19
			Aacriidae	20	8
			Gryllidae	5	3
			Proscopidae	24	8
		Coleopteros*		1286	302
			Carabidae	357	86
			Lucanidae	37	6
			Scarabidae	169	52
			Heteroceridae	3	3
			Elateridae	118	47
			Cantharidae	65	12
			Melyridae	57	8
			Tenebrionidae	480	88

\*Solo se consideran familias en que parte de su ciclo de vida se desarrolla en el suelo.

**FUENTE:** CONAMA, 2008; Elgueta y Rojas, 2000 y Peña, 1996.

#### Mesofauna y microfauna:

El Cuadro 5.9 presenta la diversidad de organismos descritos para Chile dentro de lo que se considera como mesofauna del suelo. En general el número de especies descritas es extremadamente bajo comparado con la cantidad de especies descritas para otros países, lo que se debe probablemente a la falta de investigación sobre estos organismos más que a una baja diversidad en nuestro país. Según estudios llevados a cabo en otros países, este tipo de organismos son extremadamente abundantes en los suelos, principalmente en suelos de praderas, con densidades de miles de especies por metro cuadrado<sup>65</sup>. Los grupos con mayor cantidad de especies descritas

para el país lo constituyen los colémbolos y los nemátodos. Dentro de los colémbolos están aquellos que viven en la hojarasca y aquellos que viven bajo la superficie, la mayoría de ellos se alimenta de hongos, bacterias y desechos de plantas, aunque también existen algunas especies depredadoras de nemátodos. Los colémbolos son responsables de hasta el 30% de la respiración del suelo, dependiendo del hábitat. En cuanto a los nemátodos, la mayoría de la información está asociada a nemátodos fitoparasitarios de suelos agrícolas, existiendo muy pocas prospecciones de nemátodos de vida libre, casi todas circunscritas a la zona austral. Los nemátodos son un grupo muy diverso, se estiman alrededor de 40 mil especies, de las cuales la mayoría serían endémicos de zonas particulares, existiendo pocas especies cosmopolitas, siendo estas últimas las más estudiadas y las que comúnmente se asocian a suelos cultivados. El número de ácaros edáficos descritos para el país es ínfimo considerando que se han descrito más de 50.000 especies en el mundo. Los proturos y dipluros son organismos poco comunes con menos de 1.000 especies descritas para cada grupo en el mundo.

Taxa/Organismos	Especies	Géneros
Ácaros	22	21
Colémbolos	121	49
Proturos	1	1
Dipluros	18	8
Nemátodos	121	70

**FUENTE:** CONAMA, 2008; McInnes, 1994 y Peña, 1996.

### MATERIA ORGÁNICA

Se define a la materia orgánica del suelo como la mezcla distintiva de restos de plantas y animales, y otros materiales de origen animal o vegetal que han sido alterados hasta el grado que ya no contienen su organización estructural original<sup>66</sup>. A este último material, cuyo material de partida no es reconocible se le conoce convencionalmente como humus, y constituye la fracción de la materia orgánica más importante y más resiliente en la mayoría de los suelos. La materia orgánica del suelo juega un rol fundamental en el ciclo del carbono, al contener casi 2/3 del carbono terrestre, estimándose esta en alrededor de 1.530 Petagramos de carbono a nivel global, conteniendo más carbono que la atmósfera y la vegetación en su conjunto. En Chile, al igual que en la mayoría de los ecosistemas del mundo, hay una correlación directa entre el contenido de carbono en el suelo y las precipitaciones (Figura 5.11). Según un estudio de predicción de contenidos de carbono orgánico del suelo en Chile basado en 587 perfiles, las mayores reservas estarían en los suelos de las regiones andinas y en la zona de los fiordos en la Patagonia, aunque la escasez de datos para estas regiones hace que el nivel de incertidumbre sea muy alto<sup>67</sup> (Figura 5.12). Las turberas patagónicas constituirían una de las mayores reservas de carbono orgánico del país, con densidades promedio de 168 kg/m<sup>2</sup> de carbono orgánico y una reserva total de 7,6 gigatoneladas de carbono orgánico<sup>68</sup>.

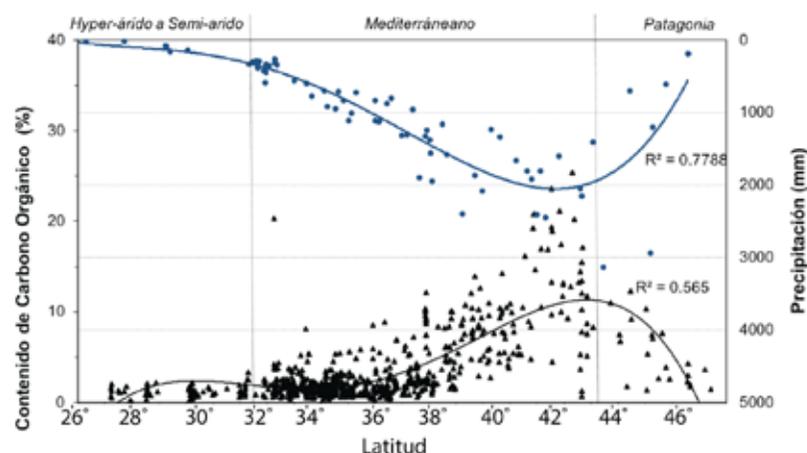


Figura 5.11. Precipitaciones medias anuales (azul) y contenido de carbono orgánico superficial de suelos (negro) en un gradiente latitudinal de Chile.

**FUENTE:** modificado de Casanova et al., 2013.

66 Oades, J. 1989.

67 Padarian et al., 2017.

68 Loisel, J. y Z. Yu. 2013.

Figura 5.12. Contenido de carbono orgánico del suelo



FUENTE: modificado de Padarian et al., 2017.

## 5.2 CAUSAS DE LA DEGRADACION DEL SUELO

La degradación de los suelos puede ocurrir en forma natural, debido principalmente a la ocurrencia de deslizamientos de tierra en sectores montañosos. Más comúnmente, la degradación ocurre debido a la deforestación, la cual se puede definir en un sentido amplio como la remoción de vegetación leñosa en un ecosistema para realizar actividades antrópicas en ellos. Este cambio ocurre principalmente para realizar actividades silvoagropecuarias, pero también ocurre por la expansión urbana o de actividades industriales. En aquellos suelos con uso silvoagropecuario, la degradación física, química o biológica puede ocurrir debido a prácticas inadecuadas u otras que causen contaminación. A continuación se revisan las principales causas y condicionantes del estado del suelo en Chile.

### 5.2.1 Uso actual de los suelos

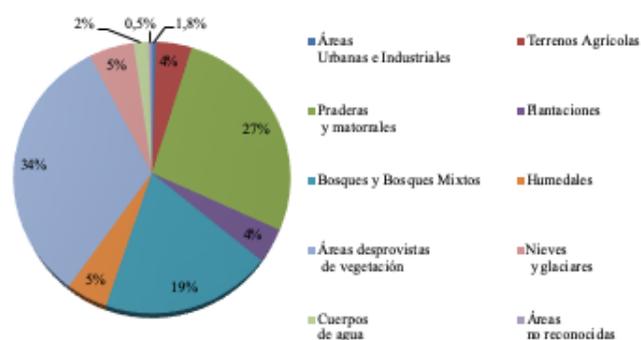
Según CONAF (2017)<sup>69</sup> un 5% de la superficie de nuestro territorio no presenta suelo, ya que son áreas cubiertas por nieves, glaciares, o cuerpos de agua (Figura 5.13). De las áreas desprovistas de vegetación (33% de la superficie), la mayor parte se encuentra en el desierto, donde los suelos generalmente no son utilizados para actividades humanas, excepto por la minería. Dentro de los humedales (5% de la superficie) se contabilizan las turberas y pantanos, los cuales han sufrido un gran impacto justamente por procesos de drenaje que se han realizado para aprovechar su suelo con fines agrícolas, para urbanización o extracción de turba. (Figura 5.13, Cuadro 5.10), el 19% de la superficie de nuestro país (14,5 millones de hectáreas) mientras que un 4% está cubierto por plantaciones forestales (3 millones de hectáreas). Las praderas y matorrales representan un 27% de la superficie (20,4 millones de hectáreas), las cuales son utilizadas principalmente para pastoreo. Los terrenos agrícolas por su parte cubren solo un 4% de la superficie de nuestro país. Finalmente, las

69 Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2017.

áreas urbanas e industriales, donde se ha perdido el suelo en forma prácticamente irreversible, llegan al 0,5% de la superficie, con aproximadamente 388.000 hectáreas, correspondiendo gran parte de esta superficie a antiguas explotaciones con suelos de excelente aptitud agrícola, los cuales son muy escasos en el país.

Junto con la información proporcionada por bases de datos como es el caso de CONAF, en el futuro nuestro país podrá hacer uso de registros anuales de cambio de la cobertura de suelos. Esto gracias a iniciativas que utilizan técnicas de modelación basadas en información de percepción remota, que por ejemplo han clasificado la cobertura de suelos existentes en nuestro país al año 2015<sup>70</sup>

Figura 5.13. Superficie de suelo por uso en el país (%)



X

FUENTE: CONAF, 2017.

Cuadro 5.10. Superficie de uso de suelo por Región (ha).

REGIÓN	Áreas Urbanas e Industriales	Terrenos Agrícolas	Praderas y Matorrales	Bosques y Bosques Mixtos	Plantaciones	Húmedales	Áreas desprovistas de vegetación	Nieves y Glaciares	Cuerpos de agua	Áreas no reconocidas	TOTAL
Arica y Parinacota	10.577	12.708	923.142	47.151	21	23.760	665.853	7.109	4.159	0	1.694.479
Tarapacá	1.198	7.864	1.035.095	7.300	26.975	18.607	3.172.395	680	0	9.382	4.279.495
Antofagasta	3.315	3.968	1.813.733	0	3.411	49.468	10.837.254	0	11.039	0	12.722.189
Atacama	1.440	45.908	3.113.892	0	0	7.304	4.438.896	0	7.667	0	7.615.107
Coquimbo	39.361	161.959	3.025.768	49.361	12.285	11.555	758.229	399	2.710	0	4.061.628
Valparaíso	58.505	174.909	514.610	484.840	68.758	9.851	229.740	52.290	5.264	0	1.598.767
Metropolitana	134.760	219.103	434.837	364.173	9.181	12.515	255.019	101.345	8.697	0	1.539.632
O'Higgins	33.704	405.304	326.242	459.855	130.536	6.628	56.407	205.389	10.371	0	1.634.436
Maule	16.183	667.538	746.444	404.233	607.594	4.190	488.877	68.499	31.715	0	3.035.273
Biobío*	41.494	715.001	516.728	914.240	1.255.890	11.151	169.493	30.137	55.170	0	3.709.304
La Araucanía	15.918	782.848	561.132	1.011.792	632.289	19.978	72.353	28.706	55.333	0	3.180.348
Los Ríos	6.899	22.802	493.459	926.397	208.775	12.246	45.156	7.627	111.603	0	1.834.965
Los Lagos	16.627	14.220	1.098.868	2.840.236	96.599	56.644	243.018	241.414	233.211	0	4.840.836
Aysén	3.119	7.546	2.781.462	4.399.828	32.017	107.806	1.391.759	1.559.701	452.819	0	10.736.056
Magallanes y de La Antártica	4.669	12	3.059.947	2.671.594	23	3.236.662	1.790.953	1.795.347	354.932	273.808	13.187.948
<b>TOTAL PAÍS</b>	<b>387.770</b>	<b>3.241.690</b>	<b>20.445.358</b>	<b>14.581.000</b>	<b>3.084.354</b>	<b>3.588.364</b>	<b>24.615.400</b>	<b>4.098.643</b>	<b>1.344.690</b>	<b>283.190</b>	<b>75.670.460</b>

FUENTE: Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2017.

### 5.3.2.1 Estructura de la tenencia de tierras

La tenencia de tierra es la relación entre las personas, ya sea un individuo o grupo, con respecto a la tierra y otros recursos naturales que ésta posee, abarcando el conjunto de normativas creadas por la sociedad para regular los derechos al uso del suelo, determinando quién puede hacer uso del recurso, durante qué tiempo y en qué circunstancias<sup>71</sup>.

Dependiendo de la forma en que se emplee la tierra se evidencian las lógicas productivas tras el uso de ésta, en ello, influyen varios factores tales como la estructura de tenencia de la tierra y sus recursos asociados, la rentabilidad social y económica del uso de los territorios, los sistemas productivos, las tecnologías empleadas, la complejidad infraestructural disponible, el nivel social y tecnológico del productor, las incertidumbres de la oferta natural y los riesgos<sup>72</sup>.

#### Distribución de la tierra por tamaño

En Chile, un estudio comparativo entre el Censo Agropecuario de 1997 y 2007, refleja el cambio en la distribución del tamaño de tierras (Cuadro 5.11). Durante el periodo de estudio disminuyó en un 9% las explotaciones con énfasis en la zona central y en los tamaños de explotación menores a 60 HRB principalmente, en las explotaciones campesinas entre 2 a 12 HRB<sup>73</sup>.

Cuadro 5.11. Evolución en la tenencia de tierras de riego y secano (1997 v/s 2007).

Tipologías	Riego %	Secano %
-2 HRB/miniexplotación	-4	-7
2-12 HRB/explotación campesina	-18	-15
12-60 HRB/mediano empresario	-4	-9
+60 HRB/empresario grande	20	3
Total	2	-2

\*HRB: hectáreas de riego básico  
**FUENTE:** Echeñique y Romero, 2009.

En este sentido, las explotaciones menores se habrían reducido tanto por ventas de tierra hacia explotaciones mayores como por la expansión urbana. Por otro lado, el número de propiedades en manos de mujeres habría aumentado en un 31%, como consecuencia de la aplicación de programas de empoderamiento de la mujer en el sector.

Según Escobar et al.<sup>74</sup>, los países de Latinoamérica y el Caribe tienen una de las estructuras de tenencia de tierra más inequitativas, así en Chile, en cuanto a la proporción de tierra en predios pequeños midiendo la distribución a partir de un índice de concentración de tierra (índice Gini), siendo 0 equidad y 1 inequidad, estaría posicionado con un índice de 0,91, reflejando la inequidad del país en la distribución de la tierra y el tamaño de sus predios.

#### Tipología de explotaciones

Por otra parte, el tipo de tenencia de tierra de un actor productivo condicionará a su vez, el sistema productivo de éste. Si bien en términos generales la tenencia de tierra se puede clasificar en privada, comunal, de libre acceso y estatal<sup>75</sup>, en Chile la clasificación empleada se indica a continuación.

71 Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2003.

72 Gligo, N. 2001.

73 Echeñique, J. y L. Romero. 2009.

74 Escobar, G. 2016.

75 Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2003.

Cuadro 5.12. Tipología de productores agrícolas.

Tipo	Nº explotaciones	Rasgos
Empresario Moderno	10.000	Ubicación prioritaria Norte Chico y Valle Central de Riego en RM de Santiago y O'Higgins. Gestión técnica de mercado y administración adecuada, alta productividad, flexibilidad en el uso de recursos, productor de rubro rentable y dinámico. Un caso especial en este grupo son los conglomerados forestales y algunos frutícolas, de ganadería menor (aves y cerdos) y leches.
Empresario Tradicional	20.000	Con mayor presencia relativa del Maule al Sur y en los secanos de las regiones centrales. Orientado básicamente a cultivos tradicionales y ganadería, con niveles tecnológicos medios altos, baja capacidad de gestión y relación de mercados, poco flexibles en sus estructuras productivas.
Pequeño Productor Integral	30.000 a 40.000	Básicamente parceleros de la Reforma Agraria, de la región mediterránea en riego, pequeño ganadero. Dedicado a rubros más rentables (hortofrutícolas, papas, remolacha, flores, etc.). Con buena inserción en el mercado (contratos de producción); nivel tecnológico medio y de gestión bajo. Relativamente flexible en sistemas productivos, con tendencia a extenderse a actividades de comercio y transporte
Pequeño Productor con Potencial	50.000 a 60.000	Principalmente agricultores rezagados, parceleros o productores de riego y secanos con potencial de recursos. Requieren inversiones adicionales y apoyo tecnológico para integrarse a rubros más rentables (riego, plantaciones, invernaderos, etc.). Con bajos ingresos, pobre tecnología y mala articulación del mercado, débil capacidad de gestión y baja productividad en cultivos tradicionales, ganadería y viticultura de cepas no final.
Pequeño Productor sin Potencial	120.000 a 140.000	Minifundistas localizados en los secanos interiores y costeros de la Regiones de Valparaíso al Biobío (35.000); en la Precordillera Andina del Maule y el Biobío (5.000), en áreas mapuches del Biobío y La Araucanía (35.000); y en la Región de Los Lagos (25.000). Desarrollan agricultura tradicional de subsistencia (cereales, leguminosas, ganadería extensiva, viticultura de cepa país) y sus ingresos son básicamente de origen extrapredial (salarios, subsidios, pequeño comercio, etc.). Se clasifican en estratos de pobreza y extrema pobreza.

FUENTE: Universidad de Chile, 2005.

### 5.2.2 Deforestación

A lo largo de su historia, los bosques de Chile han sufrido diversos cambios que han modificado su cobertura, ya sea por causas naturales o antrópicas. Tras la expansión postglacial de éstos, con el calentamiento global, y con el efecto de la actividad humana sobre ellos, como los incendios, la expansión de la agricultura, la extracción de madera y la exportación de este recurso ligado al modelo económico, estos procesos han conducido a los bosques a un estado actual de agotamiento del recurso forestal nativo<sup>76</sup>. Para más detalle ver Segunda Parte Capítulo 3 Bosques Nativos.

Estimaciones del cambio de uso de suelo de los bosques valdivianos lluviosos (35°- 43°30'S) tras la colonización europea (1550), reflejan que al arribo de los españoles esta formación cubría 11,3 millones de hectáreas, cifra que se redujo hacia 2007 a 5,8 millones de hectáreas, es decir, menos del 51% del área original<sup>77</sup>. Si se considera que los suelos ocupados por bosques templados corresponden a los biomas con menor presencia en el mundo<sup>78</sup>, y que a su vez están altamente representados en Chile constituyendo un hotspots de biodiversidad mundial<sup>79</sup>, esta reducción de su cobertura resulta muy preocupante para la conservación de estos suelos.

En relación a esto, un estudio desarrollado por Miranda et al., 2015<sup>80</sup>, evaluó el cambio en la cobertura del bosque y el uso de suelo en estos ecosistemas para distintas condiciones fisiográficas y a través de diferentes momentos históricos durante los últimos 40 años. Las unidades fisiográficas estudiadas fueron el Valle Central, la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes en la Región de la Araucanía, hallándose diferencias significativas entre los patrones de la pérdida de bosque y cambio de uso de suelo y cobertura en cada zona. De este modo, la pérdida de bosque comenzó primeramente en el Valle Central, seguido por la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes. En el Valle Central el bosque nativo actualmente cubre menos del 5% del paisaje, mientras que en la Cordillera de la Costa el cambio se acentuó a partir de 1973 con una pérdida de bosque similar a la de la Cordillera de los Andes, siendo un proceso menos intenso en esta última área. En la Región de la Araucanía, este cambio se traduce en que el suelo más accesible y con condiciones ambientales favorables es empleado progresivamente por actividades productivas, por lo que en la medida que disminuye la disponibilidad de estas áreas, estas actividades se comienzan a expandir hacia áreas fisiográficas anteriormente no utilizadas ya sea por sus condiciones ambientales o el acceso a ellas.

76 Armesto et al., 2010.

77 Lara et al., 2012.

78 Hansen et al., 2010.

79 Myers et al., 2000.

80 Miranda et al., 2015.

En cuanto a los bosques mediterráneos, ubicados en la zona central de Chile, estos ecosistemas también han sido afectados por la deforestación, lo que ha modificado tanto su cobertura como también la calidad de sus suelos. Es así como un análisis de la calidad del suelo para seis tipos de uso de la tierra<sup>81</sup> (cultivos anuales, perennes, pastoreo, espinal, espinal denso y bosque nativo) refleja que aquellos suelos cubiertos por bosques y que posteriormente son transformados por actividades antrópicas como cultivos anuales, cultivos perennes o praderas, experimentan una degradación de sus propiedades lo que se refleja a través de la menor productividad de la vegetación de estos suelos. Además, en el caso de zonas empleadas como áreas de pastoreo o cultivos, una vez abandonadas recobran gradualmente su calidad al recuperarse la vegetación anterior.

En un estudio similar, Soto et al. (2019a)<sup>82</sup>, encontraron que los suelos de bosque nativo tenían significativamente mayor materia orgánica que los suelos de plantaciones de pino o eucaliptus en profundidades mayores a 20 cm (Cuadro 5.13). La densidad del suelo de los bosques nativos resultó ser significativamente menor que los suelos de plantaciones y de sucesiones tempranas, y similar solamente a suelos con sucesiones tardías. No se encontraron diferencias entre los suelos estudiados en cuanto al agua aprovechable en el perfil de suelo.

Heylmayr et al.<sup>83</sup>, señalan que si bien las estadísticas oficiales muestran que Chile es uno de los pocos países de América Latina que ha revertido la pérdida de bosques nativos, un análisis histórico entre 1986 – 2011 refleja que entre 1986 y el 2001, las plantaciones forestales desplazaron directamente a los bosques nativos, y que entre el 2001-2011, como efecto del menor uso de madera nativa y de la prohibición de conversión de bosque nativo a plantación, se redujo la presión sobre el suelo con bosque nativo.

Cuadro 5.13. Densidad aparente (DA), humedad aprovechable (HA) y contenido de materia orgánica (MO) en distintos usos y coberturas de suelo.

	Prof. (cm)	BN	EU	P	ST	SI
DA (g cm <sup>-3</sup> )	0 - 20	0.89 ± 0.27a	1.38 ± 0.08c	1.28 ± 0.18bc	1.08 ± 0.13ab	1.25 ± 0.3bc
	20 - 40	1.16 ± 0.23a	1.52 ± 0.16b	1.50 ± 0.07b	1.32 ± 0.10a	1.50 ± 0.15b
	40 - 60	1.25 ± 0.24a	1.58 ± 0.12b	1.53 ± 0.13b	1.47 ± 0.11ab	1.52 ± 0.15b
HA (cm)	0 - 60	7.57 ± 2.43a	6.48 ± 1.95a	6.01 ± 2.30a	7.36 ± 2.59a	6.19 ± 1.53a
MO (%)	0 - 20	9.83 ± 4.21b	7.04 ± 1.47ab	5.65 ± 2.00ab	7.74 ± 2.12ab	5.21 ± 3.60a
	20 - 40	6.86 ± 4.36b	2.28 ± 1.70a	3.53 ± 1.93ab	5.05 ± 2.45ab	3.01 ± 1.62a
	40 - 60	4.71 ± 1.64b	1.77 ± 1.17a	3.04 ± 1.62ab	5.52 ± 3.84b	2.47 ± 1.19a

BN: bosque nativo, EU: eucaliptus, P: pino, ST: sucesión tardía, SI: sucesión inicial. Valores son promedios (± error estándar). Letras distintas en una misma fila representan diferencias significativas entre usos y coberturas de suelo.

**FUENTE:** Soto et al., 2019 a y b.

En relación a esto, Chile se ha convertido en un importante exportador de celulosa y astillas a nivel mundial, lo que ha producido una presión de mercado por el aumento de plantaciones de eucaliptus que año a año continúan expandiéndose. En este sentido, en la provincia de Arauco (37°S), las plantaciones de monocultivos aumentaron de 43% a 53% entre 1983-1998 el área que ocupaban, versus una disminución de la cobertura de bosques nativos. Así también, en Puerto Montt y la Isla de Chiloé los humedales y páramos son áreas sensibles de ser ocupadas por plantaciones forestales.

En tierras cuyos suelos evidencian mal drenaje y que se encuentran degradadas y quemadas, donde antiguamente crecía *Pilgerodendron uviferum* y *Nothofagus antarctica*, también se han expandido las plantaciones de eucaliptus. En Quillota (33°S), el aumento de la cobertura de cultivos de palta ha ido entre 1983-2001 desde un 32 a 42% en el área cultivada entre dicho periodo, parte importante de esta expansión se realiza sustituyendo bosque esclerófilo en suelos de ladera no aptos para la agricultura, quedando desnudos y vulnerables a la erosión.

En conclusión, desde la llegada de los españoles la deforestación del bosque chileno se debió esencialmente a la actividad antrópica, asociada a determinados factores culturales, económicos y políticos de cada época por lo cual, revertir esta situación y planificar un uso sustentable de los suelos donde crecen los bosques, aunando tanto intereses de conservación como productivos, es un desafío y una labor política necesaria.

81 Hernández et al., 2016.

82 Soto et al., 2019a.

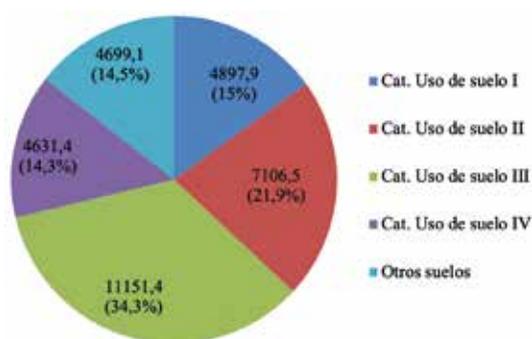
83 Heilmayr et al., 2016.

### 5.2.3 Expansión urbana

Un estudio realizado por Soto et al., (2019b) en ocho ciudades de Chile ubicadas en zonas agrícolas, muestra que de las 32.486 hectáreas que se han perdido en total en las últimas tres décadas, un 85,5% ha sido de suelos clasificados como cultivables (categorías de uso I a IV); siendo un 37% correspondientes a los suelos de categorías I y II (Figura 5.14). Esto demuestra que la expansión urbana no considera en su planificación el valor de los suelos desde el punto de vista de su uso agrícola.

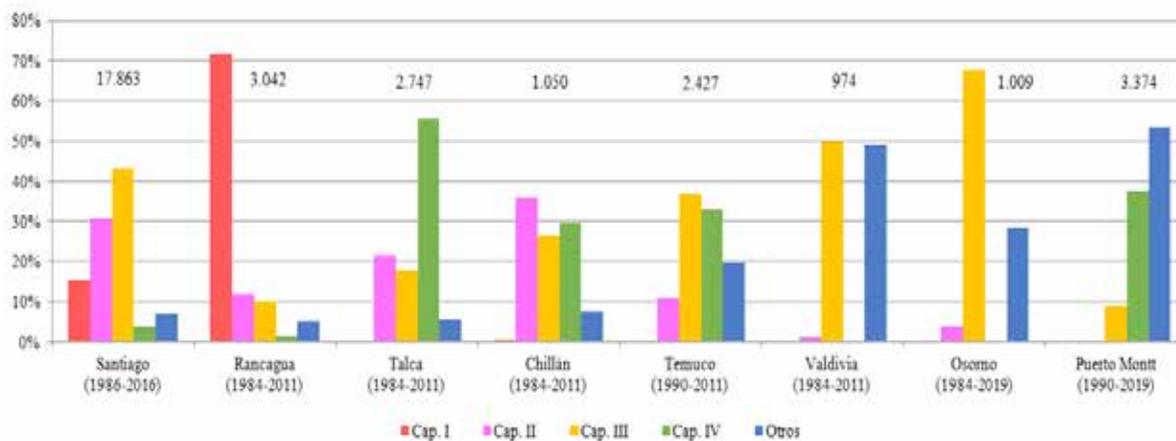
El análisis por ciudad (Figura 5.15) muestra que el caso más crítico en cuanto a proporción ocurre en la expansión de la ciudad de Rancagua, donde los suelos perdidos por expansión urbana son en su mayoría de clase de capacidad de uso I, es decir los mejores suelos del país. Sin embargo, en términos absolutos la mayor cantidad de suelos de categoría I se han perdido por la expansión de Santiago (2.680 ha) entre el año 1986 y 2016<sup>92</sup>. Ver Segunda Parte Capítulo 8 Asentamientos Humanos.

Figura 5.14. Suelos perdidos por expansión urbana en ocho ciudades (ha)



FUENTE: Soto et al., 2019b.

Figura 5.15. Suelos perdidos en cada ciudad, según categoría de uso. (En la parte superior, hectáreas perdidas en el periodo)



FUENTE: Soto et al., 2019b.

### 5.2.4 Prácticas silvoagropecuarias perjudiciales

FAO (2015) reconoce que existen 10 consecuencias de manejo inadecuado a nivel mundial en los suelos con uso silvoagropecuario; todos los cuales tienen ocurrencia en Chile:

- **Erosión del suelo:** pérdida de la superficie del suelo por el agua, el viento o la labranza.
- **Compactación:** aumento de la densidad y disminución de la macroporosidad del suelo debido a la presión sobre la superficie de los suelos
- **Acidificación:** disminución del pH del suelo.

- **Contaminación:** presencia de elementos contaminantes debido al uso de productos químicos o materiales al suelo que tienen un efecto adverso en los organismos y funciones.
- **Sellado:** cobertura permanente de una superficie del suelo debido a la presencia de materiales exógenos artificiales.
- **Salinización:** es la acumulación de sales inducida por el hombre, debido a prácticas de riego inadecuadas o drenaje insuficiente.
- **Anegamiento:** saturación de suelo por exceso de agua, lo que genera una reducción del oxígeno en el espacio poroso del suelo, el cual es necesario para el crecimiento de las plantas y organismos aeróbicos del suelo.
- **Desequilibrio de nutrientes:** desbalance en el contenido de nutrientes producido por aportes deficientes o excesivos, afectando el desarrollo normal de cultivos y sus rendimientos esperados.
- **Pérdidas de carbono orgánico:** reducción del contenido de carbono en los suelos debido a la remoción de la vegetación natural asociada a estos.
- **Pérdida de la biodiversidad:** disminución de la diversidad y funcionalidad de la biota del suelo.

Estas amenazas se relacionan principalmente con prácticas silvoagropecuarias inadecuadas tales como cultivo en laderas, sobrepastoreo, uso excesivo de agroquímicos, laboreo excesivo, y prácticas de riego inadecuadas, y pueden ocurrir por separado o en conjunto, ocasionando uno o más de estos efectos negativos en los suelos.

#### 5.2.4.1 *Cultivo en laderas*

La expansión de los cultivos en ladera, considerados hasta hace poco como terrenos marginales para la agricultura, han incrementado considerablemente el riesgo de erosión y la consecuentes pérdidas de carbono orgánico y biodiversidad en estas áreas. Este tipo de expansiones agrícolas sobre áreas antiguamente cubiertas por bosque o matorral ha sido significativo en la zona semi-árida, principalmente con cultivos como uva de mesa, paltos y cítricos, mientras que en la zona mediterránea esta expansión se ha debido principalmente a la expansión de viñedos. Estos cultivos tienen un alto impacto al establecerse en camellones en el sentido de la pendiente, aumentando exponencialmente el riesgo de erosión, además de sustituirse una cobertura vegetal esencial para la infiltración y la recarga de los acuíferos. La necesidad de una legislación que limite este tipo de prácticas es urgente.

#### 5.2.4.2 *Sobrepastoreo*

La capacidad de carga animal de un pastizal depende de la productividad anual de biomasa y del valor nutricional de las especies que componen lo componen. El sobrepastoreo ocurre cuando la carga animal supera la capacidad de carga ganadera de un pastizal, o bien por problemas de distribución de los animales, generando sobreconsumo de las plantas y compactación de suelo. Cuando esto ocurre se impide la resiembra natural de los pastos y una brotación vigorosa en la temporada siguiente, lo cual deja al suelo descubierto de vegetación y por ende expuesto a la erosión.

Pérez Quezada y Bown (2015) midieron características de los suelos en un gradiente de degradación por pastoreo en cuatro pisos vegetacionales en Cajón del río Maipo y del río Mapocho. Encontraron que los sectores más cercanos a los corrales de los animales presentaban en promedio un 59% menos carbono en el suelo superficial, en comparación con sectores alejados de los corrales. Asociado a la pérdida de cobertura vegetal y de carbono orgánico, el riesgo de erosión aumenta en suelos afectados por sobrepastoreo. Por otra parte, un estudio sobre la ganadería magallánica y sus implicancias para la tierra en la Región de Magallanes y la Antártida Chilena, reveló la fuerte erosión que han sufrido los las estepas de esta zona, lo que ha repercutido en su capacidad productiva generando que durante los últimos 30 años, dicho territorio haya perdido la capacidad de sostener casi 1 millón de unidades bovinas.

#### 5.2.4.3 *Uso excesivo de agroquímicos*

Los agroquímicos utilizados en sistemas silvoagropecuarios son básicamente los fertilizantes, pesticidas y herbicidas que se aplican con el fin de obtener un mayor rendimiento y productos libres de plagas y enfermedades. Su uso racional implica la aplicación oportuna y en dosis adecuadas.

En el caso de los fertilizantes, una buena práctica significa aplicar la cantidad de nitrógeno, fósforo u otro elemento que el cultivo necesite y en un momento que la planta lo pueda absorber. Si la fertilización no se realiza de este modo, estos elementos pueden llegar a los cursos de agua superficiales o bien a la napa de agua subterránea. Así lo muestra el estudio de Corradini et al. , quienes observaron niveles elevados de nitrato y fosfato en canales de drenaje en invierno, cercanos a sistemas de cultivos de maíz-barbecho. Afortunadamente este efecto puede ser prevenido en parte con el uso de franjas de vegetación de amortiguamiento, las cuales se ha demostrado que en el mismo sistema de cultivo puede remover en promedio un 52% del nitrato, que de otra manera llegaría a los cursos de agua.

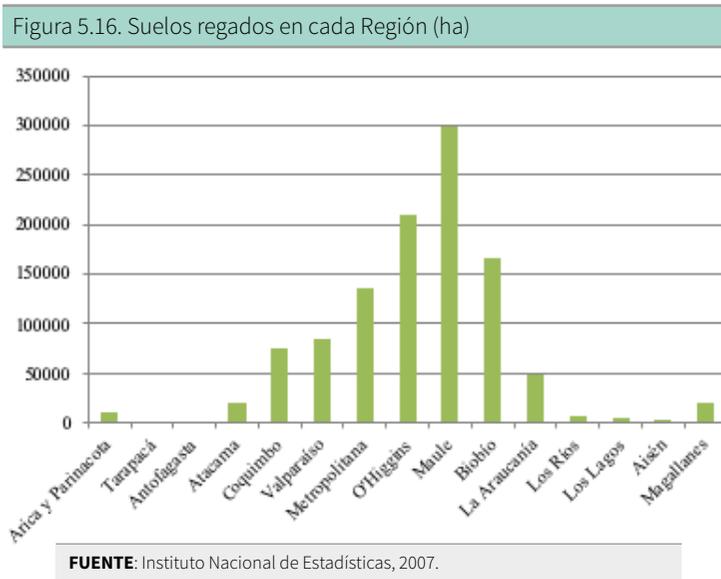
### 5.2.4.3 Laboreo excesivo

Si bien, el laboreo del suelo es una actividad necesaria en los suelos para favorecer el crecimiento y desarrollo de los cultivos, el desarrollo de esta actividad de manera excesiva puede afectar la calidad del suelo. En este sentido, Martínez et al. (2008) evaluó el efecto de tratamientos convencionales de labranza tradicional y labranza cero sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento y crecimiento de raíces de trigo, en un suelo Mollisol de Chile Central. Sus resultados reflejan como los tratamientos de labranza cero tienen su mayor influencia sobre las propiedades físicas del suelo en los primeros 5 cm, mejorando características como la estabilidad de agregados y la densidad de longitud de la raíz, pero teniendo un menor desempeño frente a tratamientos convencionales en cuanto a la tasa de infiltración de agua, por lo que habría que aplicar actividades compensatorias. Así, Brunel-Saldías et al. (2016) efectuando comparaciones para cultivos de trigo y avena, en suelos con labranza cero, mínima labranza y tratamientos convencionales, demostró que la compactación de un suelo puede ser mejorada por un sistema de mínima labranza, promoviendo una mejora en el sistema de raíces en los primeros horizontes del suelo compactado.

### 5.2.4.4 Prácticas de riego inadecuadas

Las prácticas de riego varían en Chile según el área geográfica, siendo predominantemente sistemas tecnificados en la zona norte y gravitacional en la zona central. En la zona centro sur se realiza principalmente riego tecnificado en frutales. Según Donoso et al. (1999), estas prácticas de riego han generado la salinización de suelo y agua subterránea en la zona norte, contaminación difusa en la zona central y eutroficación en la zona centro-sur. Este mismo estudio además modeló la posible pérdida de suelo en una lechería en la zona central, obteniendo valores entre 5,0 y 16,7 ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

En la Figura 5.16 se muestra la superficie regada por región en Chile, donde es posible evidenciar que la Región del Maule es la que más invierte en mantener terrenos agrícolas mediante regadío, seguido por O'Higgins y La Araucanía.



### 5.2.5 Contaminación de suelos

La contaminación de los suelos se produce por el ingreso de compuestos que alteran su composición química, lo que produce como consecuencia además una degradación de sus propiedades biológicas. Las fuentes de contaminación pueden ser de origen natural o antropogénico. Dentro de las seis causas principales de contaminación de origen antropogénico se puede señalar: las actividades industriales, la minería, las actividades desarrolladas en las urbes y zonas de transporte, los residuos urbanos, y las actividades agropecuarias. La minería es una importante fuente de contaminantes, y dada su relevancia en Chile desde la colonia, su impacto en el ambiente, incluida la contaminación de suelos es considerable. El efecto de la minería sobre los suelos en el país ha sido constatado por los numerosos estudios que revelan el alto grado de contaminación por metales pesados en las zonas cercanas a relaves y fundiciones. Dentro de las zonas con suelos más contaminados por la industria minera se destacan los valles de los ríos, Loa, Copiapó, Elqui, Aconcagua y Cachapoal. El número de contaminantes emitidos por las actividades mineras es vasto e involucra casi toda la gama de contaminantes que se pueden encontrar en el suelo. En Chile, el caso más emblemático se encuentra en la contaminación por metales pesados de los suelos de las localidades cercanas al complejo industrial de Ventanas, que agrupa una serie de industrias

contaminantes, las que emiten tóxicos a la atmósfera que precipitan y se han ido acumulando en los suelos de la zona desde la apertura en 1964. Las actividades urbanas generan una gran cantidad de desechos, los que se acumulan en los suelos urbanos y periurbanos ya sea por contaminación directa, arrastre de sedimentos en aguas de riego o escorrentía o por precipitación atmosférica. En Chile se han descrito casos de contaminación de suelos urbanos y periurbanos en las localidades de Arica, Calama, Puchuncaví, Santiago, Talca, Talcahuano, Chillán y Puerto Montt entre otras. Dentro de estas se puede destacar la presencia de metales pesados, contaminantes orgánicos y otros derivados del petróleo producto de las actividades industriales, el uso de productos domiciliarios, transporte, hospitalarios, de jardinería y de construcción.

Debido a la persistencia de algunos contaminantes, su presencia puede ser importante incluso décadas después de haberse eliminado la fuente contaminante como lo es el caso del plomo contenido en las pinturas y combustibles antes de la década de 1990 o el riego con aguas servidas las que se tratan en un 100% desde 2013 pero cuyos residuos tóxicos permanecerán por largo tiempo en los suelos. Aunque no existen estudios directos en el país, es de esperarse que los suelos aledaños a carreteras y vías férreas cuenten con altos niveles de contaminación producto de la combustión, derrames y actividades que se desarrollan asociados a las vías de transporte. Dentro de las actividades que más impacto producen en el suelo, tanto por su intensidad como por el área que cubren están las actividades agrícolas, producto del uso de agroquímicos, combustibles y el riego con aguas contaminadas. El uso indiscriminado de agroquímicos, que contienen contaminantes orgánicos de larga persistencia y además pueden entrar a las cadenas tróficas, ha sido poco estudiado en el país, sin embargo es de esperarse que la mayoría de los suelos con agricultura intensiva presenten algún tipo de contaminante. Un problema adicional lo presentan los fertilizantes fosfatados, los que se utilizan en grandes cantidades en los suelos agrícolas de origen volcánico desde la región del Biobío al sur, ya que estos contienen acompañados elementos traza contaminantes, los que si bien se encuentran en pequeñas cantidades, se acumulan en el suelo y pueden generar problemas de contaminación al largo plazo. Los principales casos de contaminación natural en Chile se dan en el norte grande y corresponden a la presencia de aguas con altos contenidos de arsénico (producto de la actividad volcánica) y boro (que se encuentra naturalmente en los salares), los que se acumula en los suelos luego de utilizarse para el riego. Adicionalmente está la presencia de percloratos en suelos de caliche de la zona hiperárida, los que si bien no son cultivados constituyen una fuente de perclorato al ser utilizado el caliche como una fuente de fertilizante nitrogenado.

### 5.2.6 Incendios

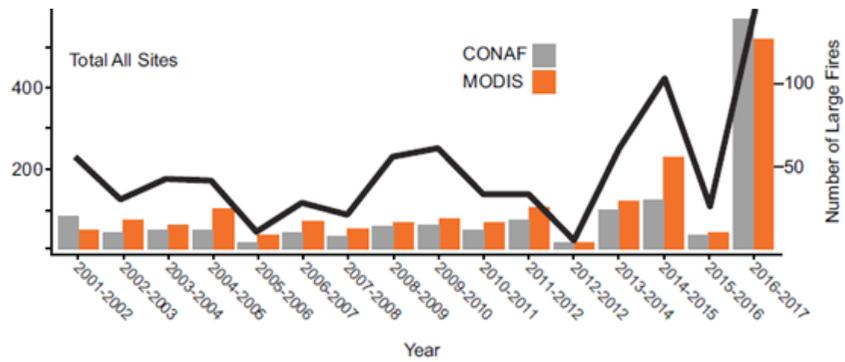
Según CONAF, en Chile cerca del 100% de los incendios tienen su origen en actividades humanas, los cuales se asocian estrechamente con las actividades silvoagropecuarias, el aumento de la población, el aumento de la conectividad terrenos urbanos-rurales, y mayor presencia de población en terreros rurales durante el periodo estival. Para más detalle ver: Segunda Parte Capítulo 3 Bosques Nativos.

Actualmente el origen de los incendios forestales está relacionado principalmente según la región del país, a:

- Zona central (Coquimbo a Región Metropolitana): en primer lugar, incendios intencionales causados principalmente por niños y adolescentes; en segundo lugar, paseantes descuidados y, en menor incidencia, quemados de residuos agrícolas.
- Zona centro sur (O'Higgins a Los Lagos): primero, intencionalidad; en segundo lugar, quemados de residuos agrícolas y forestales; y en tercer lugar, manejo de veranadas y, en menor incidencia, paseantes.
- Zona sur (Aysén y Magallanes): actividades relacionadas con quemados para limpieza de terrenos para la agricultura y ganadería y, en menor incidencia, paseantes.

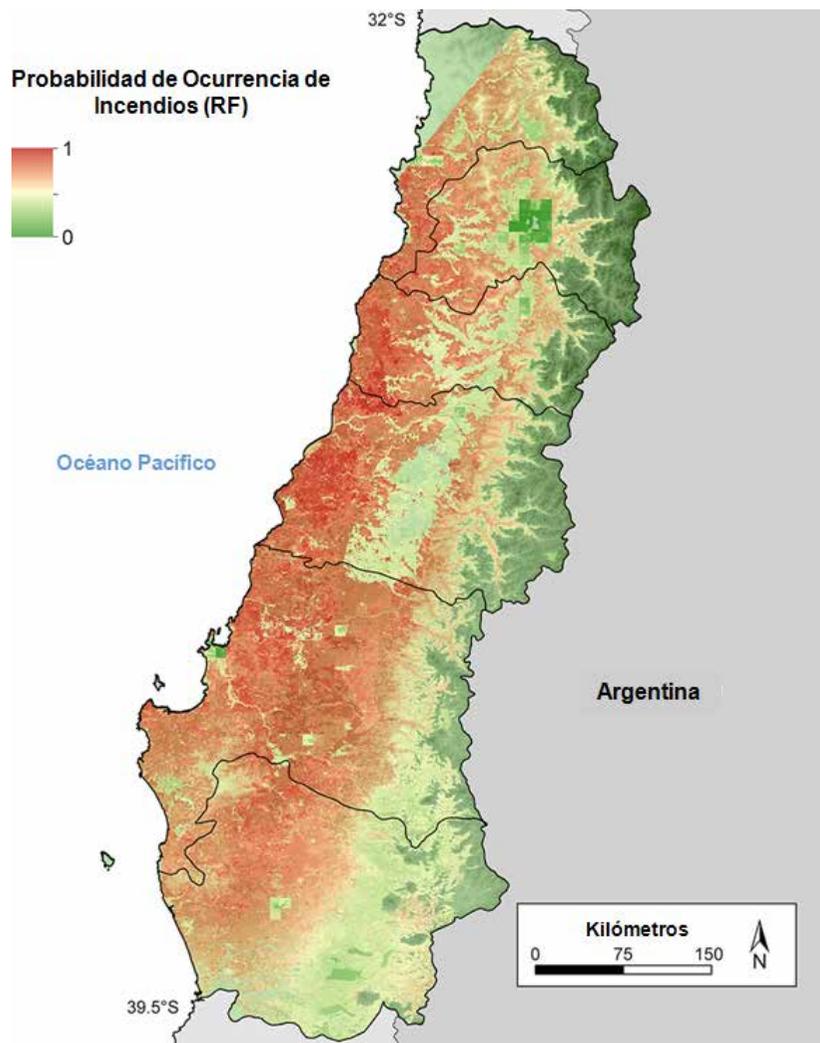
La Figura 5.17 muestra que la superficie total quemada por año se mantuvo relativamente estable entre los años 2001 y 2012. Sin embargo, a partir de ese año se observa un aumento tanto de la superficie quemada como del número de grandes incendios, alcanzó el máximo en la temporada 2016-2017, cuando se registraron alrededor de 500.000 hectáreas quemadas y cerca de 150 grandes incendios (> 200 ha). La distribución de estos incendios no es homogénea, lo que genera una desigual distribución espacial de la probabilidad de incendios (Figura 5.18).

Figura 5.17. Área total quemada por año (ha x 1000) en Chile en el periodo 2001-2017 (CONAF y MODIS). Cantidad de incendios (>200 ha) por año (CONAF) (línea)



FUENTE: McWethy et al., 2018.

Figura 5.18. Distribución de la probabilidad de incendios.



FUENTE: McWethy et al., 2018.

### 5.2.7 Pérdida y degradación por deslizamiento, vulcanismo y dunas

Las causas naturales de degradación de suelos pueden ser varias, dentro de estos deslizamientos, erupciones volcánicas y avance de dunas. Por la particular topografía, Chile es un país susceptible a deslizamientos en todo su territorio, el Cuadro 5.14 muestra los deslizamientos registrados en Chile entre 1910 al 2005. Si bien, la cantidad de deslizamientos producidos en el país es considerable, gran cantidad de estos ocurre sobre roca y no suelo, no existiendo una estadística sobre la cantidad de deslizamientos que afecten material suelo. Sin embargo, en base a la literatura existente, se puede estimar que gran parte de los deslizamientos que afectan al suelo se producen en las regiones cubiertas por suelos volcánicos, desde Biobío al sur<sup>84</sup>.

Cuadro 5.14. Deslizamientos, por Región.		
Región*	Total	Porcentaje
Tarapacá	50	4,0
Antofagasta	58	4,6
Atacama	27	2,1
Coquimbo	99	7,8
Valparaíso	315	25,0
Metropolitana	128	10,1
O`Higgins	63	5,0
Maule	70	5,5
Biobío	193	15,3
Araucanía	59	4,7
Los Lagos	157	12,4
Aisén	28	2,2
Magallanes	15	1,2
<b>TOTAL</b>	<b>1.262</b>	<b>100</b>

En la I y X regiones se incluyen los datos pertenecientes a la XV y XIV respectivamente  
**FUENTE:** Espinoza et al., 1985 y INE, 1999, 2000, 2001, 2002 y 2005.

Chile contiene más de 60 volcanes activos por lo que las erupciones volcánicas son frecuentes en el país. El mayor problema para los suelos generado por las erupciones volcánicas es la caída de cenizas, las cuales logran afectar grandes áreas durante erupciones de mayor magnitud. Estudios señalan que los suelos afectados por caídas de cenizas se recuperan en pocos años cuando el espesor no supera los 15 cm, y que luego de una década se recuperan aquellas zonas con depósitos de ceniza menores a 50 cm<sup>85 86 87</sup>.

Por último, el avance de las dunas también constituye una causa natural de degradación de suelos, al producirse el enterramiento de éste bajo una capa de arena infértil sobre la cual la vegetación se establece con dificultad. De acuerdo a un estudio de CONAF de 1974<sup>88</sup>, la superficie de suelos cubiertos por dunas en Chile era de 131.008 ha.

### 5.2.8 Causas de erosión y geografía

Según Peralta, (1994)<sup>89</sup>, los factores más relevantes que ocasionan erosión de los suelos son las condiciones climáticas, el relieve, características del suelo y de su material de origen y los usos de este. En el Cuadro 5.15 se indican los factores y causas más comunes de la degradación de suelo por zona geográfica en Chile.

84 Schuster et al., 2002.

85 Besoain et al., 1995.

86 Wilson et al., 2011a.

87 Wilson et al., 2011b.

88 Gormaz, M., 1974.

89 Peralta, M. 1994.

Cuadro 5.15. Tipos y causas de la erosión por zona geográfica

Zona	Tipo de Erosión	Factores y causas
Norte Grande y Chico: Tarapacá a Atacama; Cordones y estribaciones Andinas de la región de Coquimbo	Eólica Hídrica Geológica	Sobrepastoreo Aumento de la población Dificultades económicas
Cordillera de la Costa y Planicies de la Región De Coquimbo Cordillera de la Costa y Planicies de las Regio- nes de Valparaíso al Biobío	Hídrica Eólica Dunas litorales Hídrica Eólica (costa) Dunas litorales	Tala de material semidesértico Sobreutilización de praderas Cultivo en suelos no arables Tala de bosque esclerófilo Actividades forestales Incendios y quemas Sobrepastoreo Cultivos en suelos no arables Barbechos, siembras en pendiente Dificultades económicas
Cordillera de la Costa y Planicies de la Araucanía y Los Lagos	Hídrica Eólica (costa)	Explotación indiscriminada de bosque nativo Habilitación de suelos de aptitud forestal para agricultura y ganadería (tala rasa, quemas)
Precordillera andina de las regiones de Valparaí- so y Santiago	Hídrica	Tala del matorral y del bosque esclerófilo andi- no para uso como leña y carbón. Incendios y quemas
Precordillera andina de las regiones del Libertador B. O` Higgins a Los Lagos	Hídrica Eólica	Tala de bosques mesofíticos e hidrofíticos Quema de rastrojos Cultivos anuales en suelos no arables Barbechos descubiertos Labranzas y siembras en el sentido de la pen- diente
Cerros y lomajes del Llano Central, Regiones de Valparaíso a Los Lagos	Hídrica	Tala de bosques esclerófilos y mesofíticos, para uso como leña y carbón. Quema de rastrojos y matorrales. Barbechos descubiertos. Labranza y siembra en el sentido de la pendien- te. Cultivo de cereales en suelos no arables.
Patagonia	Hídrica Eólica	Sobreutilización de las praderas. Explotación indiscriminada del bosque nativo. Habilitación de suelos de aptitud forestal para uso ganadero. Talas y quemas.

FUENTE: Peralta, 1994.

### 5.3 GESTIÓN AMBIENTAL DEL SUELO

La normativa existente con respecto al recurso suelo se encuentra ampliamente dispersa en diferentes cuerpos legales siendo a veces las indicaciones contradictorias entre sí. Entre estas normativas se puede mencionar la Constitución Política de la República con su Art.19, N° 8, reconociendo el derecho de las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, hasta diversas leyes y reglamentos como el Código de Minería, el Código de Aguas, la Ley de Concesiones Mineras, la Ley General de Urbanismo y Construcción o la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, así como convenios internacionales tales como la Convención RAMSAR, relativa a la protección de humedales, o la Convención de Las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación<sup>90</sup>.

En términos generales, la legislación en Chile referente al suelo se encuentra caracterizada por cuatro aspectos:

- La importancia del derecho de propiedad, el cual está garantizado por ley, y permite que el propietario del suelo esté facultado para emplearlo como estime conveniente, siempre en conformidad con la legislación y sin afectar los derechos de otros.
- El resguardo frente a la contaminación del suelo, pudiendo cualquier persona en caso de ver afectado su derecho a vivir en un lugar libre de contaminación, presentar un recurso de protección para que se restablezcan sus derechos y se proteja al afectado.
- La conservación de los suelos supeditada a la minería, ya que el propietario de un predio superficial debe respetar la servidumbre minera que la ley establece a favor de dicha actividad.

- La urbanización del suelo, regulando el crecimiento de las ciudades sobre zonas agrícolas mediante la planificación de la urbanización y la fijación de límites urbanos.

Uno de los principales aspectos que amenazan la sustentabilidad del recurso suelo, así como otros componentes del territorio, es la falta de una planificación territorial contundente y segura de las zonas rurales, que permita resguardar el patrimonio y los atributos naturales, sin frenar el desarrollo del país. Si bien se han desarrollado planes Regionales de Ordenamiento Territorial, estos son indicativos y no normativos, lo que en la práctica lleva a una casi nula aplicación de las políticas, estrategias y planes contenidos en ellos.

A continuación se expone brevemente algunas de las principales leyes que tienen relación con el uso y manejo del recurso suelo, mencionando su objetivo y su rango de acción.

### 5.3.1 Principales leyes que regulan el uso del suelo

#### 5.3.1.1 Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras

La Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras<sup>91</sup> indica que toda persona tiene la capacidad de cavar y prospectar en tierras de cualquier propietario con el fin de buscar sustancias minerales, sin perjuicio de tener que indemnizar al dueño del suelo superficial y en concordancia con lo que indica el Código de Minería.

Esta facultad puede ejercerse en todo terreno abierto, mientras que en terrenos restringidos con un propietario es preciso contar con la autorización del dueño, que en caso de ser denegada puede ser solicitada ante un juez. En terrenos que son propiedad del Estado, el permiso ha de solicitarse a la autoridad estatal correspondiente. La excepción a la ley la constituyen aquellos terrenos plantados con frutales o vides, donde sólo su propietario podrá ser quien otorga el permiso para hacer efectiva la concesión.

Además, el código minero considera como mineral a la turba, que corresponden a suelos formados a partir de la acumulación de materia orgánica, lo que da prioridad de la extracción de turba por sobre la conservación. Estos ecosistemas son extremadamente frágiles y la aplicación del código minero por sobre estos requiere de una urgente revisión.

#### 5.3.1.2 Ley General de Urbanismo y Construcción

La Ley General de Urbanismo y Construcción<sup>92</sup> es la encargada de regular los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), los cuales a su vez contienen las directrices para el uso del territorio ya sea tanto en lo urbano como en lo rural, y el aprovechamiento y restricciones que regirán sobre estos espacios. Las disposiciones de esta Ley actúan a través de tres niveles de jerarquía:

- Ley General: documento principal que define los principios, atribuciones, autoridades, facultades, responsabilidades, derechos, sanciones y regulaciones sobre las instituciones, sus funcionarios y asociados.
- Ordenanza General: reglamento de la ley anterior definiendo procesos administrativos y los estándares técnicos de las construcciones en el país.
- Normas Técnicas: características técnica de los proyectos, materiales y sistemas de construcción y urbanización acorde a la Ordenanza y su Ley General.

Así mismo, la planificación urbana posee tres niveles de acción relacionados con los tipos de áreas donde tienen aplicación: a nivel nacional, intercomunal y comunal. En cuanto a la planificación urbana nacional, ésta estará a cargo del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. La planificación urbana intercomunal, por su parte, regulará el desarrollo físico de las áreas urbanas y rurales de varias comunas que se integran en una misma unidad urbana. Finalmente, la planificación comunal es aquella que propiciará el desarrollo económico del territorio comunal, con énfasis en los poblados y en correspondencia con los objetivos regionales de desarrollo económico-social.

Este último tipo de planificación, el cual actúa a nivel local, se traduce en un documento que contiene las disposiciones sobre el uso del suelo en el territorio, denominado Plan Regulador Comunal. Dicho instrumento está constituido por un conjunto de normas sobre condiciones de higiene y seguridad en las construcciones y zonas urbanas, y de comodidad acorde con las zonas habitacionales, de trabajo, equipamiento y esparcimiento. Además, contiene disposiciones sobre el uso de suelo, ubicación de equipamientos, estructura vial, estacionamiento, límites urbanos, densidades e indicaciones para la expansión urbana entre otros aspectos.

91 Ministerio de Agricultura (MINAGRI). 1982.

92 Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). 2019.

### Sobre los límites urbanos y el uso de suelo urbano

La Ley General de Urbanismo y Construcción a su vez fija los límites urbanos de cada comuna y las restricciones de construcción fuera de estos. Tras el límite urbano, está prohibida la habilitación de caminos, construcción de infraestructura o conformación de poblados, exceptuando las construcciones necesarias para la explotación agrícola de los predios o con fines habitacionales por parte de sus propietarios y sus trabajadores. También se exceptúan a la norma, las viviendas sociales o aquellas con un valor de hasta 1.000 UF que cumplan con los requisitos para ser subsidiadas por el Estado<sup>93</sup>.

En cuanto al uso del suelo en las áreas urbanas, esto estará dictaminado por los Planes Reguladores de cada zona y las obras que se construyan se realizarán en concordancia con lo que regulen dichos planes. El Plan Regulador se encargará de indicar limitaciones para cada tipo de suelo en función de sus características ya sea tipo de suelo o ubicación, imponiendo diferentes restricciones a la construcción dependiendo del caso. Además se encargará de definir qué zonas son de conservación histórica, lo cual significará, que para la demolición o remodelación de estos inmuebles será necesario la autorización por parte de la Secretaría Regional de Vivienda y Urbanismo correspondiente. En el caso de que se requiera un cambio de uso de suelo este deberá tramitarse como un cambio al Plan Regulador vigente, sobre el área que se quiere solicitar el cambio de uso de suelo.

Si bien esta ley menciona el recurso suelo, considera a este solo como un soporte para las edificaciones e infraestructura y no como un recurso integral que cumple otras funciones. En este sentido, la expansión urbana se realiza solo en base a las “necesidades de la ciudad” son considerar la pérdida que significa para el mundo rural el avance de las ciudades.

#### 5.3.1.3 Ley Orgánica del Servicio Agrícola y Ganadero

La Ley Orgánica del Servicio Agrícola y Ganadero<sup>94</sup>, en complemento con la Ley General de Urbanismo y Construcciones, define las funciones del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) en Chile como principal ente encargado de supervisar el uso del suelo en zonas rurales.

En este sentido, su principal atribución referente a la planificación en el uso del suelo es la responsabilidad de supervisar el cambio de su uso en sectores rurales, debiendo emitir un informe fundado y público cada vez que se solicita este cambio. Así también para la subdivisión de predios rústicos, será este organismo el encargado de certificar que se cumple la normativa vigente (ver sección 5.4.1.5).

Otras de las funciones del Servicio Agrícola Ganadero en relación a los suelos, es realizar estudios y estadísticas respecto al recurso con la finalidad de conocer su estado en el ámbito agropecuario y definir normas técnicas a nivel nacional. A su vez, recopilar y clasificar la información que se genere acompañando esto con procesos de divulgación y capacitación, y coordinándose con las otras instituciones del Estado relacionadas al tema y de similar naturaleza. Además, tiene como función el desarrollo de medidas dirigidas a la conservación de los suelos y aguas, tanto para mejorar sus condiciones de fertilidad y drenaje como para evitar su erosión. En el caso del agua, se enfoca en mejorar su manejo con finalidades agropecuarias,

Finalmente, la función que más incide sobre la conservación del recurso suelo y agua, es la potestad del Servicio de promover medidas que mejoren la capacidad productiva de los suelos y reduzcan el riesgo de su erosión, así mismo en el caso del agua, en cuanto a propiciar un manejo sustentable con la finalidad de ser utilizada en la industria agropecuaria. Para esto, el organismo puede otorgar incentivos que regula y administra, con la finalidad de introducir prácticas de conservación en el uso del agua, el suelo y su vegetación.

#### 5.3.1.4 D.L. N° 701

El D.L. N° 701<sup>95</sup> fue creado en 1974, y aunque no se encuentra vigente en la actualidad, es una de las legislaciones más controversiales respecto al cambio de uso del suelo en el país. Si bien en sus inicios fue creado con la finalidad de incentivar el desarrollo forestal y proteger los suelos expuestos, fue determinante en la transición del mercado forestal en el país hacia un modelo expansivo y de rápido crecimiento, que en la actualidad, compite por espacio con la vegetación nativa<sup>96</sup>, constituyendo sobre todo durante el primer periodo de su implementación entre 1986 y el 2001, en la Región del Maule, como una de las principales causas que afectaron al bosque nativo de la zona por sustitución<sup>97</sup>.

El D.L. N° 701, junto con sus modificaciones, tuvo la finalidad de regular la actividad forestal sobre suelos degradados y de aptitud preferentemente forestal, incentivando la forestación con la finalidad de promover su protección y recuperación, y reducir su degradación. Entre las bonificaciones que contempla la ley se encuentran:

93 Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). 2019.

94 Ministerio de Agricultura (MINAGRI). 2014.

95 Ministerio de Agricultura. 1974.

96 Armesto et al., 2010.

97 Heilmayr et al., 2016.

- Bonificación para la forestación o estabilización en dunas en suelos de aptitud forestal.
- Bonificación y beneficios tributarios para administrar y manejar los bosques en suelos de aptitud forestal.
- Bonificación para pequeños propietarios para actividades de forestación y manejo en bosques plantados de aptitud forestal.

A partir de la promulgación de este decreto, entre 1980-1997 se forestaron alrededor de 822.000 hectáreas, concentradas en la región del Maule y Los Lagos, siendo el total de plantaciones bonificadas por el estado hacia 1997, 94,2% correspondientes a grandes propietarios y 5,8% a pequeños propietarios.

Esta política ha tenido efectos positivos y negativos. Por una parte, fue clave en la reducción de la erosión de suelos expuestos<sup>98</sup>, no obstante que también se han reportado impactos como la compactación, remoción, erosión y agotamiento de nutrientes de este componente, asociado a su vez, a la alteración del ciclo hidrológico y sus diversas fases<sup>99</sup>. Por otra parte, la ley ha incidido en forma significativa en la sustitución del bosque nativo.

#### 5.3.1.5 Decreto Ley N° 3516

Establece normas sobre subdivisión de predios rurales. Ofrece plena libertad para dividir los predios rústicos de aptitud agrícola, ganadera o forestal, manteniéndose el destino del predio original. Históricamente la subdivisión de predios destinados a la agricultura había sido objeto de normas restrictivas fundadas en la necesidad de preservar un recurso natural valioso y escaso como es el suelo, por lo que la legislación vigente hasta 1980 buscaba precisamente evitar la proliferación del minifundio improductivo.

Hoy en día, con la modificación realizada en 1980, el DL3516 es utilizado con la finalidad de crear parcelas de agrado, que han llevado a dejar improductivas miles de hectáreas, además de presentar una urbanización encubierta generando transformaciones no planificadas en el espacio rural, eludiendo las exigencias de la Ley General de Urbanismo y construcción. Esto ha generado una serie de núcleos semiurbanos al margen de toda planificación, con todos los problemas en cuanto a abastecimiento de servicios que esto conlleva, lo que se suma a la pérdida para siempre de una serie de servicios ecosistémicos de valiosos suelos.

#### 5.3.1.6 Distrito de Conservación de suelos, bosques y agua

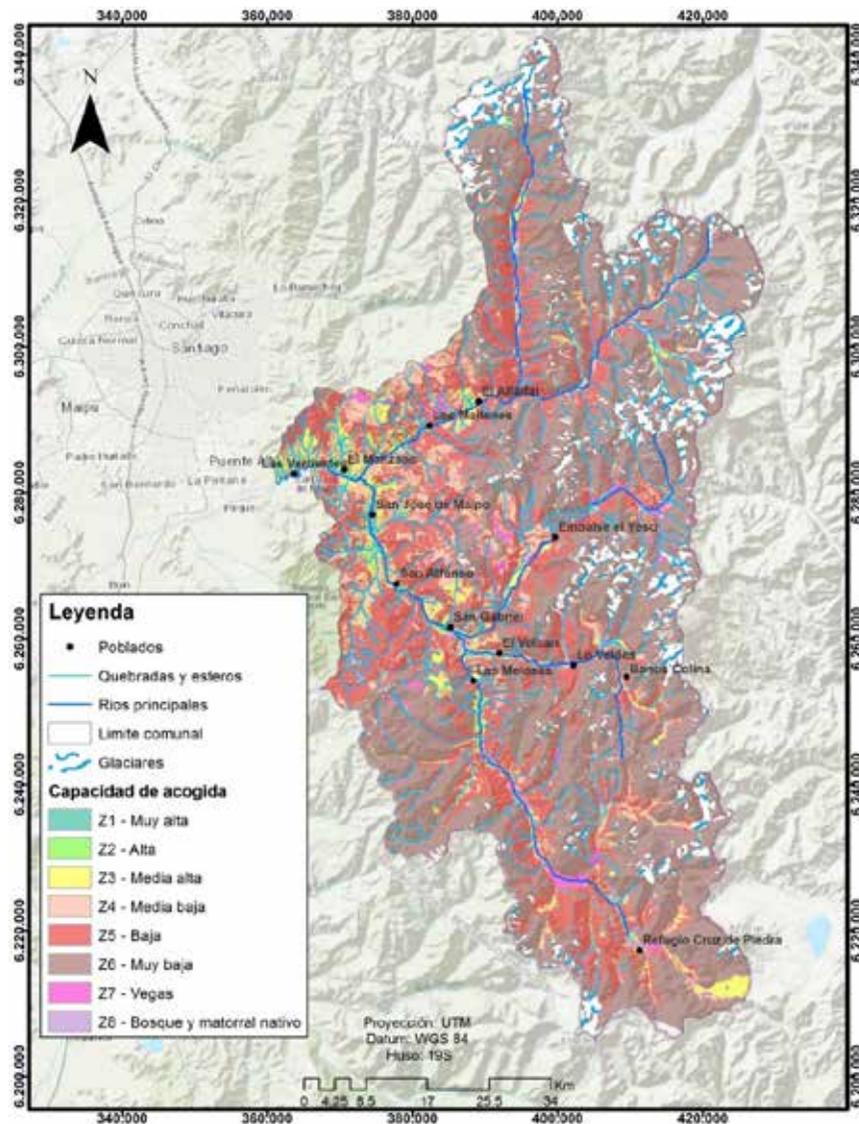
El artículo 3° de la Ley N° 18.378 establece que “En los predios agrícolas ubicados en áreas erosionadas o en inminente riesgo de erosión deberán aplicarse aquellas técnicas y programas de conservación que indique el Ministerio de Agricultura”<sup>100</sup>. Con tal objetivo, el Presidente de la República, por decreto expedido a través del Ministerio de Agricultura, podrá crear en las áreas mencionadas ‘distritos de conservación de suelos, bosques y aguas’. Un Distrito de Conservación busca por tanto conservar y/o restaurar la capacidad productiva de los suelos a través de la gestión adecuada del agua, bosques y suelo, y así resguardar las actividades productivas del territorio declarado. Si bien, la Ley reemplaza a una incluso más antigua, tanto la creación de distritos de conservación voluntad de la presidencia de la República como la generación de técnicas y programas asociados a la conservación de los suelos en concordancia con la Ley, no se ha generado como habría de esperarse<sup>101</sup>.

El estudio realizado por la Universidad de Chile (2011) en San José de Maipo, señala que existen elementos que dan cuenta de la necesidad de la declaración de un Distrito de Conservación en esta comuna. En el año 2018, por encargo del Ministerio del Medio Ambiente, la Universidad de Chile (2018) elaboró un Plan Maestro Distrital de manejo sustentable para todo el territorio de la comuna de San José de Maipo, incorporando el manejo sostenible de suelos, aguas y bosques en pro de la protección de la biodiversidad y el medio ambiente, estableciendo las buenas prácticas más deseables en función de las vocaciones de uso de las diferentes áreas de la comuna. La Figura 19 muestra la zonificación del Distrito propuesto, con las distintas capacidades de los ecosistemas de acoger actividades humanas.

Es importante consignar que no se ha declarado formalmente en el país ningún Distrito de Conservación, aun cuando existe la Ley 18.378 que faculta la creación de esta figura de protección de los recursos naturales desde el año 1984.

98 Unda, A. y F. Ravera. 1994.  
 99 Gayoso, J. y A. Iroume. 1995.  
 100 Ministerio de Agricultura. 1984.  
 101 Gallardo, E. 1994.

Figura 5.19. Zonificación del distrito de conservación Cajón del Maipo.



FUENTE: Universidad de Chile, 2011 y 2018.

### 5.3.2 Acciones institucionales para el manejo del suelo

#### 5.3.2.1 Las Instituciones Públicas

Desgraciadamente, Chile no cuenta con un servicio centralizado que coordine todas las acciones del estado referentes al recurso suelo. Hoy en día, estas se encuentran dispersas en una serie de servicios, los cuales no siempre están coordinados entre sí, lo que genera un debilitamiento de la institucionalidad y de las acciones que el estado realiza en cuanto a la investigación, protección y conservación de este valioso recurso.

#### Servicio Agrícola y Ganadero (SAG)

En relación a la gestión ambiental del suelo, el SAG ha desarrollado diversos lineamientos estratégicos:

- Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados (SIRSD).
- Fomento de Obras de Riego y Drenaje en asociación a la Comisión Nacional de Riego.

- Agricultura Orgánica para la promoción de esta práctica dado sus beneficios en los suelos.
- Mejoramiento en el manejo de residuos con la finalidad de prevenir la concentración de contaminantes y evitar sus efectos adversos en el suelo y en otros componentes del medio.

#### **Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP)**

Los programas del INDAP relacionados con el manejo ambiental de los suelos son:

- Crédito de Enlace Forestal: otorga acceso y financiamiento para forestar predios o parte de ellos.
- Riego Asociativo: brinda apoyo en la generación de proyectos comunitarios de riego, que mejoren la eficiencia en el empleo del recurso agua y su aplicación sobre los suelos.
- Planteles Animales Bajo Certificación Oficial (PABCO): Incorporación de prácticas de manejo y conservación de praderas
- PRODECOP Secano: busca reducir la pobreza en zonas rurales y la degradación de los recursos naturales en las zonas del secano interior de las regiones VI, VII y VIII.

#### **Corporación Nacional Forestal (CONAF)**

Entre las actividades de la Corporación Nacional Forestal relacionadas con la gestión del suelo se pueden mencionar:

- La Ley N° 20.283 “Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal” a través del manejo del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, y el catastro forestal.
- Aplicación del DL 701 (1974) que incentiva la forestación en suelos de uso preferentemente forestal y suelos degradados.
- Manejo de cuencas hidrográficas, que en conjunto con la Dirección General de Aguas, busca un ordenamiento de las cuencas y la restauración hidrológica forestal y de los suelos degradados.
- Control de la desertificación, acuerdo internacional firmado por Chile en 1997 que forma parte de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD), siendo responsabilidad de CONAF la coordinación y ejecución del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PANCD).

#### **Ministerio de Obras Públicas (MOP)**

Su relación en la gestión del suelo se traduce en como el MOP a través del uso y manejo de los suelos, afecta el estado de estos. En este sentido, sus programas que tienen directa relación con el recurso son:

- Bonificación a la Inversión en Riego y Drenaje de la Ley 18.450 de la Comisión Nacional de Riego.
- Grandes y medianas obras de riego de la Dirección General de Obras Hidráulicas.

#### **Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU)**

A través de la Ley General de Urbanismo y Construcción y su normativa asociada, es el principal ente encargado de la planificación del territorio, y con ello, de los diferentes usos que se le dan a los suelos del país.

##### *5.3.2.2 Organismos de investigación*

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)

Centro de Investigación en torno a los recursos naturales, desarrollan estudios relacionados a la gestión del suelo, como la zonificación de estos a nivel nacional en cuanto a su degradación y erosión.

#### **Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA)**

Desarrollo de investigación en política agraria, relaciones económicas internacionales y el sector agrario en general, en apoyo al Ministerio de Agricultura.

#### **Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)**

Desarrollo de investigación agropecuaria en torno al suelo, con publicaciones relacionadas a temas de drenaje, riego, erosión, cultivos agrícolas, conservación y recuperación de suelos, entre otros.

#### **Instituto Forestal (INFOR)**

Si bien, su foco principal es el desarrollo de investigación forestal en el país, la promoción de un manejo forestal sostenible de los

bosques nativos, el monitoreo de estos ecosistemas y la recuperación de tierras en procesos de desertificación indirectamente, se relaciona a una gestión sustentable de los suelos del país.

### Universidades

Las Universidades Chilenas son una fuente esencial de generación de conocimiento sobre el recurso suelo del país, así como también de generar herramientas técnicas para la conservación y manejo del mismo. En particular la Universidad de Chile, ha sido pionera en la formación de conocimiento frente al recurso, la que nace con la creación del primer laboratorio de análisis de suelo en 1887, a lo que sigue una larga trayectoria de incorporación de tecnologías y formación de profesionales dedicados al recurso. Cabe destacar también el importante aporte que realizan instituciones de educación superior como la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad de Concepción, la Universidad Austral, Universidad de la Frontera y Universidad de Talca, entre otras.

#### 5.3.2.3 Programas específicos relevantes para la conservación del suelo

##### Programa para la recuperación de suelos degradados (SIRSD)

Programa establecido por la Ley 20.412<sup>102</sup>, que busca propiciar el empleo de buenas prácticas e insumos que permitan disminuir, parar o revertir los procesos de degradación de suelos y reponer la productividad de estos, fomentando así la incorporación de los agricultores y su competitividad en los mercados.

Se desarrolla a nivel nacional tanto con el sector público como privado. En el sector público es el Servicio Agrícola Ganadero y el Instituto de Desarrollo Agropecuario, con el apoyo de la Subsecretaría de Agricultura y ODEPA, los encargados de ejecutarlo. El INDAP entrega los incentivos a los pequeños agricultores mientras que el SAG atiende a todo tipo de agricultores excepto aquellos que ya hayan obtenido el beneficio por parte de INDAP. En cuanto al sector privado, son los profesionales del agro que a través de la confección de planes de manejos y estudios de los suelos participan del programa

El Programa tiene las áreas específicas o subprogramas susceptibles de ser bonificados:

- Incorporación de fertilizantes de base fosforada: restituir y mantener en el tiempo la fertilidad fosfatado natural de los suelos.
- Incorporación de elementos químicos esenciales: modificar la acidez o salinidad en exceso de los suelos o el déficit de elementos químicos fundamentales como el azufre, potasio o calcio.
- Establecimiento de una cubierta vegetal en suelos descubiertos o con cobertura deteriorada: generación o recuperación de una cubierta vegetal en suelos degradados así como sostener aquellos niveles recuperados.
- Empleo de métodos de intervención del suelo como la rotación de cultivos: su objetivo es promover el empleo de prácticas dirigidas a conservar y/o recuperar los suelos agrícolas.

Eliminación, limpia o confinamiento de impedimentos físicos o químicos: habilitación de predios agropecuarios que están en desuso por presentar características (tocones, troncos muertos, matorral sin valor forrajero, piedras, etc.), que los hacen no deseables para la agricultura.

La cifra de superficie intervenida superaría los 3 millones de hectáreas. Desafortunadamente, desde el 2010 no se han realizados estudios completos de evaluación. Esta cifra sobre recuperación es muy discutible. Si bien este programa puede llegar a tener un alto impacto en los agricultores logrando ser una parte importante de su financiamiento, no necesariamente cumple con los objetivos de recuperación de suelos degradados propuestos, por lo que en la práctica en la mayoría de los casos, correspondería más bien a un subsidio encubierto. Por otra parte, hay una cantidad significativa de la aplicación de este programa en suelos ganaderos, donde es muy difícil de estimar el impacto pues el efecto de las inversiones, como cercos, aguadas, u otras, depende de cómo se manejan los terrenos ganaderos con posterioridad a la inversión.

##### Programa de manejo de cuencas y conservación de suelos y aguas

Dirigido a generar acciones para el manejo sustentable de los ecosistemas forestales a nivel de cuencas hidrográficas, promueve el ordenamiento de éstas, la recuperación de suelos degradados y la restauración del ciclo hidrológico en terrenos forestales.

Como objetivo general tiene la finalidad de incorporar el suelo y el agua en la gestión de los ecosistemas forestales.

Las principales actividades asociadas al programa son:

- Recuperación de suelos degradados
- Seguimiento y actualización de la base de datos de bonificaciones forestales y por tipo de obra de RSD.
- Cooperación Técnica Triangular Chile-Japón-Tercer países.
- Evaluación de obras de recuperación de suelos bonificadas por el DL 701.
- Actualización anual de tabla de costos de bonificaciones.
- Dictado de cursos de conservación de suelos en el marco del DL 701.

### Programas especiales de control de dunas

En 1899 se realizó el primer catastro de dunas entre Constitución y Llico, identificándose 27 mil ha de dunas que estaban avanzando hacia el poblado de Chanco, y para lo cual, fue necesario establecer una plantación forestal que frenara el avance de éstas siendo el primer proyecto nacional de contención de dunas. Posteriormente se desarrollaría el Proyecto Chillán, y el Proyecto Ranquilco y Paicaví en la provincia de Arauco. Este último consistió en la construcción de una duna costera artificial compuesta por empalizadas y ramas y cubierta de *Ammophila arenaria*, para impedir su avance hacia el interior. Por otra parte, en la zona norte de Tierra del fuego, se detuvo el avance de las dunas utilizando la especie *Elimus arenaria*, que una vez establecida, se complementó con la siembra de especies forrajeras en una superficie de 20.000 ha, y el manejo controlado de ovinos y bovinos que permitió abonar el sustrato y transformar el estrato superior en un suelo estabilizado.

### Programa de acción nacional contra la desertificación (PANCD)

Los objetivos de este programa son determinar áreas prioritarias de prevención y control del proceso, y focalizar sus esfuerzos en aquellas áreas donde se están desarrollando acciones multisectoriales; definir roles y lograr consenso entre los distintos actores que intervienen en el tema de la desertificación y la sequía; e integrar la lucha contra la desertificación en estrategias nacionales, regionales y locales de desarrollo económico y social; así también, indicar y proponer formas participativas de incorporación de las comunidades humanas amenazadas por el proceso de desertificación.

En este contexto, en el año 2018 se generó la actualización del Programa de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación, la Degradación de Tierras y la Sequía PANCD-Chile 216-2030, el cual busca aunar la Estrategia Decenal de la CNULD con el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación, y generar una alianza mundial para revertir y prevenir la desertificación, la degradación de las tierras y mitigar los efectos de la sequía en las zonas afectadas, como establecer una meta de degradación neutral de las tierras hacia el año 2030. En función de las tendencias actuales de uso de los suelos se estima que será muy difícil de alcanzar esta meta.

#### 5.3.3 Necesidad de una ley de suelos

Como se expuso anteriormente, la normativa se encuentra dispersa en diversos cuerpos legales que finalmente generan un obstáculo a la generación de un proyecto que aborde este componente y permita gestionarlo de manera efectiva. Por este motivo, se vuelve esencial avanzar hacia una Ley Marco del Suelo que actualice toda la legislación existente en esta materia y permita a su vez, cumplir con lo señalado en la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente, según la cual, la ley cuidará que el uso del suelo se haga en forma racional con el objetivo de impedir su pérdida y degradación<sup>103</sup>.

En relación a esto, Gallardo (1994)<sup>104</sup> desarrolló para la Corporación Nacional de Medio ambiente un Diagnóstico de los Aspectos Jurídicos relacionados a la Conservación de Suelos Rurales que luego, serviría para formular la Propuesta de Plan Nacional de Conservación de Suelos. Entre sus principales conclusiones fue que nunca el país ha tenido una ley de protección de suelo y que la legislación existente, está desactualizada siendo incluso obsoleta, además de no ser ni holística ni global. A su vez, concluye que de todos los componentes del ecosistema del país, el suelo ha sido el que menor protección ha recibido por parte del ordenamiento jurídico ambiental, lo que se traduce en un alto riesgo para la vida del hombre dado el rol fundamental de éste como base para las actividades antrópicas.

Si bien quedan acciones por desarrollar, la Estrategia 2016-2030 del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PANCD) señala algunas de las actividades puntuales que Chile ha realizado para combatir tanto la desertificación y sequía, como la consecuente degradación de sus suelos, tales como la articulación de actores relevantes mediante sistemas de alerta temprana, la aplicación de instrumentos de fomento a la forestación y recuperación de áreas desertificadas y suelos degradados y el fomento al riego. Así, durante

103 Haro, V. 2007.

104 Gallardo, E. 1994.

el periodo 2000-2013, la inversión del Estado en instrumentos de fomento del MINAGRI relacionados al programa alcanza USD 1.578 millones con una intervención concreta de 4.266.725 hectáreas, siendo actualmente las hectáreas afectas por desertificación en Chile alrededor de 16 mil hectáreas<sup>105</sup>.

Paralelamente a esta estrategia, la implementación de medidas desde otros organismos como el Programa de Recuperación de Suelos Degradados en conjunto con el INDAP ha logrado beneficiar a 214 mil agricultores recuperando 148 mil hectáreas de suelo anuales entre 1996-2009, así como otras medidas tales como el fomento a la Ley de Riego y Drenaje, la forestación de suelos degradados y la promulgación de una Ley de Bosque Nativo<sup>106</sup>. Si bien, estas acciones han logrado en cierta medida promover la conservación de los suelos, tienen un carácter puntual y no son instrumentos legales integrales que aborden dicho componente.

En esta línea, en 1994 la Corporación Nacional del Medio Ambiente en conjunto con el Ministerio de Agricultura generaron una "Propuesta de Plan de Manejo Nacional de Suelos" con el fin de resguardar la protección, uso y manejo coherente de los suelos en concordancia con sus aptitudes, limitaciones y potencialidades para así evitar su degradación<sup>107</sup>, este Plan resumía principios que ponían en valor el recurso suelo como patrimonio de la nación enfatizando el rol del Estado en su conservación, llegando a plantear la necesidad de la promulgación de una Ley de Conservación de Suelos que promueva instrumentos para la conservación, cuerpo legal que a la fecha aún no se ha establecido y que permitiría contar con una herramienta integral y de carácter normativo para hacer efectiva la protección de los suelos.

En cuanto a los contenidos que una ley de esta índole debería considerar, es preciso tener en consideración las recomendaciones de la FAO (2019)<sup>108</sup> en cuanto a la gestión de los suelos. Dicho organismo propone que la gestión del suelo se haga a través de un Manejo Sustentable de las Tierras (MST), lo cual busca propiciar una política y gestión de éstas que permita su gobernanza efectiva y la resolución de conflictos en cuanto a su uso y tenencia. EL MST es crucial para la conservación de la biodiversidad asociada al suelo, y para la adaptación y mitigación frente a las modificaciones del ecosistema impuestas por el cambio climático. La FAO apoya la generación de políticas asociadas al MST mediante las siguientes acciones:

- Brindar información actualizada sobre MST y la planificación del uso del suelo.
- Otorgar información sobre el manejo de tierras sometidas a sequía.
- Dar a conocer información sobre el estado de la degradación del suelo en el mundo, y su relación con el cambio climático y la generación de servicios ecosistémicos.
- Armonizar el trabajo internacional sobre políticas del MST.

Así mismo, plantea directrices<sup>109</sup> para afrontar las principales amenazas del suelo y que impiden un MST efectivo:

- Minimizar la erosión del suelo:
- Mejorar el contenido de materia orgánica del suelo
- Fomentar el equilibrio y los ciclos de nutrientes del suelo
- Prevenir, mitigar y minimizar la salinización y alcalinización de los suelos
- Prevenir y minimizar la contaminación de los suelos
- Prevenir y minimizar la acidificación de los suelos
- Preservar y mejorar la biodiversidad de los suelos
- Minimizar el sellado y conversión de los suelos
- Prevenir y mitigar la compactación del suelo
- Mejorar la gestión del agua del suelo

---

105 Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2016.

106 CONAF. 2016.

107 Haro, V. 2007.

108 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2019.

109 Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2017.

En resumen, los instrumentos creados para la conservación del suelo, a través de programas de apoyo al sector silvoagropecuario basado en subsidios, han demostrado su baja eficacia debido al impacto sobre la degradación que se ha generado. Estos necesitan altos recursos financieros y de personal para lograr resultados escasos en que los privados actúan de forma pasiva frente a los incentivos estatales. Existe por tanto en Chile un gran vacío que puede ser suplido por la introducción de instrumentos efectivos que permitan promover desde lo privado acciones de conservación de los suelos. Por otro lado, existe claridad en que una de las características esenciales de la legislación relacionada al suelo en nuestro país, es que no existe un marco jurídico adecuado que lo regule. Finalmente, se hace necesaria la acción conjunta de los organismos técnicos del Estado y las Universidades, junto al cuerpo legislativo, para que Chile tenga una Ley Marco del Suelo, de manera de proteger adecuadamente este valioso recurso.

#### 5.4 CONCLUSIONES

Tradicionalmente se asocia al suelo como el sustento de la vegetación, y por ende como un componente esencial de los sistemas productivos agrícolas y forestales. Sin embargo, el valor del suelo y la importancia de su conservación van mucho más allá de su rol más evidente, la producción de alimentos, existiendo un sinnúmero de bienes y servicios que el suelo provee y que se relacionan con la calidad del ambiente. Por ejemplo, el potencial de biodiversidad del suelo es enorme, si se toma en consideración que la mayoría de los antibióticos se han obtenido de organismos del suelo, incluyendo la penicilina.

Además, el suelo cumple un rol fundamental con respecto al cambio climático, por cuanto es reconocido como un reservorio de carbono, que almacena este elemento en mayor contenido que la atmósfera y toda la vegetación en su conjunto. Se estima que el suelo podría contribuir a capturar 20.000 megatoneladas de carbono en 25 años, lo que constituye un 10% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Esta ambiciosa meta sólo es posible aplicando prácticas de manejo sustentable que favorezcan la captura e incorporación de carbono al suelo.

Probablemente, uno de los roles más desconocidos, pero esenciales del suelo, es su función en el ciclo hidrológico, llegando a contener dos tercios del agua dulce del planeta, transformándolo en el mayor reservorio de este vital elemento. Además, dadas sus propiedades mineralógicas, químicas y físicas, el suelo constituye un verdadero filtro para sedimentos, pesticidas, metales pesados y microorganismos patógenos, entre otros. Un manejo apropiado de los recursos hídricos contenidos en el suelo, es esencial para el mantenimiento de sus funciones y servicios ecosistémicos. El suelo es además el sostén de gran parte de las actividades humanas incluyendo la vivienda, el transporte y gran cantidad de emplazamientos industriales y productivos no agrícolas, las que muchas veces se llevan de manera no sustentable sobre este recurso.

A nivel mundial, los suelos sufren una creciente presión por la intensificación de su uso para la agricultura, el pastoreo, la silvicultura y la urbanización. Esta demanda creciente se debe principalmente al explosivo aumento de la población mundial, lo que combinado con usos y prácticas no adecuadas genera una degradación importante del recurso suelo. En el país existe la necesidad urgente de hacerse cargo de estos problemas, ya que el suelo es un recurso natural no-renovable a escala humana, cuya pérdida y degradación son generalmente irreversibles.

A pesar de ser una nación pequeña, Chile cuenta con una enorme diversidad de suelos, contando con diez de los doce órdenes de suelo hasta ahora descritos por la taxonomía de suelos (USDA). Esta diversidad está dada por un extraordinario gradiente climático, que permite que en el Desierto de Atacama existan suelos únicos, inexistentes en otras partes del planeta, que la Depresión intermedia de la zona Central se encuentre dentro de las áreas más productivas del planeta, y que los remotos fiordos de la Patagonia cuenten con un manto casi continuo de suelos orgánicos, constituyendo una reserva de carbono de nivel mundial. Este patrimonio edáfico único merece ser conocido por la nación para poder generar medidas y prácticas que ayuden a su sostenibilidad en el largo plazo.

Chile enfrenta numerosos desafíos en cuanto al recurso suelo. La zona más crítica en cuanto a las amenazas es la zona central. Por un lado esta zona del país cuenta con un pujante sector agropecuario y forestal, concentrado en los fértiles valles centrales y la Cordillera de la Costa respectivamente, y por otro, aquí se sustenta uno de los ecosistemas más amenazados del país, los que se ven continuamente presionados por el cambio de uso de suelo motivados por el desplazamiento de las actividades agrícola y forestal hacia suelos marginales, y por la expansión urbana descontrolada que está sellando para siempre con cemento los suelos más productivos del país. Solo considerando ocho ciudades de la zona central, se ha perdido más de 30.000 hectáreas de suelo agrícola de alta calidad los últimos 25 años, una cifra alarmante si se considera que Chile tiene solo un 3.3% de su superficie cubierta con suelos altamente productivos, sumando un total de 2.526.723 hectáreas (apenas 0,14 hectáreas por habitante).

Además, no se ha logrado eliminar el flagelo de la erosión, siendo esta la principal causa de degradación de los suelos, afectando sobre todo y con mayor intensidad a aquellos de las laderas de la Cordillera de la Costa. A esto se suma una serie de malas prácticas agrícolas y una laxa regulación ambiental que provoca una continua degradación del recurso. Es así como en casi todas las regiones del país se han detectado problemas de contaminación de suelos de diversa índole.

La falta de conocimiento del recurso es probablemente uno de los factores más críticos en Chile. Solo el 25% del territorio tiene cartografía oficial de suelos. Apenas se conocen los suelos que están más allá de las zonas de explotación agrícola intensiva, siendo la

mayoría de las investigaciones a escala nacional existentes basadas en herramientas satelitales y muy pocos datos de terreno. En este sentido, es crítico que se tome responsabilidad frente a la realización de los estudios necesarios para conocer los suelos que van más allá de las zonas de actual uso intensivo, ya que no se podrá protegerlos y aprovecharlos debidamente si es que aún no se conocen. Por último, se requiere urgente de una acción concreta del estado para asegurar la sostenibilidad a largo plazo del recurso, principalmente a través de dos acciones: la primera es contar con una institucionalidad única que maneje los aspectos relacionados al recurso, hoy dispersos en una serie de organismos del estado; y la segunda es contar con una legislación de ordenamiento territorial que incluya al suelo como un componente esencial dentro de las políticas de gestión del territorio. Chile es uno de los pocos países de la OCDE y de Latinoamérica que no cuenta con una legislación que proteja el recurso. En el país se debe asegurar hoy la generación de acciones conjuntas que permitan que siga existiendo suelo para las futuras generaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, G. y M. Cartes. 2009. Sistema para reducir la concentración de boro en aguas de riego. Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario. Fundación para la Innovación Agraria (FIA). Arica, Chile. 30p.
- Antilén, M., N. Araya, M. Briceno y M. Escudey. 2006. Changes on chemical fractions of heavy metals in Chilean soils amended with sewage sludge affected by a thermal impact. *Soil Research*, 44: 619-625.
- Armesto, J., C. Villagrán, J. Aravena, C. Pérez, C. Smith-Ramírez, M. Cortés y L. Hedin. 1995. Conifer forests of the Chilean coastal range. In: Hill, R.S., Enright, N. (Eds.), *Ecology of the Southern Conifers*. Melbourne University Press. Melbourne, Australia. pp. 156-170.
- Armesto, J., D. Manushevich, A. Mora, C. Smith-Ramírez, R. Rozzi, A. Abarzúa y P. Marquet. 2010. From the Holocene to the Anthropocene: A historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15,000 years. *Land Use Policy*, 27(2): 148-160.
- Armesto, J., M. Arroyo y L. Hinojosa. 2007. The Mediterranean Environment of Central Chile. In: Veblen, T., Young, K., Orme, A. (Eds.). *The Physical Geography of South America*. Oxford University Press. Nueva York, EE.UU. pp. 184-199
- Berasaluce, M., P. Mondaca, M. Schuhmacher, M. Bravo, S. Sauvé, C. Navarro-Villaroel, E. Dovytyarova y A. Neaman. 2019. Soil and indoor dust as environmental media of human exposure to As, Cd, Cu, and Pb near a copper smelter in central Chile. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 54: 156-162.
- Besoain, E., R. Ruiz y C. Hepp. 1995. La erupción del Volcán Hudson, XI Región, y sus consecuencias para la agricultura. *Agricultura Técnica*, 55: 204-219.
- Bonomelli, C., C. Bonilla, A. Valenzuela y N. Saavedra. 2002. Presencia de Cadmio en fertilizantes fosfatados de diferente procedencia comercializados en Chile, segunda temporada. *Simiente*, 72(1-2): 9-16.
- Brunel-Saldias, N., I. Martínez, O. Seguel, C. Ovalle y E. Acevedo. 2016. Structural characterization of a compacted alfisol under different tillage systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(3): 689-701.
- Bundschuh, J., M. Litter, F. Parvez, G. Román-Ross, H. Nicolli, J. Jean, C. Liu, D. López, M. Armienta, L. Guilherme, A. Góme-Cueva, L. Cornejo, L. Cumbal y R. Toujaguez. 2012. One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429: 2-35.
- Cáceres, V., D. Gruttner y N. Contreras. 1992. Water recycling in arid regions: Chilean case. *Ambio* 21(2): 138-144.
- Cáceres-Jensen, L., J. Gan, M. Baez, R. Fuentes y M. Escudey. 2009. Adsorption of glyphosate on variable-charge, volcanic ash-derived soils. *Journal of environmental quality*, 38: 1449-1457.
- Cáceres-Jensen, L., J. Rodríguez-Becerra, J. Parra-Rivero, M. Escudey, L. Barrientos y V. Castro-Villa. 2013. Sorption kinetics of diuron on volcanic ash derived soils. *Journal of hazardous materials*, 261: 602-613.
- Caldenius, C. 1932. Las glaciaciones cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego. *Geografiska Annaler*, 14: 1-164.
- Calderón, R., F. Godoy, M. Escudey y P. Palma. 2017. A review of perchlorate (ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>) occurrence in fruits and vegetables. *Environmental monitoring and assessment*, 189(2): 82.
- Calderón, R., P. Palma, D. Parker y M. Escudey. 2014a. Capture and accumulation of perchlorate in lettuce. Effect of genotype, temperature, perchlorate concentration, and competition with anions. *Chemosphere*, 111: 195-200.
- Calderón, R., P. Palma, D. Parker, M. Molina, F. Godoy y M. Escudey. 2014b. Perchlorate levels in soil and waters from the Atacama Desert. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 66(2): 155-161.
- Calderon, R., P. Palma, F. Godoy y M. Escudey. 2016. Sorption and fate of perchlorate in arid soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(10): 1437-1450.
- Carretier, S., V. Tolorza, V. Regard, G. Aguilar, M. Bermúdez, J. Martinod, J. Guyot, G. Hérail y R. Riquelme. 2018. Review of erosion dynamics along the major NS climatic gradient in Chile and perspectives. *Geomorphology* 300: 45-68.
- Casanova, M., O. Salazar, O. Seguel y W. Luzio. 2013. *The soils of Chile*. Springer Science & Business Media. Santiago, Chile. 183p.
- Castañeda, L. y O. Barbosa. 2017. Metagenomic analysis exploring taxonomic and functional diversity of soil microbial communities in Chilean vineyards and surrounding native forests. *PeerJ*, 5: e3098.
- Castañeda, L., T. Miura, R. Sánchez y O. Barbosa. 2018. Effects of agricultural management on phyllosphere fungal diversity in vineyards and the association with adjacent native forests. *PeerJ*, 6: e5715.
- Cazanga, M., M. Gutierrez, M. Escudey, G. Galindo, A. Reyes y C. Andrew. 2008. Adsorption isotherms of copper, lead, nickel, and zinc in two Chilean soils in single-and multi-component systems: sewage sludge impact on the adsorption isotherms of Diguillín soil. *Soil Research*, 46: 53-61.
- Centro de Estudios para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2005. *Evaluaciones del desempeño ambiental-Chile*. OCDE-Naciones Unidas. Santiago, Chile. 275p.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2010. Determinación de la Erosión Potencial y Actual del Territorio de Chile. Disponible en <[http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/3214/06CN12IAM12\\_IF.pdf?sequence=14](http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/3214/06CN12IAM12_IF.pdf?sequence=14)> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Chesworth, W. 2007. *Encyclopedia of soil science*. Springer Science & Business Media. Canadá. 849p.
- Corporación Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). 2008. *Biodiversidad de Chile: Patrimonio y Desafíos*. Ocho Libros Editores. Santiago, Chile. 640p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF) y Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). 1999. *Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile*. Informe Nacional con Variables Ambientales. Santiago, Chile. 89p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2010. *Los grandes incendios forestales en Chile 1985-2009*. Manual de trabajo 539. CONAF. Santiago, Chile. 79p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2016. *Programa de Acción Nacional contra la desertificación PANCD-Chile 2016-2030*. Santiago, Chile. 236p.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2017. *Superficie de uso de suelo regional*. Disponible en <<http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>>. Citado el 30 de agosto del 2019.
- Corradini, F., F. Meza y R. Calderón. 2017. Trace element content in soil after a sediment-laden flood in northern Chile. *Journal of Soils and Sediments*, 17(10): 2500-2515.
- Corradini, F., F. Nájera, M. Casanova, Y. Tapia, R. Singh y O. Salazar. 2015. Effects of maize cultivation on nitrogen and phosphorus loadings to drainage channels in Central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(11): 697.
- Corradini, F., P. Meza, R. Eguiluz, F. Casado, E. Huerta-Lwanga y V. Geissen. 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671: 411-420.
- Curtis, T., W. Sloan y J. Scannell. 2002. Estimating prokaryotic diversity and its limits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(16): 10494-10499.

- De Gregori, I., E. Fuentes, M. Rojas, H. Pinochet y M. Potin-Gautier. 2003. Monitoring of copper, arsenic and antimony levels in agricultural soils impacted and non-impacted by mining activities, from three regions in Chile. *Journal of Environmental Monitoring*, 5(2): 287-295.
- De Gregori, I., G. Lobos, S. Lobos, H. Pinochet, M. Potin-Gautier y M. Astruc. 2000. Comparative study of copper and selenium pollution in agricultural ecosystems from Valparaíso Region, Chile. *Environmental technology*, 21(3): 307-316.
- Diaz, C. y C. Wright. 1965. Soils of the Arid Zones of Chile. *Soils Bulletin*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 128p.
- Diaz, C., C. Áviles y R. Roberts. 1959. Los grandes grupos de suelos de la provincia de Magallanes. *Agricultura Técnica* 19-20: 227-238.
- Donoso, G., J. Cancino y A. Magri. 1999. Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile. *Water Science and Technology*, 39(3): 49-60.
- Dörner, J., D. Dec, X. Peng y R. Horn. 2010. Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma*, 159(1-2): 189-197.
- Dörner, J., P. Sandoval y D. Dec. 2010. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4): 495-508.
- Dörner, J., R. Horn, D. Dec, O. Wendroth, H. Fleige y F. Zuñiga. 2017. Land-use dependent change in the soil mechanical strength and resilience of a shallow volcanic ash soil in Southern Chile. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5): 1064-1073.
- Echeñique, J. y L. Romero. 2009. Evolución de la Agricultura Familiar en Chile 1997-2007. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Santiago, Chile. 124p.
- Elgueta, M. y F. Rojas. 2000. Hymenoptera de Chile. Hacia un proyecto CYTED para el inventario y estimación de la diversidad entomológica en Iberoamérica: Pribes-2000. En: Martin-Piera, F., J. Morrone y A. Melic (Eds). *Monografías Tercer Milenio*. Zaragoza, España. pp. 245-251.
- Ellies, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque*, 16(2): 101-110.
- Ericksen, G. 1983. The Chilean Nitrate Deposits: The origin of the Chilean nitrate deposits, which contain a unique group of saline minerals, has provoked lively discussion for more than 100 years. *American Scientist*, 71: 366-374.
- Escobar, G. 2016. Estructura y tenencia de la tierra agrícola en América Latina y el Caribe. Nueva Sociedad. Disponible en <[https://nuso.org/media/documents/PERS\\_Reinecke\\_Faiguenbaum\\_FF\\_HhTg5ke.pdf](https://nuso.org/media/documents/PERS_Reinecke_Faiguenbaum_FF_HhTg5ke.pdf)> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Escudey, M., G. Galindo, K. Avendaño, D. Borchardt, A. Chang y M. Briceño. 2004. Distribution of phosphorus forms in Chilean soils and sewage sludge by chemical fractionation and <sup>31</sup>P-NMR. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 49(3): 219-222.
- European Food Safety Authority (EFSA). 2014. Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of perchlorate in food, in particular fruits and vegetables. *EFSA Journal*, 12(10): 3869.
- Ewing, S., B. Sutter, J. Owen, K. Nishizumi, W. Sharp, S. Cliff, K. Perry, W. Dietrich, C. MacKay y R. Amundson. 2006. A threshold in soil formation at Earth's arid-hyperarid transition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(21): 5293-5322.
- Fernández-Gómez, B., J. Maldonado, D. Mandakovic, A. Gaete, R. Gutiérrez, A. Maass, V. Cambiasso y M. González. 2019. Bacterial communities associated to Chilean altiplanic native plants from the Andean grasslands soils. *Scientific reports*, 9 (1042).
- Ferreira, R., A. Aljaro, R. Ruiz, L. Rojas y J. Oster. 1997. Behavior of 42 crop species grown in saline soils with high boron concentrations. *Agricultural Water Management*, 34(2): 111-124.
- Figuerola, L., L. Tapia, E. Bastías, H. Escobar y A. Torres. 1998. Niveles de boro en el agua de riego utilizada en olivicultura del norte de Chile. En: *Memorias del Taller Internacional Gestión de la Calidad del Agua y Control de la Contaminación en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Arica, Chile - Tacna, Perú. pp 167-188.
- Fleige, H., S. Beck-Broichsitter, J. Dörner, M. Goebel, J. Bachmann y R. Horn. 2016. Land use and soil development in southern Chile: Effects on physical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(3), 818-831.
- Flores, C., V. Morgante, M. González, R. Navia y M. Seeger. 2009. Adsorption studies of the herbicide simazine in agricultural soils of the Aconcagua valley, central Chile. *Chemosphere*, 74(11): 1544-1549.
- Flores, J., E. Martínez, M. Espinosa, G. Henríquez, P. Avendaño, P. Torres y I. Ahumada. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: Región de La Araucanía. *Síntesis de Resultados*. Publicación n° 149. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 50p.
- Frederiksen, P. 1988. Soils of Tierra del Fuego: a satellite-based land survey approach. *CA Reitzels*. 159p.
- Gallardo, E. 1994. Marco legal de la erosión, cultivos y recuperación de suelos. En: Espinosa, M., H. Knockaert y J. Millán (Eds). *Seminario Erosión, Cultivos y Recuperación de suelos*. INFOR. Santiago, Chile.
- Gayoso, J. y A. Iroume, A. 1991. Compaction and soil disturbances from logging In: Southern Chile, *Annales des sciences forestieres*. EDP Sciences 48(1). pp. 63-71.
- Gidhagen, L., H. Kahelin, P. Schmidt-Thomé y C. Johansson. 2002. Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM10 in Central and Northern Chile. *Atmospheric Environment*, 36(23): 3803-3817.
- Ginocchio, R., G. Carvallo, I. Toro, E. Bustamante, Y. Silva y N. Sepúlveda. 2004. Micro-spatial variation of soil metal pollution and plant recruitment near a copper smelter in Central Chile. *Environmental Pollution*, 127(3): 343-352.
- Gligo, N. 2001. Los factores críticos de la sustentabilidad ambiental del desarrollo agrícola. En: Gligo, N. *La dimensión ambiental en el desarrollo de América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago, Chile. pp 145-162.
- Gligo, N. 2018. Deterioro de las Praderas Magallánicas y Conservación de los Ecosistemas de la Estepa. *Academia Chilena de Ciencias Agronómicas*. 40p.
- González, I., A. Neaman, P. Rubio y A. Cortés. 2014. Spatial distribution of copper and pH in soils affected by intensive industrial activities in Puchuncaví and Quintero, central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(4): 943-953.
- González, P. 2019. Consumo y mercado de los fertilizantes. *Asesoría Técnica Parlamentaria*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Valparaíso, Chile. 5p.
- Gormaz, M., 1974. Las Dunas. *Corporación Nacional Forestal (CONAF)*. 138p.
- Hansen, M., S. Stehman y P. Potapov. 2010. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(19): 8650-8655.
- Haro, V. 2007. Legislación de suelos y su protección ambiental. Tesis Magíster en Derecho Ambiental. Facultad de Derecho Ambiental, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 99p.
- Heilmayr, R., C. Echeverría, R. Fuentes y E. Lambin. 2016. A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography* 75: 71-82.
- Henríquez, M., J. Becerra, R. Barra y J. Rojas. 2006. Hydrocarbons and organochlorine pesticides in soils of the urban ecosystem of Chillan and Chillan Viejo, Chile. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 51(3): 938-944.
- Hepp, K. y N. Stolpe. 2014. Caracterización y propiedades de los suelos de la Patagonia occidental (Aysén). *Boletín INIA n°298*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Coyhaique, Chile. 159p.
- Hernández, A., E. Arellano, D. Morales-Moraga y M. Miranda. 2016. Understanding the effect of three decades of land use change on soil quality and biomass productivity in a Mediterranean landscape in Chile. *Catena*, 140: 195-204.
- Hernández, M., P. Villalobos, V. Morgante, M. González, C. Reiff, E. Moore y M. Seeger. 2008. Isolation and characterization of a novel simazine-degrading bacterium from agricultural soil of central Chile, *Pseudomonas* sp. MHP41. *FEMS microbiology letters*, 286(2): 184-190.
- Herrera, B. y F. Sandoval. 1966. Capacidad de Uso de la Tierra: Provincias de Atacama a Magallanes. Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN). 25p.
- Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN) y Departamento de Conservación de Suelos y Agua (DECSA). 1966. Informe N°7. Estudio Preliminar de la Capacidad de Uso de los Suelos en la Zona Pre cordillerana y Cordillera de las Provincias de Aconcagua a Llanquihue. Santiago, Chile. 272p.
- Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales (IREN). 1961-1964. Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID. Folleto n°1. 47p.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 1997-2007. Censos Agropecuarios. Disponible en <[www.ine.cl](http://www.ine.cl)> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. *Climate Change and Land: an IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, United Nations. Geneva, Switzerland. 32p.
- Jorquera, M., O. Martínez, L. Marileo, J. Acuña, S. Saggari y M. Mora. 2014. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on the composition of rhizobacterial communities of two Chilean Andisol pastures. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(1): 99-107.
- Karimi, B., S. Terrat, S. Dequiedt, N. Saby, W. Horrigue, M. Lelievre, V. Nowak, C. Jolivet, D. Arrouays, P. Wincker, C. Cruaud, A. Bispo, P. Maron, N. Prevost y L. Reanjard. 2018. Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Science advances*, 4(7): eaat1808.

- Lagos, L., O. Navarrete, F. Maruyama, D. Crowley, F. Cid, M. Mora, y M. Jorquera. 2014. Bacterial community structures in rhizosphere microsites of ryegrass (*Lolium perenne* var. Nui) as revealed by pyrosequencing. *Biology and Fertility of Soils*, 50(8): 1253-1266.
- Lara, A., M. Solari, M. Prieto y M. Peña. 2012. Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35°-43°30'S). *Bosque* 33(1):13-23.
- Leon, O. y M. Carrasco. 2011. Degradación Química de Suelo. *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*, 23: 115-122.
- Loh, J. y M. Wackernagel. 2004. *Living planet report 2004*. World Wild Fund (WWF). Gland, Switzerland. 44p.
- Loisel, J. y Z. Yu. 2013. Holocene peatland carbon dynamics in Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, 69: 125-141.
- Luzio, W. 2010. *Suelos de Chile*. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 360p.
- Lybrand, R., J. Bockheim, W. Ge, R. Graham, S. Hlohowskyj, G. Michalski, J. Prellwitz, J. Rench, F. Wang y D. Parker. 2016. Nitrate, perchlorate, and iodate co-occur in coastal and inland deserts on Earth. *Chemical Geology*, 442: 174-186.
- Mandakovic, D., C. Rojas, J. Maldonado, M. Latorre, D. Travisany, E. Delage, A. Bihoué, G. Jean, F. Díaz, B. Fernández-Gómez, P. Cabrera, A. Gaete, C. Latorre, R. Gutiérrez, A. Maass, V. Cambiazo, S. Navarrete, D. Eveillard y M. González 2018. Structure and co-occurrence patterns in microbial communities under acute environmental stress reveal ecological factors fostering resilience. *Scientific reports*, 8 (5875).
- Martínez, E., J. Fuentes, P. Silva, S. Valle y E. Acevedo. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*, 99: 232-244.
- Maza, F., J. Maldonado, J. Vásquez, D. Mandakovic, A. Gaete, V. Cambiazo y M. González. 2019. Soil bacterial communities from the Chilean Andean highlands: taxonomic composition and culturability. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7(10).
- McInnes, S. 1994. Zoogeographic distribution of terrestrial/freshwater tardigrades from current literature. *Journal of Natural History*, 28(2): 257-352.
- McWethy, D., A. Pauchard, R. García, A. Holz, M. González, T. Veblen, J. Stahl y B. Currey. 2018. Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in South-Central Chile. *PLoS one*, 13(8): e0201195.
- Michalski, G., J. Böhlke y M. Thiemens. 2004. Long Term Atmospheric Deposition as the Source of Nitrate and Other Salts in the Atacama Desert, Chile: New Evidence from Mass-Independent Oxygen Isotopic Compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4023-4038.
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). 1974. Decreto Ley 701. Fija régimen legal de los terrenos forestales o preferentemente aptos para la forestación, y establece normas de fomento sobre la materia. Disponible en <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=6294>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). 1982. Ley 18.097, Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras. Disponible en <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=29522>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). 1984. Ley 18.374 deroga la Ley 15.020 y el Decreto con Fuerza de Ley r.r.a. 26, de 1963, y establece sanciones que señala. Disponible en <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=4000>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). 2014. Ley 18.755 Establece normas sobre el Servicio Agrícola y Ganadero, deroga la Ley n° 16.640 y otras disposiciones. Disponible en <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30135>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Ministerio de Agricultura. 2010. Ley 20.412 Establece un sistema de incentivos para la sustentabilidad agroambiental de los suelos agropecuarios. Disponible en <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1010857>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). 2019. Decreto 458. Nueva Ley General de Urbanismo y Construcción. Disponible en <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=13560>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Miranda, A., A. Altamirano, L. Cayuela, F. Pincheira y A. Lara. 2015. Different times, same story: Native forest loss and landscape homogenization in three physiographical areas of south-central of Chile. *Applied Geography* 60: 20-28.
- Miura, T., R. Sánchez, L. Castañeda, K. Godoy y O. Barbosa. 2019. Shared and unique features of bacterial communities in native forest and vineyard phyllosphere. *Ecology and Evolution*, 9(6): 3295-3305.
- Molina, M., F. Aburto, R. Calderón, M. Cazanga y M. Escudey. 2009. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 18(4): 497-511.
- Molina-Roco, M., M. Escudey, M. Antilén, N. Arancibia-Miranda y K. Manquían-Cerda. 2018. Distribution of contaminant trace metals inadvertently provided by phosphorus fertilisers: movement, chemical fractions and mass balances in contrasting acidic soils. *Environmental geochemistry and health*, 40(6): 2491-2509.
- Muñoz, C., P. Torres, M. Alvear y E. Zagal. 2012. Physical protection of C and greenhouse gas emissions provided by soil macroaggregates from a Chilean cultivated volcanic soil. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B–Soil & Plant Science*, 62: 739-748.
- Muñoz-Quezada, M., V. Iglesias, B. Lucero, K. Steenland, D. Boyd, K. Levy, B. Ryan, S. alvarado y C. Concha. 2012. Predictors of exposure to organophosphate pesticides in schoolchildren in the Province of Talca, Chile. *Environment international*, 47: 28-36.
- Myers, N., R. Mittermeier, C. Mittermeier, G. Da Fonseca y J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772): 853.
- Neaman, A., L. Reyes, F. Trolard, G. Bourrié y S. Sauvé. 2009. Copper mobility in contaminated soils of the Puchuncaví valley, central Chile. *Geoderma*, 150(3-4): 359-366.
- Norambuena, V., L. Luzio, O. Zepeda, J. Stern y F. Reinoso. 2011. Preliminary survey of some soils from Chilean Altiplano near Iquique. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(2): 62-71.
- Núñez, P., R. Demanet, T. Misselbrook, M. Alfaro y M. Mora. 2010. Nitrogen losses under different cattle grazing frequencies and intensities in a volcanic soil of southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(2): 237-250.
- Oades, J. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. *Minerals in soil environments*. In: Dixon, J. y S. Weed (Eds). *Minerals in Soil Environments*. 2° Edition. Soil Science Society of America. Madison, EE.UU. pp: 89-159
- Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2003. *Estudios sobre tenencia de tierra: Unidades de tenencia de la tierra y desarrollo rural*. Roma, Italia. Disponible en <<http://www.fao.org/3/y4307s/y4307s00.htm>> Citado el 30 de agosto del 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2015. *Estado Mundial del recurso suelo*. Disponible en <<http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>> Citado el 5 de julio del 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2019. *Land Policy*. Disponible en <<http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-policy/en>> Citado el 10 de agosto del 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2017. *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-bl813e.pdf>> Citado el 10 de agosto del 2019.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2010. *Terrastat online dataset. Land resource potential and constraints statistics at country and regional level*. Disponible en <<http://www.fao.org/ag/agl/terratat/#terratatdb>> Citado el 30 de Agosto del 2019.
- Orgiazzi, A., R. Bardgett y E. Barrios. 2016. *Global soil biodiversity atlas*. European Commission. 176p.
- Owen, J., R. Amundson, W. Dietrich, K. Nishiizumi, B. Sutter y G. Chong. 2011. The sensitivity of hillslope bedrock erosion to precipitation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(1): 117-135.
- Padarian, J., B. Minasny y A. McBratney. 2017. Chile and the Chilean soil grid: a contribution to GlobalSoilMap. *Geoderma Regional*, 9: 17-28.
- Peña, L. 1996. *Introducción al estudio de los insectos de Chile*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 253p.
- Pepin, E., S. Carretier, J. Guyot y F. Escobar. 2010. Specific suspended sediment yields of the Andean rivers of Chile and their relationship to climate, slope and vegetation. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 55: 1190-1205.
- Peralta, M. 1994. *Conservación y degradación de los suelos en Chile*. En: Perfil ambiental de Chile. Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). Santiago, Chile. pp 311-364
- Perez-Quezada, J. y H. Bown (Eds.). 2015. *Guía para la restauración de los ecosistemas andinos de Santiago*. Universidad de Chile-Corporación Nacional Forestal (CONAF). Santiago, Chile. 115 p.
- Pfeiffer, M., C. Mascayano y F. Aburto. 2010. Soils of Chilean Patagonia in glacial and periglacial environments. *Eurasian Soil Science*, 43: 1430-1438.
- Pinochet, H., I. De Gregori, M. Lobos y E. Fuentes. 1999. Selenium and copper in vegetables and fruits grown on long-term impacted soils from Valparaíso region, Chile. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 63(3): 327-334.
- Pizarro, J., P. Vergara, J. Rodríguez y A. Valenzuela. 2010b. Heavy metals in northern Chilean rivers: spatial variation and temporal trends. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3): 747-754.

- Pizarro, J., P. Vergara, J. Rodríguez, P. Sanhueza y S. Castro. 2010a. Nutrients dynamics in the main river basins of the centre-southern region of Chile. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3): 608-613.
- Richtera, P., R. Seguel, I. Ahumada, R. Verdugo, J. Narváez y Y. Shibatac. 2004. Arsenic speciation in environmental samples of a mining impacted sector of central Chile. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 49(4): 333-339.
- Rilling, J., J. Acuña, M. Sadowsky y M. Jorquera. 2018. Putative nitrogen-fixing bacteria associated with the rhizosphere and root endosphere of wheat plants grown in an Andisol from southern Chile. *Frontiers in Microbiology*, 9: 2710.
- Rodríguez-Eugenio, N., M. McLaughlin y D. Pennock. 2018. Soil pollution: a hidden reality. Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. 92p.
- Romero, L., H. Alonso, P. Campano, L. Fanfani, R. Cidu, C. Dadea, T. Keegan, I. Thornton y M. Farago. 2003. Arsenic enrichment in waters and sediments of the río Loa (Second Region, Chile). *Applied Geochemistry*, 18(9): 1399-1416.
- Sadzawka, A. 2006. Propiedades físico-químicas de los suelos. I: Reacción (pH), acidez y alcalinidad. In: Luzio, W. y Casanova, M. (Eds.) *Avances del conocimiento de los suelos de Chile*. Universidad de Chile - Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Santiago, Chile. pp: 91-127.
- Salazar, O., I. Fuentes, O. Seguel, F. Nájera y M. Casanova. 2018. Assessment of nitrogen and phosphorus pathways at the profile of over-fertilised alluvial soils. Implications for best management practices. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(7): 223.
- Salmani-Ghabeshi, S., M. Palomo-Marín, E. Bernalte, F. Rueda-Holgado, C. Miró-Rodríguez, F. Cereceda-Balic, X. Fadic, V. Vidal, M. Funes y E. Pinilla-Gil. 2016. Spatial gradient of human health risk from exposure to trace elements and radioactive pollutants in soils at the Puchuncavi-Ventanas industrial complex, Chile. *Environmental Pollution*, 218: 322-330.
- Sandoval, M., N. Stolpe, E. Zagal y M. Mardones. 2007. The effect of crop-pasture rotations on the C, N and S contents of soil aggregates and structural stability in a volcanic soil of south-central Chile. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 57: 255-262.
- Santibáñez, F. 1996. Clases de suelos según manejo y potencialidad, Chile.
- Sarzetti, L., J. Genise, M. Sanchez, J. Farina y A. Molina. 2013. Nesting behavior and ecological preferences of five Diphaglossinae species (Hymenoptera, Apoidea, Colletidae) from Argentina and Chile. *Journal of Hymenoptera Research*, 33: 63-82.
- Schaller, M., T. Ehlers, K. Lang, M. Schmid y J. Fuentes-Espoz. 2018. Addressing the contribution of climate and vegetation cover on hillslope denudation, Chilean Coastal Cordillera (26°-38°S). *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 111-122.
- Schalscha, B. y T. Ahumada. 1998. Heavy metals in rivers and soils of central Chile. *Water Science and Technology*, 37(8): 251.
- Schuster, R., D. Salcedo y L. Valenzuela. 2002. Overview of catastrophic landslides of South America in the twentieth century. *Catastrophic landslides: effects, occurrence, and mechanisms*, 15: 1-33.
- Seeger, M., M. Hernández, V. Méndez, B. Ponce, M. Córdova y M. González. 2010. Bacterial degradation and bioremediation of chlorinated herbicides and biphenyls. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3): 320-332.
- Seguel, A., J. Cumming, K. Klugh-Stewart, P. Cornejo y F. Borie. 2013. The role of arbuscular mycorrhizas in decreasing aluminium phytotoxicity in acidic soils: a review. *Mycorrhiza*, 23(3): 167-183.
- Seguel, O., E. Farias, W. Luzio, M. Casanova, I. Pino, A. Parada, X. Videla y A. Nario. 2015. Physical properties of soil after change of use from native forest to vineyard. *Agro Sur*, 43(2): 29-39.
- Servicio Agrícola Ganadero (SAG) y Universidad de Chile. 2005. Informe de criterios de suelos agrícolas. SAG-Universidad de Chile. 205p.
- Silambarasan, S., P. Logeswari, P. Cornejo y V. Kannan. 2019. Role of plant growth-promoting rhizobacterial consortium in improving the *Vigna radiata* growth and alleviation of aluminum and drought stresses. *Environmental Science and Pollution Research*: 1-13.
- Singh, B., P. Millard, A. Whiteley y J. Murrell. 2004. Unravelling rhizosphere-microbial interactions: opportunities and limitations. *Trends in microbiology*, 12(8): 386-393.
- Singh, J., V. Pandey y D. Singh. 2011. Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3-4): 339-353.
- Singh, S., A. Tripathi, D. Maji, A. Awasthi, P. Vajpayee y A. Kalra. 2019. Evaluating the potential of combined inoculation of *Trichoderma harzianum* and *Brevibacterium halotolerans* for increased growth and oil yield in *Mentha arvensis* under greenhouse and field conditions. *Industrial Crops and Products*, 131: 173-181.
- Soto N., M. Pfeiffer y M. Galleguillos. 2019b. Caracterización y cuantificación de suelos bajo sellamiento debido a expansión urbana en Chile. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 7 al 11 de Octubre. Montevideo, Uruguay.
- Soto, L., M. Galleguillos, O. Seguel, B. Sotomayor y A. Lara. 2019a. Assessment of soil physical properties' statuses under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(1): 12-23.
- Suárez, F., E. Gúzman, J. Muñoz, J. Bachmann, C. Ortiz, C. Alister y M. Kogan. 2013. Simazine transport in undisturbed soils from a vineyard at the Casablanca valley, Chile. *Journal of Environmental Management*, 117: 32-41.
- Takazawa, Y., R. Verdugo, P. Richter, K. Kitamura, J. Choi, S. Hashimoto, H. Ito, Y. Shibata y M. Morita. 2004. Current levels of dioxins in surface soils from Santiago, Chile. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 73(3): 543-550.
- Tchernitchin, A., N. Lapin, L. Molina, G. Molina, N. Tchernitchin, C. Acevedo y P. Alonso. 2006. Human exposure to lead in Chile, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 185: 93-139.
- Torsvik, V., L. Øvreås y T. Thingstad. 2002. Prokaryotic diversity--magnitude, dynamics, and controlling factors. *Science*, 296(5570): 1064-1066.
- Tosso, J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile. 712p.
- Tume, P., J. Bech, B. Sepúlveda, L. Tume y J. Bech. 2008. Concentrations of heavy metals in urban soils of Talcahuano (Chile): a preliminary study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140: 91-98.
- Tume, P., N. Roca, R. Rubio, R. King y J. Bech. 2018. An assessment of the potentially hazardous element contamination in urban soils of Arica, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 345-357.
- Unda, A., y F. Ravera. 1994. Análisis histórico de los sitios de establecimiento de plantaciones forestales en Chile. En: Espinosa, M., H. Knockaert y J. Millán (Eds.) *Seminario Erosión, Cultivos y Recuperación de Suelos*. Corporación Chilena de la Madera (CORMA). Santiago, Chile. pp. 13-22.
- Universidad de Chile. 2005. Informe País. Estado del Medio Ambiente en Chile. Centro de Análisis de Políticas Públicas. Santiago, Chile. 371p.
- Universidad de Chile. 2011. Informe final proyecto CORFO-Innova Chile: Sistemas de Producción Sustentable para Ecosistemas de Montaña (Santiago Andino). Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 612 pp.
- Universidad de Chile. 2018. Informe final proyecto: Elaboración del plan maestro para un distrito de conservación de suelos, aguas y bosques en la comuna de San José de Maipo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 311 pp.
- Veit, H., 1996. Southern Westerlies during the Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in the Norte Chico, Northern Chile (27–33 S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 123: 107-119.
- Verdejo, J., R. Ginocchio, S. Sauvé, P. Mondaca y A. Neaman. 2016. Thresholds of copper toxicity to lettuce in field-collected agricultural soils exposed to copper mining activities in Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(1): 154-158.
- Wagg, C., S. Bender, F. Widmer y M. Van der Heijden. 2014. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14): 5266-5270.
- Wang, Z., D. Forsyth, B. Lau, L. Pelletier, R. Bronson y D. Gaertner. 2009. Estimated dietary exposure of Canadians to perchlorate through the consumption of fruits and vegetables available in Ottawa markets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(19): 9250-9255.
- Wilson, T., J. Cole, C. Stewart, S. Cronin y D. Johnston. 2011b. Ash storms: impacts of wind-remobilised volcanic ash on rural communities and agriculture following the 1991 Hudson eruption, southern Patagonia, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 73(3): 223-239.
- Wilson, T., J. Cole, S. Cronin, C. Stewart y D. Johnston. 2011a. Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Volcan Hudson, Patagonia: lessons for recovery. *Natural Hazards*, 57(2): 185-212.
- Zhang, Q., J. Acuña, N. Inostroza, M. Mora, S. Radic, M. Sadowsky y M. Jorquera. 2019. Endophytic bacterial communities associated with roots and leaves of plants growing in Chilean extreme environments. *Scientific Reports*, 9(4950).
- Zhao, Y., D. Feng, L. Yua, X. Wang, Y. Chen, H. Hernández, M. Galleguillos, C. Estades, G. Biging, J. Radke y P. Gong. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment* 183: 170-1