

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUELOS BAJO
SELLAMIENTO DEBIDO A EXPANSIÓN URBANA EN 9 CIUDADES DE
CHILE**

Nicolás Emilio Soto Martínez

Santiago, Chile

2021

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUELOS BAJO
SELLAMIENTO DEBIDO A EXPANSIÓN URBANA EN 9 CIUDADES DE
CHILE**

**CHARACTERIZATION AND QUANTIFICATION OF SOILS UNDER
SEALING DUE TO URBAN EXPANSION IN 9 CITIES OF CHILE**

Nicolás Emilio Soto Martínez

Santiago, Chile




2021

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE SUELOS BAJO
SELLAMIENTO DEBIDO A EXPANSIÓN URBANA EN 9 CIUDADES DE
CHILE**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero Agrónomo

Nicolás Emilio Soto Martínez

Profesor Guía		Calificaciones
Sr. Profesor Marco Pfeiffer J. Ingeniera Agrónomo, M. Sc., Ph. D.		7,0
Sr. Profesor Mauricio Galleguillos. Ingeniero Agrónomo, M. Sc., Dr.		6,6
Profesores Evaluadores		
Sr. Profesor Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.		6,6
Sra. Profesora María de la Luz Hurtado P. Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc., Dra.		6,5

Santiago, Chile

2021

*“Prometemos una vida de derroche y despilfarro, en el fondo constituye una cuenta regresiva contra la naturaleza, y contra la humanidad como futuro. Civilización contra la sencillez, contra la sobriedad, contra todos los ciclos naturales, pero peor, civilización contra la libertad que supone tener tiempo para vivir las relaciones humanas, lo único trascendente amor, amistad, aventura, solidaridad, familia. (...) Hoy es tiempo de empezar a batallar para preparar un mundo sin fronteras. La economía globalizada no tiene otra conducción que el interés privado de muy pocos (...) la gran tarea para nuestros pueblos, en nuestra humilde manera de ver, es el todo. (...) Sería imperioso lograr consensos planetarios para desatar solidaridad hacia los más oprimidos, castigar impositivamente el despilfarro y la especulación. Movilizar las grandes economías, no para crear descartables con obsolescencia calculada sino bienes útiles, sin frivolidades, para ayudar a levantar a los más pobres del mundo. (...) Si, la alta política entrelazada con la sabiduría. (...) Nuestra época es portentosamente revolucionaria como no ha conocido la historia de la humanidad, pero no tiene conducción consciente, o menos conducción simplemente instintiva, mucho menos todavía conducción política organizada, porque ni siquiera hemos tenido filosofía precursora. (...) Necesitamos gobernarnos a nosotros mismos, o sucumbiremos, (...) este es nuestro dilema, pensemos en las causas de fondo, en la civilización del despilfarro, en la civilización del insistir que lo que está tirando es tiempo de vida humana malgastado ¡derrochando en cuestiones inútiles! piensen que la vida humana ¡es un milagro! ¡que estamos vivos por milagro! y nada vale más que la vida, y que **es nuestro deber biológico**, y por encima de todas las cosas, **respetar la vida e impulsarla, cuidarla, procrearla y entender que la especie es nuestro nosotros.**”*

Extracto discurso José “pepe” Mujica,
68ª Asamblea general de la Organización de las Naciones Unidas,
Septiembre 2013.

AGRADECIMIENTOS

En estos párrafos me gustaría partir agradeciendo el apoyo de mi familia en este largo camino, de aciertos y errores, los cuales pude recorrer principalmente por la curiosidad y las ansias de aprendizaje que fueron cultivadas en mí, por mi madre y padre, con la intención de entregarme una vida mejor que la vivida por ambos. De cada uno de los detalles que me entregaron, estoy agradecido y feliz, ya que son esas las herramientas que me permiten ser quien soy y lograr las metas que me he fijado. Agradezco a cada una de las tantas personas con las que he compartido este viaje, entre ellos el Lomo, Javierito, Foncho, Gonzalo, Camilo, Maca bafana bafana, Mauro, Xivo y muchas otras personas, que estoy seguro de que faltan, quienes trajeron humanidad a este espacio académico transformándose en la familia “elegida”.

Quiero agradecer a mis amigas del colegio (The MVP: Most Valuable Person) por su amistad y compañía, la Dani, Tania, Loreto, Sergio y Fernando, quienes han conocido todas mis transmutaciones y hemos compartido casi la vida entera como amistad, son ellos quienes me han permitido volver a la raíz, al centro, al origen, para volver a renacer y seguir creciendo en la vida.

Agradezco también a la profe Samantha Tapia, profesora de Química, quien fuera mi mentora en las ciencias naturales, no solamente por sus destacables conocimientos en la materia, sino que también por su calidad humana y su visión espiritual del mundo, lo que me permitió encontrar una brecha en donde se encuentran ciencia y espiritualidad.

Agradezco el apoyo fraterno de mi profesor guía, Marco, por la posibilidad de realizar una memoria diferente, en donde pude sentirme conforme y realizado, con la intención de generar un pequeño aporte a la protección del recurso suelo, en concordancia con mi sentir espiritual hacia la protección de la vida.

Finalmente, y no por eso menos importante, agradezco infinitamente a Andrea por su apoyo en la construcción de este documento, en plena pandemia, superando un montón de procesos, tanto personales como colectivos, mostrándome su amor en cada pequeño gesto, de esos que son necesarios para subir la moral y continuar resiliente frente a la vida. Solamente tú sabes lo que esto ha significado para mí.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Contexto regional	6
Área de Estudio	6
Suelos con alta Saturación de Bases (SB)	8
Suelos con horizonte Argílico	9
Suelos con horizonte Cámbico	9
Andisols típicos (<i>Trumaos</i>).....	10
Aquic Andisols (<i>Ñadis</i>)	10
Suelos arenosos del Holoceno (<i>Arenales</i>)	10
Contexto de uso del suelo	10
Materiales	11
Método.....	12
1. Estimación de expansión urbana en ciudades del centro y sur de Chile	12
2. Caracterización y cuantificación de suelos arables bajo sellamiento.....	14
RESULTADOS.....	16
Santiago	17
Rancagua.....	20
Talca	21
Chillán.....	22
Los Ángeles	23
Temuco	24
Valdivia.....	25
Osorno.....	26
Puerto Montt	27
DISCUSIÓN	29
CONCLUSIONES	32
BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	38

Índice de cuadros

Cuadro 1. Procedencia de la cartografía digital de suelos utilizado como referencia inicial, para el cálculo de la expansión urbana y método utilizado para cada una de las ciudades.....	15
Cuadro 2. Áreas de suelo selladas según CUS, en el período determinado para cada una de las ciudades.....	16
Cuadro 3. Caracterización y cuantificación de suelos perdidos por expansión urbana para la ciudad de Santiago, identificando las Series de suelo, área total por cada Serie y área según Capacidad de Uso de Suelo (CUS).	18
Cuadro 4. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Rancagua, según CUS.	20
Cuadro 5. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Talca, según CUS.	21
Cuadro 6. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Chillán, según CUS.	22
Cuadro 7. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Los Ángeles, según CUS.	24
Cuadro 8. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Temuco, según CUS.	25
Cuadro 9. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Valdivia, según CUS.	26
Cuadro 10. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Osorno, según CUS.	27
Cuadro 11. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Puerto Montt, según CUS.	28

Índice de figuras

Figura 1. Zona geográfica donde se ubican las ciudades estudiadas (en rojo); a la izquierda, se encuentran los pisos vegetacionales según Luebert y Pliscoff (2018); a la derecha, es posible visualizar el mapa de climas según Köppen-Gieger (Beck <i>et al.</i> , 2018) a lo largo del territorio chileno.....	7
Figura 2. Ejemplo de delineamiento en la ciudad de Talca; en rojo se visualiza el resultado del uso de la herramienta “Polígono” en GoogleEarth para el año 2019.	14
Figura 3. Distribución de área sellada total según Capacidad de Uso de Suelo para las 9 ciudades cuantificadas.....	16
Figura 4. Suelos sellados por expansión urbana entre los años 1981 y 2016, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Santiago.....	17
Figura 5. Suelos sellados por expansión urbana entre 1984 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Rancagua.....	20
Figura 6. Suelos sellados por expansión urbana entre 1985 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Talca.	21
Figura 7. Suelos sellados por expansión urbana entre 1988 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Chillán.....	22
Figura 8. Suelos sellados por expansión urbana entre 1988 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Los Ángeles.	23

Figura 9. Suelos sellados por expansión urbana entre 1989 y 2019 , según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Temuco.	24
Figura 10. Suelos sellados por expansión urbana entre 2003 y 2019 , según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Valdivia.....	25
Figura 11. Suelos sellados por expansión urbana entre 2003 y 2019 , según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Osorno.....	26
Figura 12. Suelos sellados por expansión urbana entre 2003 y 2019 , según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Puerto Montt.	27
Figura 13. Fracciones de suelo sellado (%) según su Capacidad de Uso de Suelo (CUS) para las 9 ciudades en estudio.	29

RESUMEN

La zona centro y sur de Chile posee una combinación privilegiada de clima y suelos fértiles, lo que ha generado que sea la zona más poblada de Chile. Esta condición genera una presión sostenida sobre el recurso suelo, destacándose la rápida expansión de zonas urbanas, la cual ha sido señalada como el cambio de cobertura de suelo más relevante a nivel mundial, con un impacto neto negativo en su capacidad para entregar servicios críticos para el bienestar humano. En este trabajo se presenta una caracterización de los suelos sellados por expansión urbana en un período promedio de 28 años en el área correspondiente a las ciudades de Santiago, Rancagua, Talca, Chillán, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt. Se realizó un análisis espacial de la información mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando la información de las cartografías digitales de suelos, junto a una estimación de la expansión urbana al año 2016, para el caso de Santiago, y al año 2019 para las otras ciudades. A partir de lo anterior, se calculó el área total de sellamiento y el área de suelos sellada según su Clase de Capacidad de Uso de Suelo agrícola (CUS). Se determinó que el área total sellada corresponde a 46.809 ha, en donde se utilizaron 39.987 ha de suelos de calidad alta (CUS entre I-IV) equivalentes al 85% de la expansión total. La mayor superficie comprometida corresponde a la ciudad de Santiago, con 31.756 ha. Se estimó que, del área total sellada, los suelos con CUS III sufrieron el mayor impacto en superficie, ya que contuvieron el 33% de la expansión urbana total, seguidos por aquellos de Clase II con un 22% y Clase I con un 16%. La pérdida de suelos, considerados como suelos de alta productividad agrícola, es el reflejo de la falta de planificación territorial, a lo que se suma la escasa superficie con potencial agrícola en Chile. Es urgente el desarrollo y adaptación de políticas públicas de planificación territorial efectivas, con normas y reglamentos, que consideren la calidad de los suelos y sus funciones ecosistémicas.

Palabras clave: Sellamiento de suelos; pérdida de suelos; clase de capacidad de uso; suelos agrícolas.

ABSTRACT

The central and southern zone of Chile has a privileged combination of climate and fertile soils which has made it to be the most populated area in Chile. This condition generates a sustained pressure on the soil resource, highlighting the rapid expansion of urban areas, the latter pointed out as the most relevant land cover change worldwide, with a negative net impact on its ability to deliver critical services for the human well-being. This work presents a characterization of soils sealed by urban expansion in a period of 28 years on average, in the area corresponding to the cities of Santiago, Rancagua, Talca, Chillán, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno and Puerto Montt. This was achieved doing a spatial analysis of the information, using Geographic Information Systems (GIS), considering the information from digital cartographies, together with an estimate of urban expansion to 2016, for Santiago, and to 2019 for other cities. After that, total sealing area and sealed soil area according to their Agricultural Land Use Capacity Class (LCC), was calculated. It was determined that total sealed area corresponds to 46,759 ha, where 39,938 ha of high-quality soils were used (LCC I to IV) equivalent to 85% of total expansion. The biggest committed surface was associated with Santiago with 31,756 ha. It was estimated that, in-between all of total area sealed, soils with LCC III suffered the greatest impact on surface, since they contained 33% of total urban expansion, followed by those with LCC II with 22% and LCC I with 16%. This loss of soil, considered as soils of high agricultural productivity, is the reflection of the lack of territorial planning, taking into account the scarce surface of arable soils in Chile. It is urgent to develop and adopt effective public policies in territorial planning, with rules and regulations considering quality of soils and their ecosystem functions.

Keywords: Soil sealing; soil loss; land use capacity class; agricultural soils.

INTRODUCCIÓN

Todos los suelos, manejados activamente o no, proveen servicios ecosistémicos relevantes, y las funciones específicas que proveen se rigen, en gran parte, por el conjunto de propiedades biológicas, físicas y químicas que los caracterizan (FAO, 2015). Cada suelo posee su propio set de variables, las cuales tienden a un estado pseudo estacionario a escala humana, en el cual existe una cantidad semejante de material de entrada y de salida, pero que, con grandes desequilibrios, producen cambios rápidos en sus propiedades (Buol et al., 2011). Son estas propiedades del suelo, inherentes y manejables, las que constituyen el capital natural de éste y permiten el funcionamiento y la entrega de servicios ecosistémicos para satisfacer las necesidades de la humanidad (Gregor *et al.*, 2018).

Explícitamente, los ecosistemas pueden proveer bienes materiales tangibles que son esenciales para la vida, como los alimentos, madera y medicinas, así como ayudar a asegurar el flujo de agua limpia y protegernos de inundaciones (Haines-Young y Potschin, 2010). Se ha observado que el uso indiscriminado de los suelos genera cambios en la capacidad de los ecosistemas en la entrega de servicios críticos para el bienestar humano (Haberl *et al.*, 2007); sin embargo, los servicios ecosistémicos son poco reconocidos y generalmente no están bien entendidos (Dominati *et al.*, 2010). Como resultado de la acción humana, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas mundiales ha cambiado más rápidamente en la segunda mitad del siglo XX que en ningún otro momento de la historia humana, en donde la magnitud de estos cambios está creciendo a medida que aumenta el tamaño de la población y la intensidad de la actividad económica (Corvalán *et al.*, 2005).

El cambio de uso del suelo representa la alteración humana más sustancial sobre el sistema terrestre (Vitousek *et al.*, 1997). Dentro de este, el proceso de urbanización es el factor más importante en la disrupción de la integridad del ecosistema y contribuye a la degradación de la calidad ambiental (Milano *et al.*, 2017), siendo una de las fuerzas antropogénicas más visibles del planeta (Wang *et al.*, 2018). Esta transformación, sumada a la fuerte expansión de áreas agrícolas, ha provocado un gran incremento del consumo de energía, agua y fertilizantes, junto a la pérdida de biodiversidad de los ecosistemas donde se distribuyen (Foley, 2005). Yang y Zhang (2015) afirman que la compactación es la más seria de las degradaciones físicas del suelo, disminuyendo la densidad aparente y la porosidad. En particular, el proceso de sellado del suelo por expansión urbana, genera una restricción o impedimento para el intercambio de energía, agua y gases, provocando una presión creciente sobre los suelos adyacentes no sellados (Scalenghe y Marsan, 2009).

Por otra parte, el aumento en la frecuencia e intensidad de condiciones climáticas extremas ha impactado negativamente en la seguridad alimentaria y los ecosistemas terrestres, como también ha contribuido a la desertificación y la degradación de la tierra en muchas regiones (IPCC, 2019). Junto a lo anterior, cabe agregar que la pérdida de la seguridad alimentaria puede verse directamente exacerbada por el cambio climático, debido a los impactos sobre los rendimientos asociados a condiciones más cálidas y secas

esperadas en regiones de actividad agrícola importante (Hasegawa *et al.*, 2018). Estas condiciones, junto con la creciente demanda por alimentos, ha generado fuertes aumentos en las áreas de tierras de cultivo y las necesidades de agua para riego (Koch *et al.*, 2018). En el caso de Chile, el crecimiento urbano que ha caracterizado a las ciudades, ha significado el reemplazo sistemático de áreas agrícolas y vegetación nativa por superficies construidas de manera heterogénea respecto de su densidad, diseño y presencia de áreas verdes (Hidalgo *et al.*, 2009). En ese contexto, las zonas periurbanas de las grandes ciudades, han sido aquellos lugares circundantes a las ciudades que han recibido hasta el 70% de la población que migra desde zonas agrícolas y rurales debido a catástrofes naturales (sequías), la falta de empleo, educación, servicios médicos, etc., y se caracterizan por sus elevadas tasas de crecimiento (COAG, 1999).

Chile es considerado un país con relativamente alta urbanización (Gallardo *et al.*, 2018)¹. Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la población de Chile supera los 17 millones de habitantes, de los cuales alrededor de 7 millones de personas se ubican en la Región Metropolitana de Santiago, siendo esta la Región más habitada del país (INE, 2018)². Para el año 2003, Romero y Ordenes (2004)³ afirman que el área metropolitana se apoderó de cerca de 65.000 ha de la cuenca del Maipo, incrementando su área en 27.000 ha entre los años 1975 y 2010 (Puertas *et al.*, 2014)⁴, áreas que eran anteriormente en su mayoría utilizadas para agricultura. Valores actualizados por algunos autores⁵ afirman que el área metropolitana alcanzó los 776 km² para el año 2016.

Considerando lo anterior, es menester el conocimiento y la protección de los suelos del territorio, ya que el futuro de la seguridad alimentaria solo puede asegurarse con un área de suelos fértiles y agua suficientes para la producción de alimento (Montanarella y Vargas, 2012). Es por eso por lo que este documento presenta la caracterización de la expansión urbana y consecuente sellamiento de suelos de las principales ciudades localizadas en la zona productiva agrícola del centro y sur de Chile.

¹ Gallardo, L., F. Barraza, A. Ceballos, M. Galleguillos, N. Huneus, F. Lambert et al. 2018. Evolution of air quality in Santiago: The role of mobility and lessons from the science-policy interface. *Elementa Science of the Anthropocene* 6(38): 23p.

² INE (Instituto Nacional de Estadísticas), Chile. 2018. Síntesis resultados Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.

³ Romero, H. and F. Ordenes. 2004. Emerging urbanization in the Southern Andes: Environmental impacts of urban sprawl in Santiago de Chile on the Andean piedmont. *Mountain Research and Development* 24(3): 197-201.

⁴ Puertas, O., C. Henríquez and F. Meza. 2014. Assessing spatial dynamics of urban growth using an integrated land use model. Application in Santiago Metropolitan Area, 2010–2045. *Land Use Policy* 38: 415–425.

⁵ Gallardo, Op. Cit., p. 4.

Objetivo General

Caracterizar y cuantificar la expansión urbana sobre suelos agrícolas de las principales ciudades del Valle Longitudinal Central de Chile.

Objetivos específicos

- Estimar la expansión urbana, dentro de los últimos tres decenios, de 9 ciudades del centro y sur de Chile, entre las cuales se consideraron:
 - Santiago
 - Rancagua
 - Talca
 - Chillán
 - Los Ángeles
 - Temuco
 - Valdivia
 - Osorno
 - Puerto Montt

- Caracterizar y cuantificar los suelos agrícolas bajo sellamiento producto de la expansión urbana de las ciudades mencionadas, en función de la Serie y la Clase de Capacidad de Uso.

MATERIALES Y MÉTODO

Contexto regional

En tramo centro sur del país (33°S - 42°O aproximadamente), se encuentra el Valle Longitudinal Central, el que se encuentra flanqueado hacia el oriente por la Pre – Cordillera de Los Andes y hacia el poniente por los cerros de la Cordillera de la Costa (Luzio *et al.*, 2010). Con un ancho que varía entre 50 y 100 km, sus límites son difusos debido a los diversos agentes que alteran el paisaje como sedimentos aluviales, cenizas volcánicas eólicas, flujos de lahares aluviales y algunos sedimentos glaciares (Casanova *et al.*, 2013).

Sin embargo, Chile posee un 17% de tierras en Clase de Capacidad de Uso de Suelo (CUS) I a V (6,9 millones de ha). En total, solamente un 3,3 % de la superficie del país corresponde a suelos con mejores aptitudes agrícolas, cuya CUS corresponde a I, II y III, equivalentes a 2.526.723 ha (CAPP, 2019), las cuales se encuentran en su mayoría en el Valle Longitudinal Central y se ven amenazadas por la expansión de sus ciudades.

Área de Estudio

Las ciudades de Santiago (33°S-70°O), Rancagua (34°S-70°O), Talca (35°S-71°O), Chillán (36°S-72°O), Los Ángeles (37°S-72°O), Temuco (38°S-72°O), Osorno (40°S-73°O) y Puerto Montt (41°S-72°O), se encuentra ubicadas en el Valle Longitudinal Central, mientras que la ciudad de Valdivia (39°S-73°O), a diferencia de las anteriores, se encuentra emplazada en la Cordillera de La Costa (Figura 1).

La ciudad de Santiago posee clima temperado, con veranos secos, calurosos (Csa) a cálidos (Csb), al igual que la ciudad de Talca. En el caso de Rancagua, esta ha sido clasificada únicamente como clima temperado, con veranos secos y calurosos (Csa). Desplazándonos hacia el sur, las ciudades de Chillán, Los Ángeles y Temuco se emplazan en las zonas de clima temperado, con verano seco y cálido (Csb), mientras que Valdivia, Osorno y Puerto Montt se encuentran en zonas climáticas templadas, sin estación seca y veranos calurosos (Beck *et al.*, 2018). Las precipitaciones varían de norte a sur entre 380 mm y 1862 mm en promedio anual para los últimos 30 años (CCCR, 2020). Las condiciones climáticas del Valle Longitudinal Central, con régimen de precipitaciones intensos y variables, fueron establecidas hace 3.300 años aproximadamente, asociado con un probable incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos de El Niño (ENOS) y a un fortalecimiento de la influencia estacional de los Vientos del Oeste (Ormeño, 2007), los cuales alternan altas y bajas presiones, las cuales se movilizan y asocian a perturbaciones frontales de latitudes medias (Rutland, 2004).

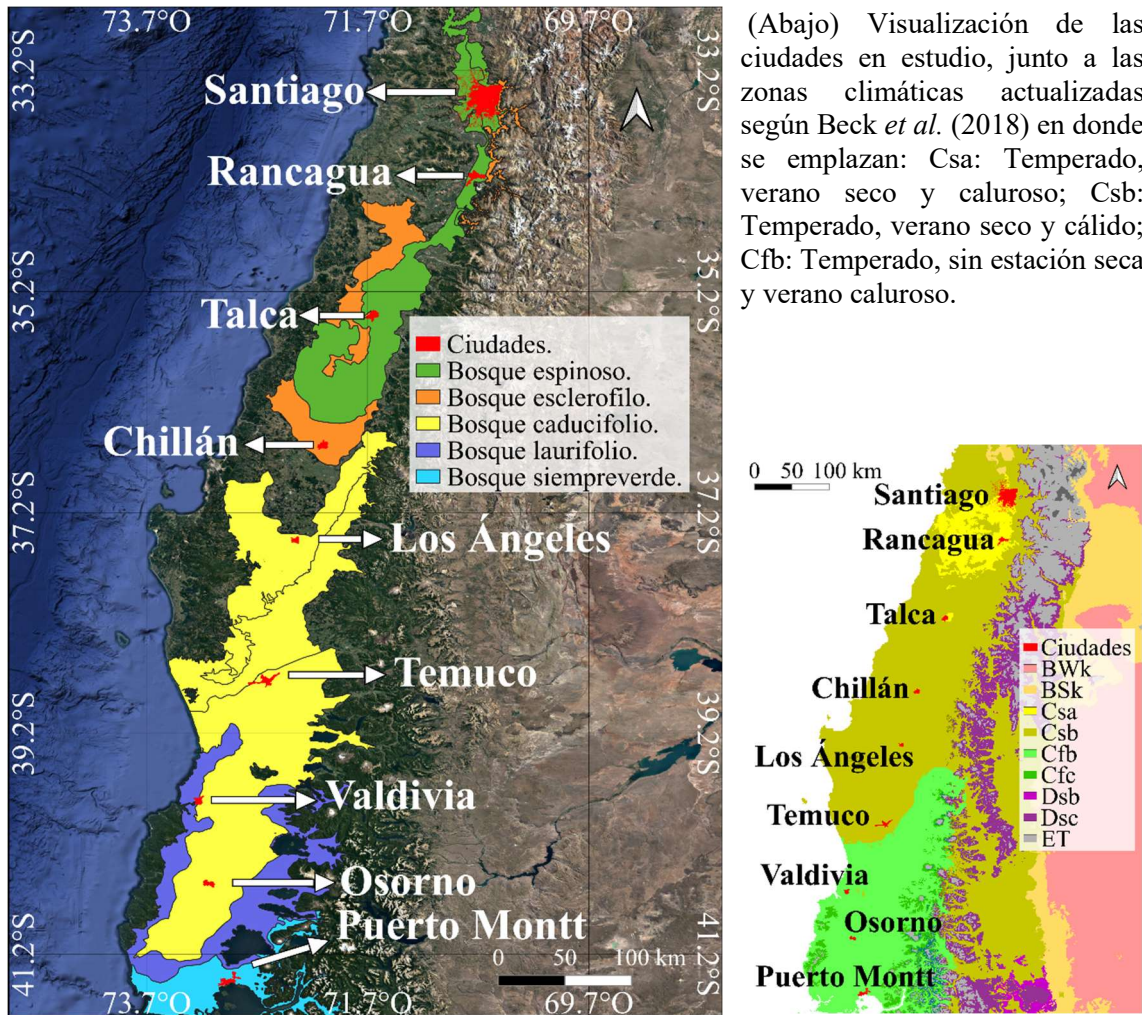


Figura 1. Zona geográfica donde se ubican las ciudades estudiadas (en rojo); a la izquierda, se encuentran los pisos vegetacionales según Luebert y Pliscoff (2018); a la derecha, es posible visualizar el mapa de climas según Köppen-Gieger (Beck *et al.*, 2018) a lo largo del territorio chileno.

El Valle Longitudinal Central posee un relleno que consiste en sedimentos de edades entre el Mioceno tardío hasta el Cuaternario (Ramos *et al.*, 2014; Charrier *et al.*, 2007), los cuales alcanzan una profundidad de hasta 500 m bajo la ciudad de Santiago (Araneda *et al.*, 2000). Según el SERNAGEOMIN (2003), las ciudades de Santiago, Rancagua, Chillán y Los Ángeles se encuentran emplazadas sobre depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, mientras que, en la medida que se avanza hacia el sur, comienzan a hacerse presente los depósitos fluviales, como es el caso de Temuco y Osorno, relleno que posee influencia volcánica, ya que posee depósitos piroclásticos posteriores a la última glaciación (Bertrand y Fagel, 2008). Estos depósitos volcánicos aumentan su espesor hacia el sur y cobran mucho mayor importancia en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos, en donde se depositan por sobre depósitos morrénicos, fluvio glaciales y glaciofluviales, como es el caso de la ciudad de Puerto Montt (Besoain, 1985), cuyos rasgos glaciales se encuentran asociados a la última glaciación (Lowell *et al.*, 1995).

A lo largo del territorio en estudio (Figura 1), las zonas más planas contenían sabanas leñosas (espinales) compuestas principalmente por *Acacia caven* y *Prosopis chilensis*, lugares que hoy albergan las ciudades de Santiago, Rancagua y Talca. Más al sur, comenzaba a tomar mayor presencia el llamado “matorral esclerófilo”, con especies típicas como *Peumus boldus*, *Cryptocarya alba* y *Quillaja saponaria*, entre otros. Este tipo de bosque se ubicaba en laderas (a la altura de Santiago), expresándose con esplendor donde se encuentra hoy emplazada la ciudad de Chillán. A partir de allí, el bosque esclerófilo comienza a dar paso a los bosques de hoja caduca, compuesta principalmente por *Nothofagus obliqua*, extendiéndose desde Los Ángeles hasta Osorno. En la ciudad de Valdivia (C. de la Costa), la vegetación predominante corresponde al bosque de hoja ancha (laurifolio), conocido como la “selva valdiviana” con especies como *Laurelia sempervirens*, *Luma apiculata* y *Aextoxicon punctatum*. Alrededor de los 41°S en Los Andes y 41°30' en la costa, el bosque de hoja ancha es reemplazado por los bosques lluviosos siempreverde nor-patagónico, compuesta por grandes árboles de la familia Nothofagaceae: *N. dombeyi*, *N. nitida*, y *N. betuloides* los cuales se encuentran entremezclados con bosques de coníferas de *Podocarpus nubigenus* y *Fitzroya cupressoides*, territorio donde se encuentra edificada la ciudad de Puerto Montt (Moreira-Muñoz, 2011).

Según Casanova (2013) en esta zona existen diferencias topográficas, desde terrazas aluviales con superficies casi planas hasta colinas con pendiente de hasta 20%, generando una amplia variabilidad de suelos, con predominio de suelos derivados de tefra del Holoceno y Pleistoceno. El autor, describe 6 grandes grupos de suelos:

1. Suelos con alta Saturación de Bases
2. Suelos con horizonte Argílico
3. Suelos con horizonte Cámbico
4. Andisols típicos (*Trumao*)
5. Aquic Andisols (*Ñadis*)
6. Suelos arenosos del Holoceno (*Arenales*)

Estos fueron descritos de acuerdo con sus regímenes de humedad de suelo y temperatura, considerando propiedades morfológicas, características geomorfológicas y desarrollo pedogenético. A continuación, se presenta un breve resumen de los grupos anteriormente mencionados.

Suelos con alta Saturación de Bases (SB)

Se ubican en posiciones de terrazas aluviales, piedemontes y cuencas de sedimentación lacustre. La topografía es plana a casi plana, con pendientes que van desde 1 a 5%, con profundidad y clases texturales muy variables. Su Saturación de Bases (SB) es mayor a 65% en la mayoría de los casos. La mayoría de los suelos posee buen drenaje, presentando Clases de Capacidad de Uso (CUS) entre I y IV, dependiendo de la profundidad del sustrato rocoso. Estos suelos se encuentran bien representados en las ciudades de Santiago, Rancagua, Talca y Chillán. Los contenidos de Carbono Orgánico (CO) varían entre 1 y 8% con pH que varía entre 7,0 y 9,3 alrededor de la ciudad de Santiago y entre 5,3 y 7,9 al sur.

Suelos con horizonte Argílico

Estos suelos se ubican en colinas de pendientes entre 2 y 30%, son moderadamente profundos a profundos, con texturas medias a finas. Existen 2 grupos dominantes de suelos, aquellos ubicados cercano a la Cordillera de Los Andes en sedimentos fluvioglaciales y aquellos cercanos a la zona costera. Los primeros dominan entre los 34 y 36°S aproximadamente, con una SB que va descendiendo de norte a sur (desde 83 a 38%), pH entre 5,0 y 6,6 y valores de CO cercanos a 2,2%. Son clasificados con CUS entre II y IV. Estos suelos se encuentran bien representados en la ciudad de Talca, con la Serie del mismo nombre.

Cercanos al rango costero, estos suelos son profundos a moderadamente profundos, descansando sobre conglomerados fluvioglaciales o desarrollados directamente sobre roca, ubicados en posiciones de lomajes con pendientes predominantemente entre 8 a 15%. El horizonte superficial es franco arcilloso o franco arcillo limoso, el subsuelo (horizonte B) de todos ellos es de clase textural arcillosa. El pH varía entre 6,2 a 5,3 y su SB varía entre 31 y 65% a través del perfil.

Al sur de la ciudad de Temuco (39°S), las propiedades ándicas comienzan a aparecer, lo que puede considerarse una evidencia de que estos suelos se originaron a partir de antiguos depósitos de ceniza volcánica. La densidad aparente es usualmente mayor que 1 Mg/m³, la retención de P es sobre 50% y la concentración de Al_{ox}+1/2Fe_{ox} es siempre menor al 1%. Los suelos en pendientes de 2 a 5% son clasificados como III y IV de CUS, pero las Fases con pendientes de 15 a 20% son clasificadas como VII.

Suelos con horizonte Cámbico

Son suelos con diferentes orígenes y posiciones en el paisaje, pero que comparten la presencia de un horizonte cámbico. Un grupo corresponde a los suelos profundos y moderadamente profundos sobre terrazas aluviales con 1 a 3 % de pendiente y bien drenados. Otro grupo importante corresponde a los suelos delgados sobre duripán formado por brechas volcánicas, conglomerados o gravas con variado grado de meteorización. Los suelos desarrollados sobre terrazas aluviales tienen texturas finas a moderadamente finas, con clases texturales franco limosas y franco arcillo limosas en el horizonte superficial, franco arcillosas y arcillosas en el horizonte B, con SB<50% a través del perfil. Debido a condiciones de drenaje pobre a imperfecto en algunos de estos suelos, se les ha asignado la Clase III y IV de CUS. La densidad aparente se encuentra sobre los 1,0 Mg/m³ en todos los horizontes y todos los suelos, la retención de P puede ser inusualmente alto (80%), lo que indica alguna fuente o contaminación con material volcánico, con un pH en el rango débilmente ácido a través de todo el perfil. Los suelos ligeramente profundos y delgados que se encuentran limitados por un duripán de material volcánico presentan clases texturales franco limosa, arcillo limosa y arcillosa, con un ligero aumento de la fracción arcilla en los horizontes subsuperficiales. Todos estos suelos ocupan posiciones de terrazas aluviales planas o casi planas, con algunos casos de Fases pobremente drenadas, siendo asignados a las clases III y IV de CUS.

Andisols típicos (*Trumaos*)

Se encuentran al sur de la ciudad de Chillán, siendo derivados de cenizas volcánicas holocénicas y satisfaciendo todos los requerimientos para ser considerados Andisols. Son suelos profundos y moderadamente profundos localizados en terrazas aluviales recientes o remanentes, donde la ceniza volcánica original ha sido redepositada por el agua, con sustratos compuestos de gravas redondeadas y arenas intersticiales. Las clases texturales dominantes son franca limosa en superficie y franco arcillo limosa o arcillo limosa en profundidad. El CO varía entre 3 y 11% con una disminución gradual en profundidad; la SB es particularmente baja (<25%) en todos los suelos, alcanzando el 2% en algunos horizontes. Poseen buena clasificación para la mayoría de los casos, con CUS I, II y III, con solo algunos casos de Fases incluidas en IV y VI, principalmente debido al incremento de la pendiente o restricciones de drenaje.

Aquic Andisols (*Ñadis*)

Además de sus propiedades ándicas, estos suelos poseen restricciones de drenaje que son comunes entre ellos. Generalmente ocupan posiciones planas y deprimidas en el paisaje con depósito fluvio-glacial de gravas y arena como sustrato. Sobre estos depósitos, un duripán u horizonte plácico (fierrillo) se encuentra presente, impidiendo el paso del agua y las raíces. El fierrillo corresponde a una capa delgada (<2cm), extremadamente dura y cementada con Fe y Al. La profundidad depende de la posición del fierrillo, variando entre suelos delgados a profundos. Predomina a topografía casi plana (1 a 3%) hasta ligeramente ondulada (2 a 5%). Estos suelos, en general, poseen aptitudes para pasturas y en la mayoría de los casos existe una condición imperfectamente drenada o muy pobremente drenada, con CUS entre IV y VI; sin embargo, algunas Fases son moderadamente bien drenados y clasifican para II de CUS. Estos suelos se encuentran presentes en las ciudades de Osorno y Puerto Montt.

Suelos arenosos del Holoceno (*Arenales*)

Son aquellos suelos derivados de depósitos de arenas volcánicas en abanicos aluviales y terrazas del río Laja, en los alrededores de la ciudad de Los Ángeles, con textura gruesa alta estratificación. El sustrato puede ser grava y rocas en una matriz arenosa, ubicada más allá de los 160 cm. Las clases texturales son particularmente homogéneas, variando entre franco arenoso hasta arenoso. En general son suelos profundos y muy profundos con elevada permeabilidad, pero debido a la posición topográfica, pueden contener restricciones de drenaje. El contenido de CO varía entre 1,0 y 1,8% respectivamente, mientras que la SB aumenta en profundidad (desde 20 a 85%). Las Clases de CUS se encuentran entre IV y VI, principalmente debido a la textura gruesa del suelo.

Contexto de uso del suelo

Debido a la combinación privilegiada de clima y la gran variedad de suelos fértiles del Valle Longitudinal Central, esta zona soporta la presión sobre los recursos del suelo

provenientes de distintas fuentes y que va en aumento, como el crecimiento de las plantaciones de monocultivos de especies forestales exóticas, una agricultura en continua expansión, que además debe sostener un rápido crecimiento de la población concentrada en áreas urbanas de rápida expansión, la que contiene al 79% de las zonas urbanas e industriales del país (Echeverría *et al.*, 2006; Miranda *et al.*, 2017; Romero y Ordenes, 2004; Schulz *et al.*, 2010). Esto ha implicado un cambio rápido en el uso y cobertura del suelo durante los últimos 50 años (Echeverría *et al.*, 2006; Miranda *et al.*, 2017; Schulz *et al.*, 2010). Desafortunadamente solo una pequeña parte de los esfuerzos para la conservación han ido dirigidos a los ecosistemas más diversos y amenazados (Armesto *et al.*, 1998; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011; Squeo *et al.*, 2012). En este sentido, los suelos de la región mediterránea de Chile son de especial interés, ya que sostienen un punto crítico o *hotspot* de biodiversidad, así como también a los suelos más productivos y una población en rápido crecimiento en áreas urbanas en rápida expansión (Armesto *et al.*, 2007; Casanova *et al.*, 2013; Gallardo *et al.*, 2018).

Materiales

Se realizó un trabajo de digitalización de cartografía de suelos hacia capas vectoriales en formato *shapefile* (.shp) de las regiones Metropolitana, de O'Higgins, del Maule, de Ñuble, del Bío-Bío, de la Araucanía, de Los Ríos y de Los Lagos, a partir estudios de suelos realizados por diferentes instituciones, complementada con los materiales y símbolos. Los estudios utilizados y su fecha de elaboración son:

- Estudio de suelos del proyecto Maipo (CNR, Agrolog Chile Ltda., 1981)
- Descripciones de suelos VI Región: Estudio agrológico provincia de Cachapoal (IREN, 1984)
- Descripciones de suelos: estudio agrológico área Maule Norte - 2a. etapa, VII Región (CIREN, 1985)
- Estudio de suelos proyecto Itata. Etapa II (CNR, Agrolog Chile Ltda., R&Q Ingeniería Ltda., 1988)
- Descripciones de suelos y materiales y símbolos: Estudio agrológico de la provincia de Cautín (CORFO, 1989)
- Estudio Agrológico X Región: Descripciones de suelos Materiales y Símbolos (CIREN, 2003), el que corresponde a una actualización de los siguientes estudios:
 - Estudio de Suelos de la Provincia de Valdivia (IREN, 1974)
 - Carta Agrológica de los Suelos de Ñadis de la Provincia de Osorno (CORFO, 1966)
 - Proyecto Aerofotogramétrico (CHILE/OEA/BID, IREN 1964)

Además, se dispuso de la información en imágenes de formato *raster* proporcionada por el laboratorio de monitoreo y modelación de ecosistemas (LabMME) de la Universidad de Chile y que se encuentra publicado en Gallardo *et al.* (2018). Este mapa consiste un mapa de cobertura de suelos generado mediante técnicas satelitales de clasificación supervisada y consiste en una matriz de celdas (*pixel*), en filas y columnas, en la que cada una de ellas contiene alguna clase de cobertura de suelos. Cada *pixel* de esta imagen corresponde a un área de 30 x 30 m². El mapa cubre gran parte de la Región Metropolitana

donde se localiza la ciudad de Santiago, clasificada según 11 coberturas de uso de suelo, entre ellos suelo urbano, vegetación manejada y no manejada, cuerpos de agua, etc.

La información proveniente de los estudios agrológicos y archivo *raster* de Santiago, fueron trabajadas y procesadas en los *softwares* libres Q-Gis versión 3.12.1-Bucuresti y R-studio versión 1.3.1093, mientras que, para las otras 8 ciudades, se utilizó además el programa GoogleEarth pro versión 7.3.3.7786.

Método

La metodología utilizada para cumplir con los objetivos, consistió en separar entre:

- Procesos estimación del área urbana, sobre GoogleEarth y Q-Gis para todas las ciudades en estudio, a excepción de la ciudad de Santiago, en la cual, su estimación se realizó íntegramente sobre Q-Gis, debido a la procedencia de la información de coberturas de suelo.
- Procesos de caracterización y cuantificación de los suelos arables bajo sellamiento, según Serie de suelo y Capacidad de Uso de Suelo, utilizando Q-Gis y R-Studio para todas las ciudades, obteniendo como producto una serie de archivos en formato *Excel*, con el listado de Series de suelo ordenadas por ciudad, separadas según su Clase de Capacidad de Uso de Suelo (CUS), junto con un reporte de la expansión urbana de cada ciudad.

1. Estimación de expansión urbana en ciudades del centro y sur de Chile

1.1. Ciudad de Santiago

El archivo *raster* proporcionado por el LabMME, contenía información de 11 coberturas de uso de suelo, las cuales se reclasificaron para agrupar las variantes de suelo urbano (1. Urbano intensivo, 2. extensivo y 3. Concreto urbano) del archivo original. Este procedimiento se realizó en Q-Gis siguiendo la ruta:

>*Raster*>*Calculadora de raster*

Se utilizaron las herramientas de la Calculadora de *raster* para seleccionar y reagrupar las coberturas de suelo (Anexo ANEXOS1), obteniendo un nuevo archivo *raster* pero con 5 coberturas de suelo (1. Urbano, 2. Vegetación, 3. Agua, 4. Suelo y rocas y 5. Nieve y glaciares). Cabe destacar que la elaboración de este tipo de archivos, precisa la utilización de números decimales que dificultan el proceso de conversión hacia archivos vectoriales, es decir, hacia información geométrica en forma de puntos, líneas o polígonos, como es el caso de los archivos tipo *shape*. Por esto, se realizó un proceso de conversión en el que se transformó el número decimal a uno de tipo entero:

>*Raster*>*Conversión*>*Traducir*

Una vez realizado el proceso de traducción, se procedió a poligonizar el archivo *raster*:

>*Raster*>*Conversión*>*Poligonizar (raster a vectorial)*

Así se obtuvo un archivo de tipo vectorial con la información de la posición y forma de cada una de las coberturas de suelo. Aún con la información de esta última capa, se precisó unir cada cobertura como una misma parte sobre toda la capa, utilizando las herramientas vectoriales y con esto, se unificaron los distintos polígonos de una misma cobertura de suelo en un gran polígono, como sigue:

>Vectorial>Herramientas de geometría>Multiparte a monoparte

En este punto, fue necesario realizar una comprobación de los elementos que se formaron en los procesos anteriores. De esta forma, se utilizó la herramienta “Comprobar validez” la que entregó la información de las geometrías válidas, no válidas y los errores puntuales sobre la capa. Para solucionar ese problema, se procedió a corregir aquellas geometrías como sigue:

>Vectorial>Herramientas de geoprocetos>Comprobar validez

>Caja de Herramientas de procesos>Geometría vectorial>Corregir geometría

Una vez corregidas las geometrías de la capa, se seleccionó la información, con la herramienta “Selección por atributo” en la tabla de atributos de la capa, según cobertura de suelo urbano, para exportar una nueva capa de tipo vectorial (*shapefile*), conteniendo la información de la extensión de la ciudad para el año 2016, según el archivo *raster* del LabMME. Finalmente, se utilizó la herramienta “Calculadora de campos”, en la tabla de atributos de la capa, para generar el valor de área para cada uno de los polígonos, en unidades de metros, asociadas a los sistemas de coordenadas de la capa, valor que debió ser dividido por un factor de conversión para transformarlo en unidades de Hectáreas. Así se concreta la estimación del área urbana de la ciudad de Santiago para el año 2016, según las clasificaciones de cobertura de uso de suelo del archivo *raster*. Con esta capa se realizó la comparación con la cartografía digital de suelos de la región Metropolitana del año 1981, descrita en el segmento 2.

1.2. Ciudades de Rancagua, Talca, Chillán, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt

Para este grupo de ciudades, se utilizó GoogleEarth para realizar la estimación del área urbana ante la ausencia de cartografías detalladas de estas ciudades. La herramienta “Polígono” en la barra superior del programa, permite elaborar geometrías sobre las imágenes proporcionadas por el mismo; con esto, se generó una delimitación de las ciudades de esta sección con las imágenes satelitales del programa, con fecha en marzo de 2019 (Figura 2). La información de estas capas geométricas fue exportada como archivo de formato de “lenguaje de marcado de *keyhole*” (KML), el cual, permite almacenar datos geográficos y su contenido, los cuales son reproducibles por Q-Gis. En esta última plataforma, se modificaron los atributos del archivo con la herramienta “Calculadora de campos”, con el fin de obtener el valor de área de los polígonos elaborados para cada ciudad y así cuantificar el área urbana de estas, en un proceso similar al utilizado con el polígono obtenido a partir del archivo *raster* de la ciudad de Santiago. El resultado de este procedimiento permitió realizar, más adelante, la comparación con la cartografía digital de suelos, para cada una de las ciudades, con su respectivo estudio agrológico, expuestos en la sección de materiales.

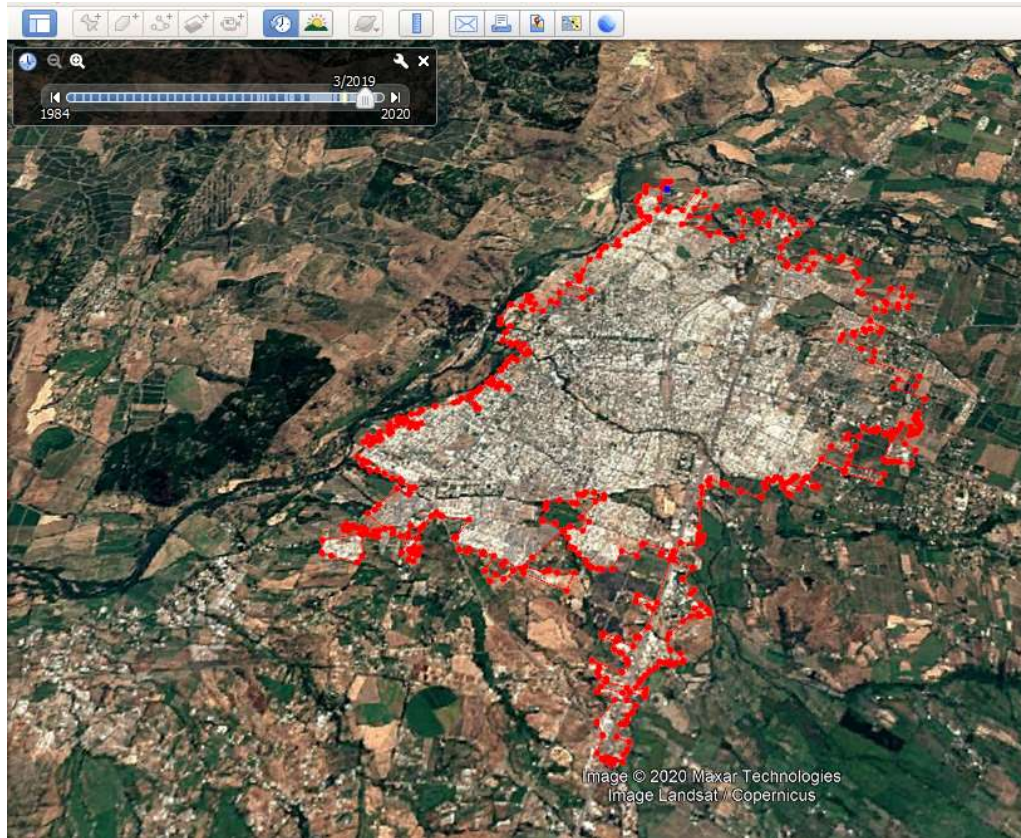


Figura 2. Ejemplo de delimitación en la ciudad de Talca; en rojo se visualiza el resultado del uso de la herramienta “Polígono” en GoogleEarth para el año 2019.

2. Caracterización y cuantificación de suelos arables bajo sellamiento

La cartografía digital de suelos, corresponde a un archivo vectorial (*shapefile*) ordenado según una matriz de datos (planilla), que contiene información de alguno de los atributos (columnas), de alguno de los polígonos o Series de suelo (filas), que se encuentran geolocalizados. Dentro de esta información, se encuentra el área que ocupan cada una de las Series de suelo, como también el área utilizada por el área urbana en el año en que se realizó el estudio agrológico.

En Q-Gis, se utilizó la herramienta “Cortar” para extraer la información, contenida en la cartografía digital de suelos, según la estimación del área urbana de cada una de las ciudades, delimitadas en el ítem 1.1 para la ciudad de Santiago y 1.2 para las otras 8 ciudades. Este procedimiento se llevó a cabo siguiendo la ruta:

>Vectorial>Herramientas de geoprocetos>Cortar

Se utilizó, como capa base, el archivo de la cartografía de suelos para obtener los atributos de esta, que cupieron dentro de la capa de superposición (área urbana). Un resumen de la procedencia de la cartografía digital de suelos, método utilizado en este estudio y período de expansión urbana calculada, para cada ciudad, se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Procedencia de la cartografía digital de suelos utilizado como referencia inicial, para el cálculo de la expansión urbana y método utilizado para cada una de las ciudades.

Ciudad	Cartografía digital de suelos (vectorial)	Fecha	Método área urbana	Fecha
Santiago	Est. de suelos del proyecto Maipo.	1981	Raster LabMME	2016
Rancagua	Est. agrológico provincia de Cachapoal.	1984	Polígono GoogleEarth	2019
Talca	Est. Agro. área Maule Norte - 2a. etapa, VII Región.	1985	Polígono GoogleEarth	2019
Chillán	Est. de suelos proyecto Itata. Etapa II.	1988	Polígono GoogleEarth	2019
Los Ángeles	Est. de suelos proyecto Itata. Etapa II.	1988	Polígono GoogleEarth	2019
Temuco	Est. agrológico de la provincia de Cautín.	1989	Polígono GoogleEarth	2019
Valdivia	Est. de Suelos de la Provincia de Valdivia	2003 (1974)	Polígono GoogleEarth	2019
Osorno	Carta agrológica suelos de ñadis: provincia de Osorno.	2003 (1966)	Polígono GoogleEarth	2019
Puerto Montt	Estudio de suelos del proyecto Aerofotogramétrico	2003 (1964)	Polígono GoogleEarth	2019

Las capas de suelos obtenidas con el paso anterior contuvieron toda la información relevante para la caracterización y cuantificación de los suelos bajo sellamiento para cada ciudad, sus Capacidades de Uso agrícola y la sección que corresponde al suelo urbano para la fecha en que fueron realizados los estudios (Cuadro 1). Esta información puede ser visualizada en la “Tabla de atributos” de cada capa. Aquí se utilizó la herramienta “Calculadora de campos” para calcular el área de cada unidad de suelo contenida en cada capa, expresada en hectáreas, para finalizar exportando la capa y guardada en formato de capa vectorial (.shp).

Una vez realizado este procedimiento, se procedió a utilizar el programa de ambiente estadístico R-studio para realizar la extracción de los valores de superficie (ha), para cada unidad de suelo. Se llevó a cabo un proceso de filtro, identificando cada Serie de suelo o polígono según su Capacidad de Uso de Suelo, y aquellos correspondientes a los suelos urbanos antiguos. Finalmente se realizó un recuento de la superficie total de los suelos de clases I, II, III, IV y superiores, como también la superficie urbana en la fecha en que fueron realizados los estudios (Cuadro 1). Esto permitió, conociendo el área total de cada capa, sustraer el área del urbano antiguo a la estimación de área urbana total de la sección 1, y obtener la expansión urbana dentro del periodo de cada ciudad. Todos los procedimientos realizados en R-Studio, se encuentran en el Anexo 2, donde se muestra un ejemplo de código para el filtrado de la información, como también el cálculo de expansión urbana, porcentajes y elaboración de planillas *Excel* para la organización de la información.

RESULTADOS

Las 9 ciudades estudiadas generaron una apropiación de 46.809 hectáreas en un período de 28 años en promedio, de las cuales 39.987 ha (85%) se construyeron sobre suelos arables, fraccionadas según muestra la Figura 3. Además, el Cuadro 2 presenta el área de suelos sellados, según su Clase de CUS para cada una de las ciudades.

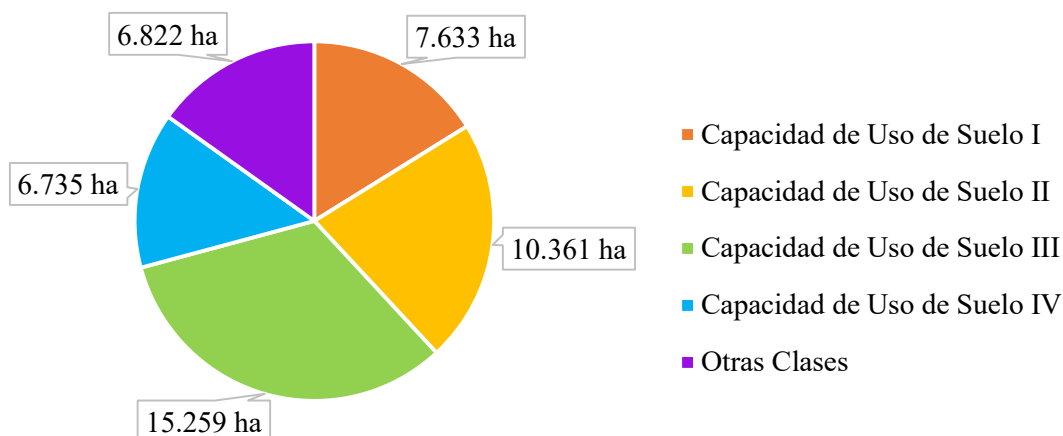


Figura 3. Distribución de área sellada total según Capacidad de Uso de Suelo para las 9 ciudades cuantificadas.

Cuadro 2. Áreas de suelo selladas según CUS, en el período determinado para cada una de las ciudades.

Ciudad	Período	Clases de Capacidad de Uso de Suelo (ha)				
		Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clases VI o más
Santiago	1981-2016	4.917,4	8.550,0	11.683,1	2.568,9	4.036,1
Rancagua	1984-2019	2.178,7	357,7	309	40,7	18,5
Talca	1985-2019	0	591,4	484,8	1.523,1	145
Chillán	1988-2019	3	366,7	276,8	306	55,7
Los Ángeles	1988-2019	533,6	183,5	375,4	109,4	55,9
Temuco	1989-2019	0	261,6	889,5	800,6	451,5
Valdivia	2003-2019	0	16,7	370,4	0	224,9
Osorno	2003-2019	0	33,2	574,2	2,1	46,2
Puerto Montt	2003-2019	0	0	295,6	1.384,5	1.788

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización y cuantificación de las Series de suelo arable para las 9 ciudades.

Santiago

La ciudad de Santiago generó una apropiación de 31.755 ha en un lapso de 35 años, de las cuales el 15% corresponden a suelos asignados a Clase I de Capacidad de Uso de Suelo, 27% a suelos de Clase II, 37% a suelos de Clase III, 8% a suelos de Clase IV y 13% para suelos de Clases VI a VIII, distribuidas como muestra la **Figura 4**.

A partir de la caracterización, se identificaron las Series Santiago, Maipo y Mapocho, como los suelos que mayor pérdida en área sufrieron, con 7.370 ha, 6.807 ha y 3.349 ha respectivamente. La caracterización y cuantificación de los suelos de la ciudad de Santiago se presentan en el Cuadro 3. Caracterización y cuantificación de suelos perdidos por expansión urbana para la ciudad de Santiago, identificando las Series de suelo, área total por cada Serie y área según Capacidad de Uso de Suelo (CUS).

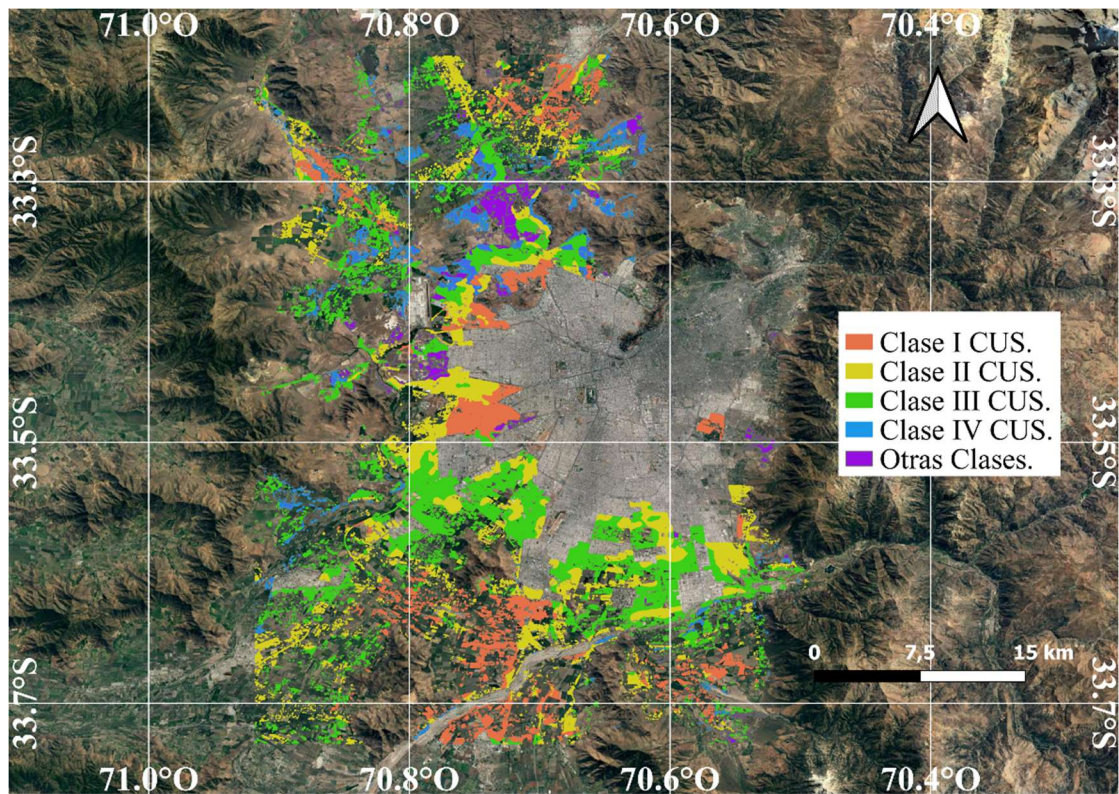


Figura 4. Suelos sellados por expansión urbana entre los años 1981 y 2016, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Santiago.

Cuadro 3. Caracterización y cuantificación de suelos perdidos por expansión urbana para la ciudad de Santiago, identificando las Series de suelo, área total por cada Serie y área según Capacidad de Uso de Suelo (CUS).

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Agua del gato	84,0	-	-	-	84,0	-
Asociación Challay	182,8	-	-	-	0,3	182,6
Asociación La Parva	325,5	-	-	-	5,2	320,2
Asociación Mansel	47,1	-	-	-	-	47,1
Barrancas	547,2	154,0	199,2	194,0	-	-
Batuco	1.063,9	-	-	360,0	284,3	419,6
Buín	349,2	251,2	98,0	-	-	-
Chape	479,1	-	224,3	254,9	-	-
Chicauma	180,8	-	179,3	1,5	-	-
Chicureo	603,9	-	319,8	139,4	144,7	-
Chincolante	211,9	-	-	121,2	-	90,7
Chinihue	51,9	-	44,7	7,2	-	-
Clarillo	178,7	148,7	-	28,3	1,8	-
Codigua	40,8	-	-	40,8	-	-
Colina	579,4	377,8	68,2	133,5	-	-
Cotuba	229,2	-	-	-	-	229,2
Cuesta Barriga	329,1	-	101,1	204,3	22,6	1,1
Esterro Seco	99,9	43,5	56,4	-	-	-
Guay Guay	460,7	-	-	6,5	250,3	204,0
Huechuraba	137,2	-	-	101,4	35,8	-
Huingán	211,0	164,7	6,5	31,9	7,9	-
Isla de Huechún	28,9	-	3,4	25,5	-	-
La Higuera	38,0	-	38,0	-	-	-
La Vilana	422,4	-	-	-	20,0	402,3
Lampa	849,8	264,6	188,1	321,2	59,4	16,6
Las Perdices	0,8	-	0,8	-	-	-
Linderos	155,0	18,6	57,1	59,6	19,8	-
Liray	274,4	98,3	97,7	73,0	5,4	-
Lo Aguirre	138,8	-	-	86,1	52,7	-
Lo Prado	9,5	-	9,5	-	-	-
Lo Vásquez	13,9	-	-	0,2	-	13,7
Lonquén	200,7	-	29,7	154,0	17,0	-
Los Cardenales	40,7	37,5	2,3	0,7	0,2	-

(Continúa)

Cuadro 3. Continuación

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Los Morros	344,8	-	250,9	45,4	17,1	31,4
Maipo	6.807,3	2.772,5	4.034,8	-	-	-
Mapocho	3.348,9	520,8	1.968,4	828,0	31,7	-
Mingaco	75,5	53,4	20,0	2,1	-	-
Misceláneos	843,3	-	-	-	-	843,3
Piedmont Estratificado	11,6	-	11,6	-	-	-
Peralillo	264,0	-	-	63,0	90,1	111,0
Pudahuel	940,6	-	-	165,1	-	775,5
Quilapilún	17,0	-	-	17,0	-	-
Quilicura	566,9	-	-	-	425,6	141,2
Rinconada de Lo Vial	605,7	-	254,2	351,4	-	-
Rungue	2,7	-	0,4	2,3	-	-
San Diego	10,9	-	10,9	-	-	-
Santa Sara	134,2	11,8	104,6	17,8	-	-
Santiago	7.369,8	-	-	7.235,9	105,3	28,6
Taqueral	263,7	-	12,3	70,9	154,3	26,2
Terrazas aluviales estratificadas	148,9	-	-	40,1	108,8	-
Urraca	1.355,0	-	157,8	420,5	624,8	151,8
Valdivia de Paine	78,4	-	-	78,4	-	-

Rancagua

La ciudad de Rancagua generó una apropiación de 2.905 ha en un lapso de 35 años, de las cuales 75% corresponden a suelos de Clase I, 12% a suelos de Clase II, 11% a suelos de Clase III, 1% a suelos de Clase IV y 1% para suelos de Clases VI y VII (Figura 5). Se identificaron las Series O'Higgins y Rancagua como los suelos que mayor pérdida en área sufrieron, con 1.440 ha y 930 ha respectivamente (Cuadro 4).

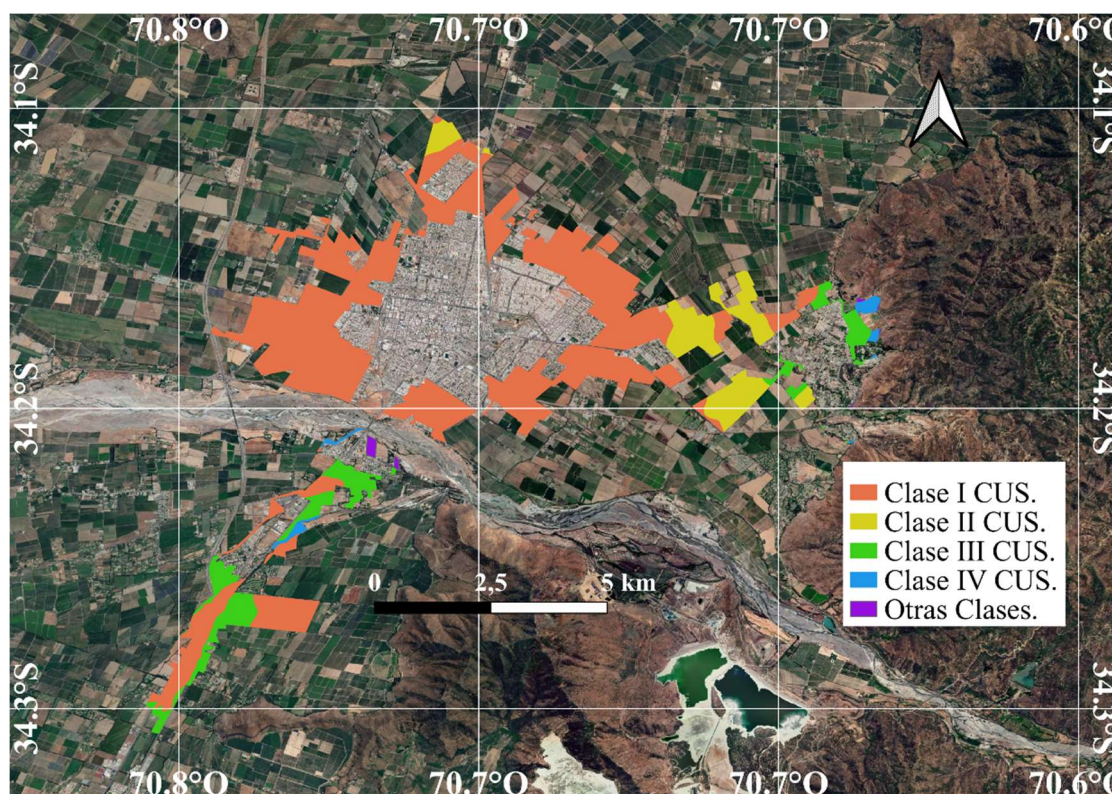


Figura 5. Suelos sellados por expansión urbana entre 1984 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Rancagua.

Cuadro 4. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Rancagua, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Asociación Sierra Bellavista	4,6	-	-	-	-	4,6
Cachapoal	238,0	-	-	233,9	4,1	-
Misceláneos	13,9	-	-	-	-	13,9
O'Higgins	1.439,9	1.118,5	300,4	21,0	-	-
Olivar	173,6	173,6	-	-	-	-
Pimpinela	89,0	-	14,0	54,0	21,1	-
Rancagua	929,9	886,6	43,3	-	-	-
Terraza aluvial rio Cachapoal	15,5	-	-	-	15,5	-

Talca

La ciudad de Talca generó una apropiación de 2.745 ha en un lapso de 34 años, de las cuales 22% corresponden a suelos de Clase II, 18% a suelos de Clase III, 55% a suelos de Clase IV y 5% para suelos de Clases VI a VIII (Figura 6). En este caso, destaca la Serie Talca, ya que la apropiación del área urbana se generó básicamente en suelos de Clase II, seguido por la Serie Perquín y Duao, sobre suelos de Clase III y IV (Cuadro 5).

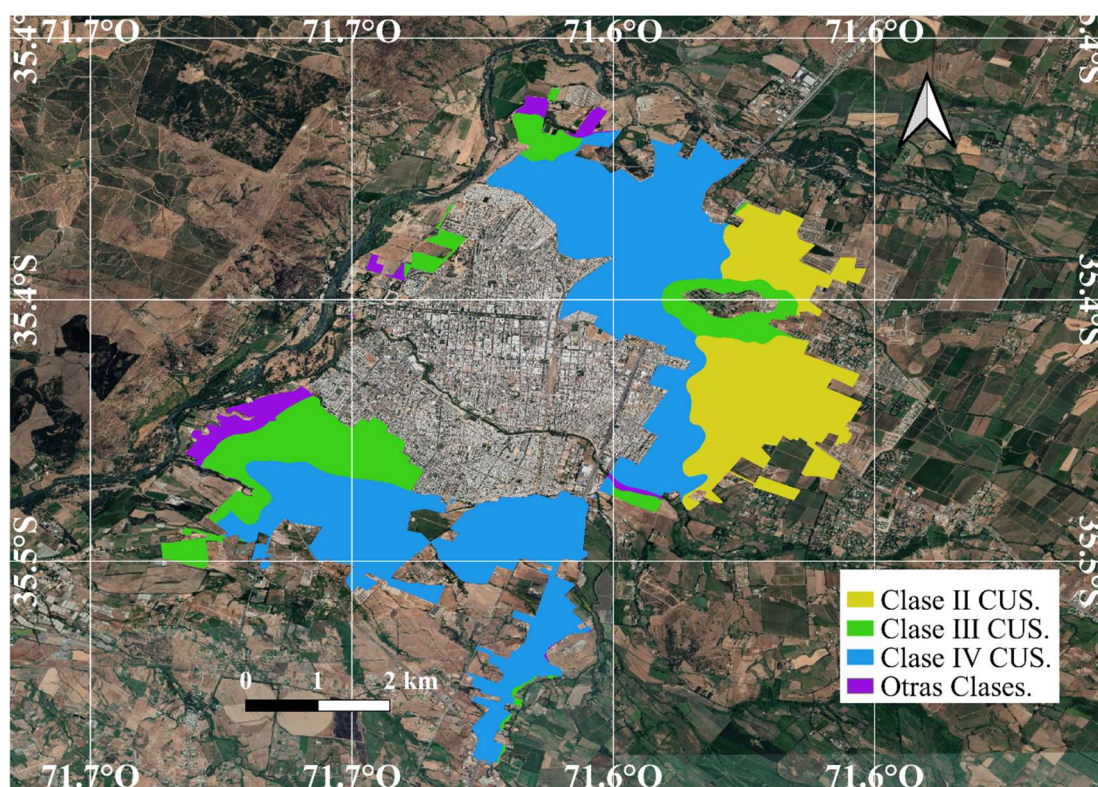


Figura 6. Suelos sellados por expansión urbana entre 1985 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Talca.

Cuadro 5. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Talca, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Asociación Pocillas	60,0	-	-	-	14,4	45,6
Duao	415,6	-	-	313,5	102,1	-
Linares	91,3	-	-	2,1	1,2	88,0
Maulecura	37,4	-	-	-	37,4	-
Misceláneos	11,4	-	-	-	-	11,4
Pangue	186,0	-	-	41,6	144,4	-
Perquín	488,8	-	-	3,9	484,9	-
Peumal	738,9	-	-	-	738,9	-

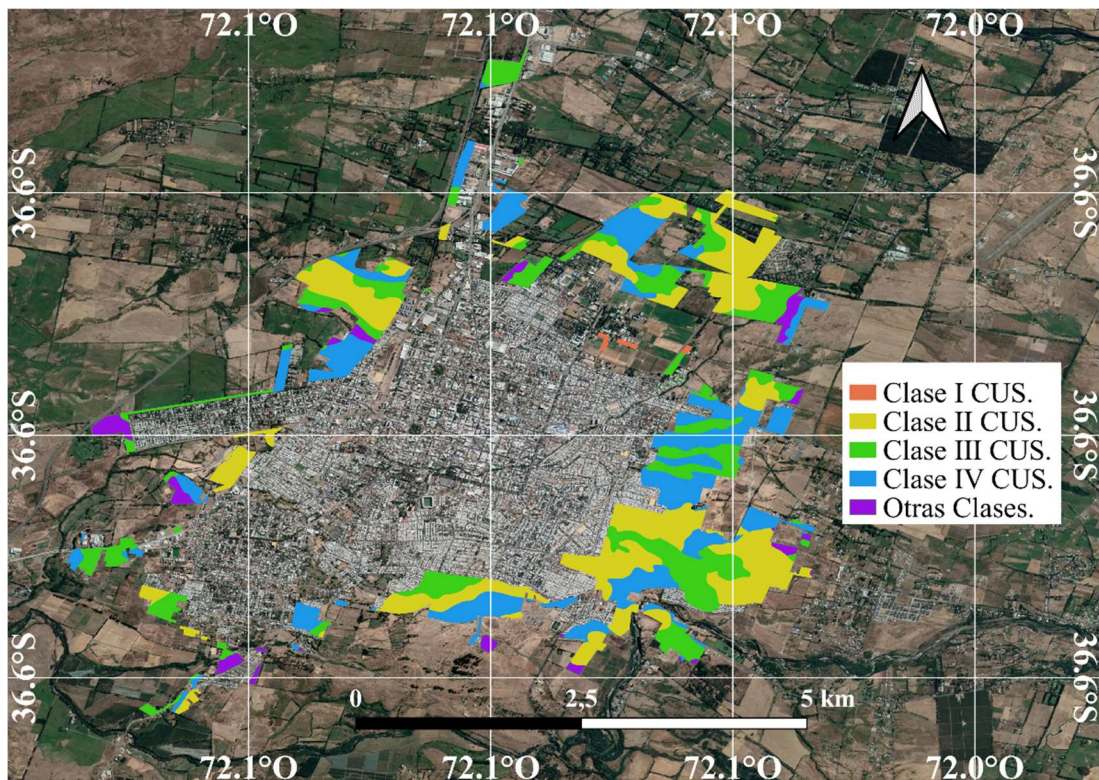
(Continúa)

Cuadro 5. Continuación.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
San Rafael	123,6	-	-	123,6	-	-
Talca	592,4	-	591,4	1,0	-	-

Chillán

En la ciudad de Chillán, se generó una apropiación de 1.008 ha en un lapso de 31 años, de las cuales menos del 1% corresponden a suelos de Clase I, 36% a suelos de Clase II, 27% a suelos de Clase III, 30% a suelos de Clase IV y menos del 6% para suelos de Clases VI a VIII (Figura 7). Se identificaron las Series Macal Poniente y Talquipén como las Series más afectadas, con 298 ha y 104 ha, respectivamente (Cuadro 6).

**Figura 7.** Suelos sellados por expansión urbana entre 1988 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Chillán.**Cuadro 6.** Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Chillán, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Arrayán	98,0	3,0	95,0	-	-	-
Bulnes	69,9	-	-	-	69,1	0,8
Chacayal	41,5	-	-	35,8	5,6	-

(Continúa)

Cuadro 6. Continuación.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Culénar	33,9	-	-	33,9	-	-
Gallipavo	36,9	-	-	36,9	-	-
Macal Poniente	298,1	-	183,5	40,5	74,2	-
Mebuca	96,1	-	31,4	64,7	-	-
Mirador	7,7	-	7,7	-	-	-
Misceláneos	21,1	-	-	-	-	21,1
Quella	57,8	-	-	-	57,8	-
Quilmén	132,4	-	-	-	98,5	33,8
Talquipén	103,7	-	49,1	54,5	-	-
Terrazas aluviales	10,5	-	-	10,5	-	-

Los Ángeles

Para la ciudad de Los Ángeles, la urbanización se apropió de 1.257 ha en un lapso de 31 años, de las cuales 42% corresponden a suelos de Clase I, 15% a suelos de Clase II, 30% a suelos de Clase III, 9% a suelos de Clase IV y 4% a suelos de Clase superior (VII) (Figura 8), concentradas mayoritariamente en tres Series de suelo. Los detalles de su caracterización y cuantificación se presentan en el Cuadro 7.

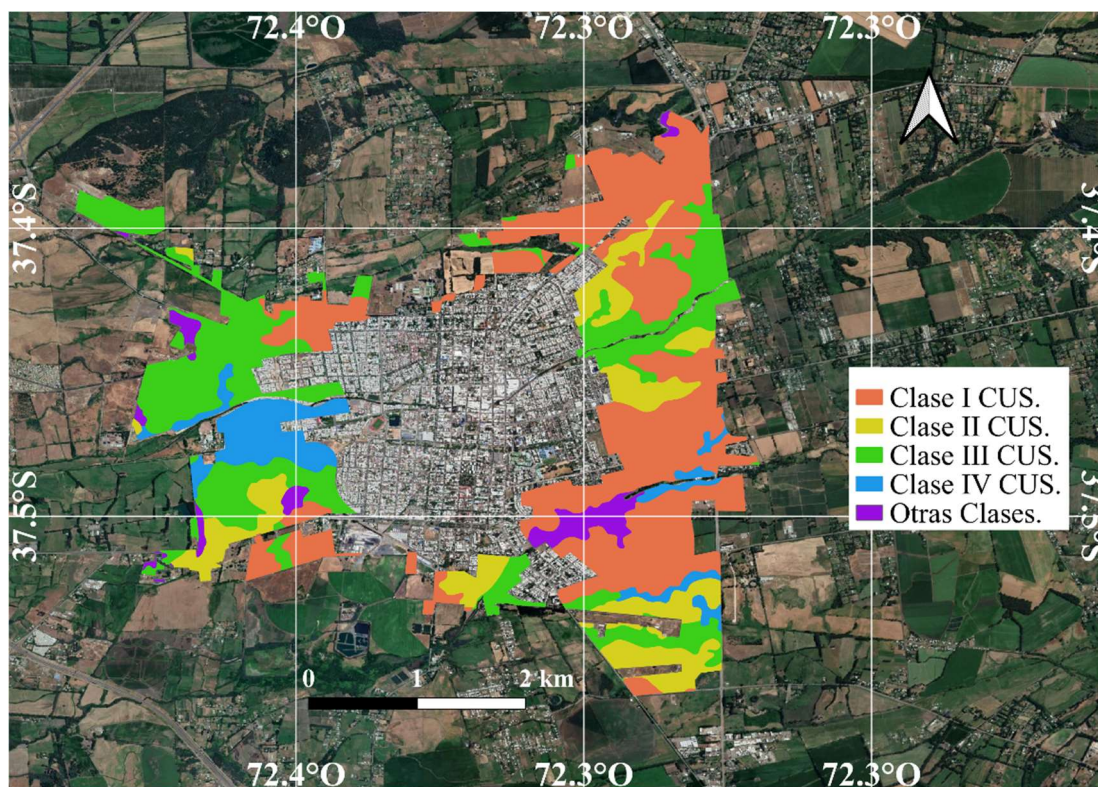


Figura 8. Suelos sellados por expansión urbana entre 1988 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Los Ángeles.

Cuadro 7. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Los Ángeles, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Arrayán	560,6	533,6	27,0	-	-	-
Mirador	381,6	-	155,6	226,0	-	-
Misceláneos	55,9	-	-	-	-	55,9
Pailihue	258,8	-	-	149,4	109,4	-

Temuco

En Temuco, la ciudad se apropió de 2.403 ha totales en un lapso de 30 años, de las cuales 11% corresponden a suelos de Clase II, 37% sobre suelos de Clase III, 33% sobre suelos de Clase IV y 19% para suelos de Clases VI a VIII (Figura 9). Aquí destacan las Series Metrenco con 690 ha y Temuco con 421 ha (Cuadro 8).

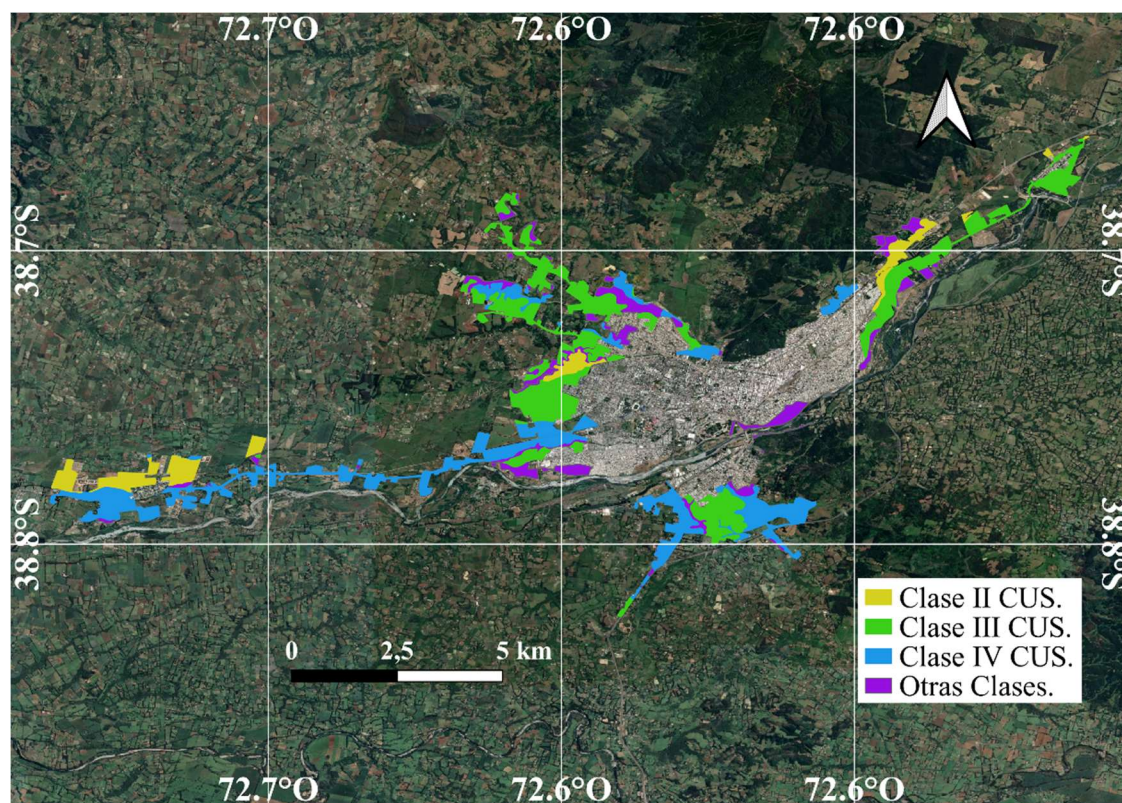


Figura 9. Suelos sellados por expansión urbana entre 1989 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Temuco.

Cuadro 8. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Temuco, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Barros Arana	194,8	-	-	-	194,8	-
Metrenco	823,4	-	44,8	467,0	178,3	133,3
Misceláneos	290,9	-	-	-	-	290,9
Nielol	27,3	-	-	-	-	27,3
Nueva Imperial	163,5	-	-	158,9	4,6	-
Pemehue	61,3	-	61,3	-	-	-
Temuco	420,5	-	155,5	33,8	231,2	-
Terrazas aluviales	191,7	-	-	-	191,7	-
Terrazas aluviales ceniza volcánica	229,9	-	-	229,9	-	-

Valdivia

La ciudad de Valdivia se apropió de 612 ha (Figura 10) en un lapso de 16 años, principalmente sobre suelo de Clase III de la Serie de Valdivia, caracterizada y cuantificada según muestra el Cuadro 9. Además, destacan Misceláneos, correspondientes a pantanos, aunque asignados a Clases VII y VIII.

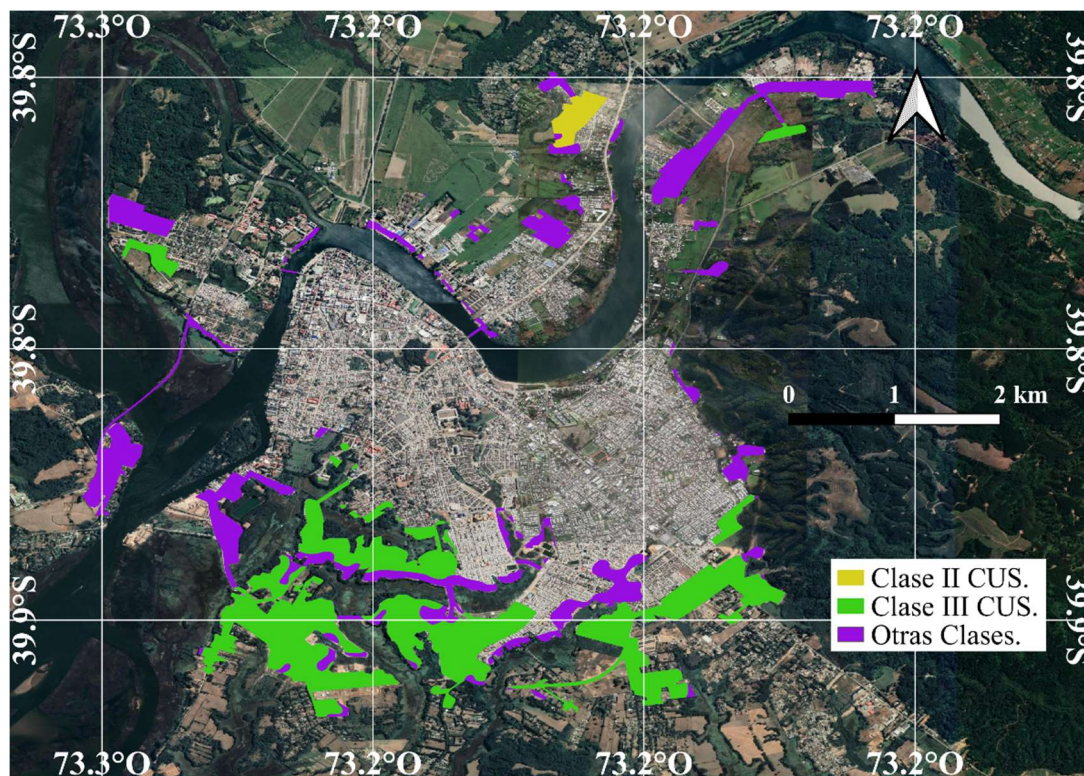


Figura 10. Suelos sellados por expansión urbana entre 2003 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Valdivia.

Cuadro 9. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Valdivia, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Asociación Tres Cruces	40,6	-	-	-	-	40,6
Los Ulmos	11,6	-	-	-	-	11,6
Misceláneos	126	-	-	-	-	126
Terrazas aluviales	46,6	-	-	-	-	46,6
Terrazas aluviales ceniza volcánica	42,2	-	-	42,2	-	-
Valdivia	344,9	-	16,7	328,2	-	-

Osorno

En el caso de la ciudad de Osorno, se urbanizaron 656 ha (Figura 11) en un lapso de 16 años, principalmente sobre las Series La Unión y Osorno, cuantificadas según muestra el Cuadro 10.

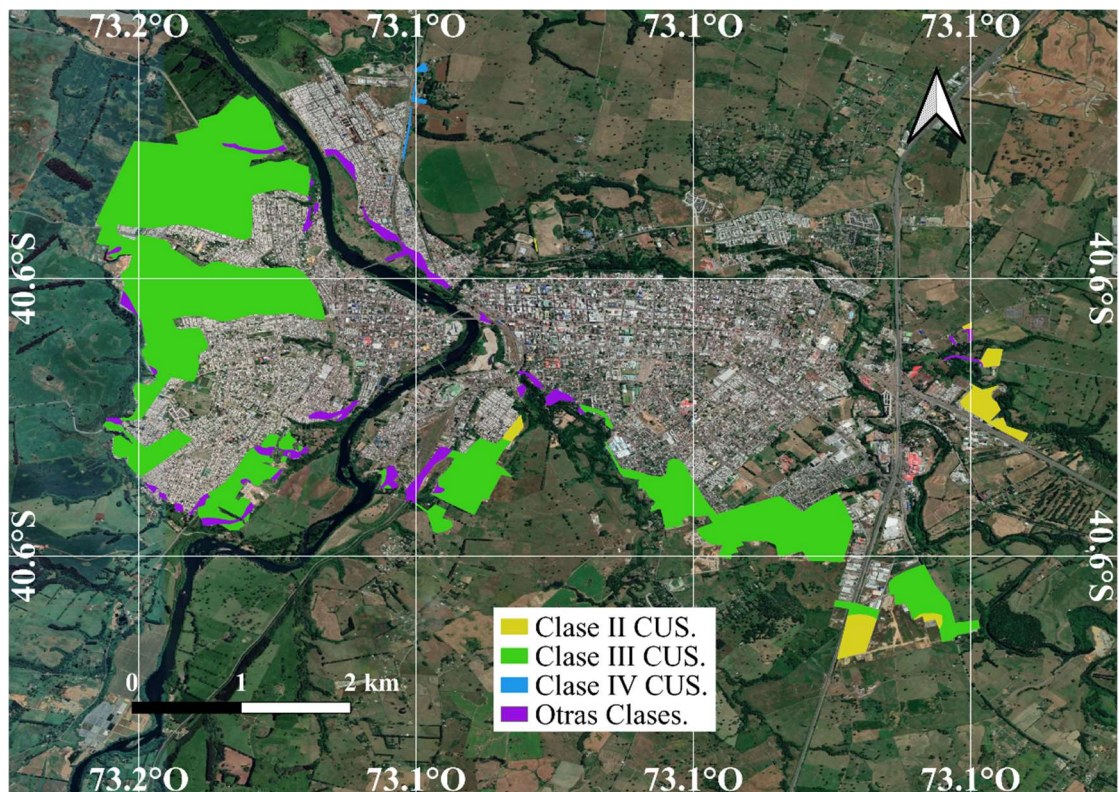


Figura 11. Suelos sellados por expansión urbana entre 2003 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Osorno.

Cuadro 10. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Osorno, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Frutillar	1,2	-	-	1,2	-	-
La Unión	341,8	-	-	339,7	2,1	-
Misceláneos	36,4	-	-	-	-	36,4
Osorno	264,6	-	33,2	231,4	-	-
Terrazas aluviales	11,2	-	-	1,3	-	9,8

Puerto Montt

Para la ciudad de Puerto Montt, el sellamiento por expansión urbana utilizó 3.468 ha (Figura 12) en un lapso de 16 años, cuantificadas según el Cuadro 11, sobre las Series Llanquihue y Puerto Montt. Dentro de los suelos no agrícolas, destacó la Serie Alerce la que contuvo aproximadamente el 52% de la expansión de esta ciudad.

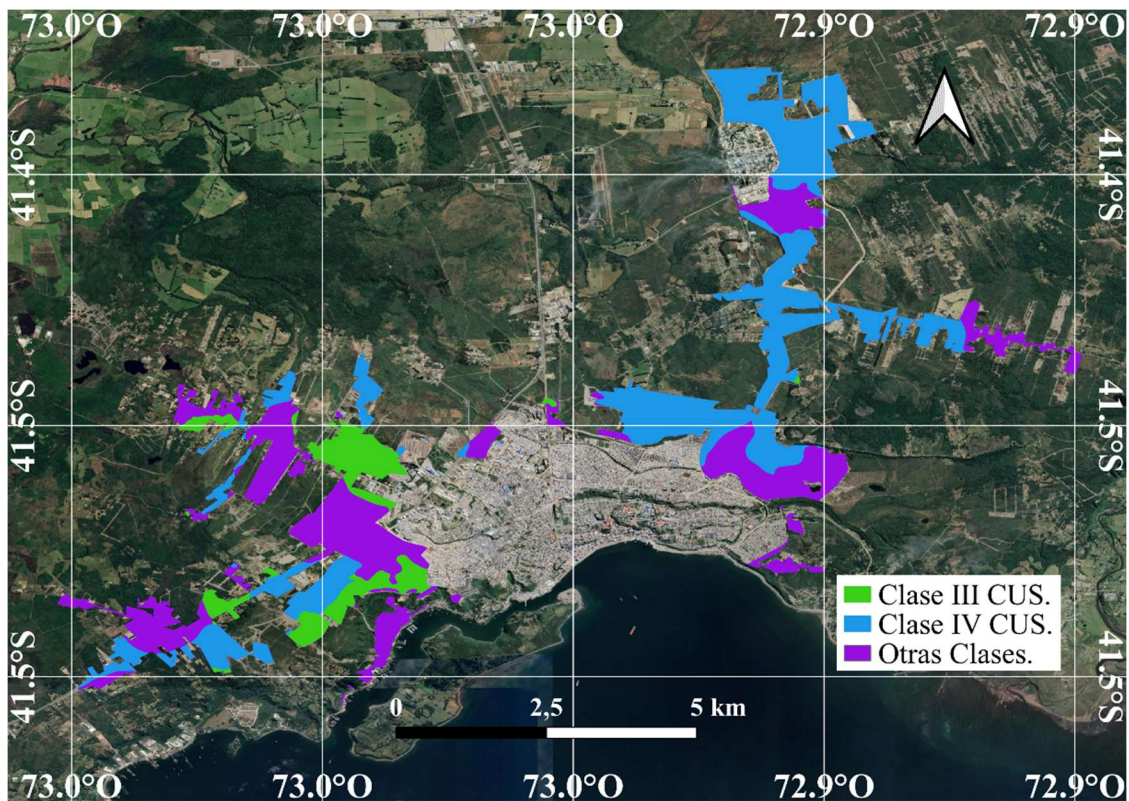


Figura 12. Suelos sellados por expansión urbana entre 2003 y 2019, según Capacidad de Uso de Suelo en la ciudad de Puerto Montt.

Cuadro 11. Caracterización y cuantificación de suelos por expansión urbana para la ciudad de Puerto Montt, según CUS.

Serie	Área total (ha)	CUS (ha)				
		I	II	III	IV	VI o más
Alerce	1.489	-	-	-	-	1.489
Llanquihue	1.225,5	-	-	17,9	1.207,6	-
Maullín	4,2	-	-	-	-	4,2
Misceláneos	197,2	-	-	-	-	197,2
Puerto Montt	552,2	-	-	277,7	176,9	97,6

Las limitantes de los suelos que generaron los rangos de variación (Fases) de estas Series, clasificadas entre II y IV de Capacidad de Uso de Suelos, estaban asociadas al movimiento del agua en el suelo, topografía y riesgos de erosión, principalmente. Entre los 32° y los 37°40'S (ciudades de Santiago, Rancagua, Talca, Chillán y Los Ángeles), estas variaciones estaban asociadas a presencia de estratas arenosas gruesas o con muchas gravas que limitan la retención de agua y la penetración de las raíces. A partir de los 38° a 41°S (ciudades de Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt), la topografía comenzó a tomar mayor relevancia como restricción, ya sea por riesgo de erosión en la utilización de riego tradicional, o por riesgos de inundación y erosión en la utilización de riego tradicional.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran cifras preocupantes respecto de la apropiación de suelos para la construcción de ciudades. En relación con el área total expandida de cada ciudad, Rancagua, Los Ángeles, Talca, Chillán y Osorno se han expandido en más del 90% sobre suelos arables (99%, 96%, 95%, 95% y 93% respectivamente), seguidas por Santiago y Temuco, con un no menor 87% y 81% respectivamente y cerrando la lista con Valdivia y Puerto Montt, con un 63% y 48% (Figura 13).

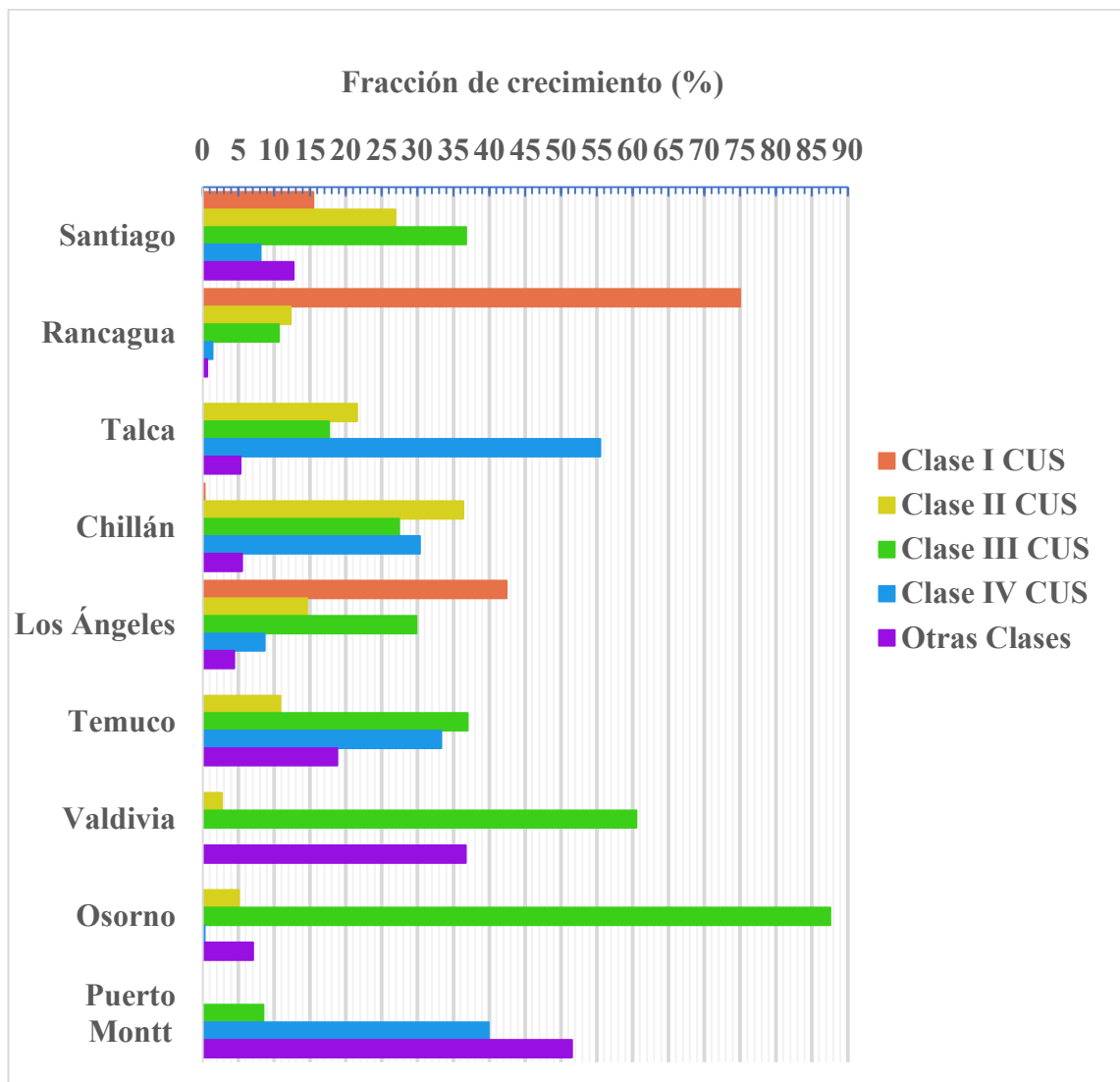


Figura 13. Fracciones de suelo sellado (%) según su Capacidad de Uso de Suelo (CUS) para las 9 ciudades en estudio.

En el caso de las ciudades de Santiago, Rancagua y Los Ángeles, se utilizaron un total de 7.630 ha de suelos de Clase I (4.917, 2.179 y 534 ha, respectivamente), suelos que no poseen limitaciones que interfieran en los manejos agrícolas. Estos suelos poseen la mejor

potencialidad para la producción de alimentos, por lo que su sellado podría interferir en la seguridad alimentaria de las futuras generaciones del país, ya que forzaría la utilización y adaptación de otros suelos con más limitaciones para la producción agrícola, aumentando la presión sobre el recurso.

A partir de esto, surgen interrogantes de relevancia respecto a la planificación del territorio nacional, considerando el hecho de que 8 de 9 ciudades crecieron en más de un 50% sobre suelos arables, los que son esenciales tanto para la alimentación, como para cumplir sus otras funciones ecosistémicas.

Un gran problema se deriva del no reconocimiento del suelo como recurso vital, ya que la práctica de pavimentación sobre suelos agrícolas de calidad alta, contribuye a la pérdida significativa de la productividad de los suelos (Koch *et al.*, 2013). Durante la dictadura militar (1973-1990), se emprendieron reformas económicas de privatización y liberación de los mercados urbanos, las que descansaron en 3 principios (Sabatini, 2000):

1. El suelo urbano no es un recurso escaso,
2. Los mercados son los mejores asignadores de tierra entre los distintos usos (Los usos del suelo deben ser decididos de acuerdo con su rentabilidad),
3. El uso del suelo debe regirse por disposiciones flexibles, definidas por los requerimientos del mercado

Este cambio paradigmático a la doctrina económica del neoliberalismo, promovió un creciente protagonismo de las leyes del mercado y la retirada del Estado de aquellos sectores donde entorpecía el libre juego de la oferta y la demanda, permitiendo el ingreso de un potente y dinámico sector inmobiliario en las ciudades chilenas (Borsdorf *et al.*, 2008). Así, las políticas de vivienda chilenas han estado excesivamente centradas en el volumen, descuidando aspectos críticos importantes para su efectividad a largo plazo, incluidos la calidad, ubicación y coordinación con otras políticas de desarrollo urbano, como el transporte público y uso de suelo urbano (OECD, 2013).

Según Giménez y Ugarte (2014), las herramientas con que el país cuenta para asegurar un desarrollo sustentable son insuficientes, ya que existen aspectos no resueltos en la planificación territorial, como la incorporación de los ecosistemas y las cuencas hidrográficas, entre otros. Además, las municipalidades, como entidad administrativa local, cuentan con pocas funciones exclusivas, mientras que las funciones compartidas se multiplican, generando duplicidades y superposiciones importantes, dificultando la planificación territorial (Vial, 2015). En ocasiones, como es el caso del área Metropolitana de Santiago, las 34 municipalidades que la componen poseen sus respectivas autoridades, quienes han intentado realizar instancias de coordinación, pero han sido voluntarias y dependen de la voluntad política de los participantes (Banzhaf *et al.*, 2013).

Debido a que los límites de producción y las prácticas de manejo están asociadas al estado y disponibilidad de agua, nutrientes y de los ciclos biogeoquímicos (Richardson y Kumar, 2017), y que estas prácticas tienden a maximizar la producción con aportes energéticos que causan desbalances en las tasas naturales de metabolismo medioambiental (Kumar *et al.*, 2018), es que la sustentabilidad del suelo no puede depender solamente de las

elecciones de manejo por agricultores, de los planificadores, o usuarios del territorio, sino que también de decisiones políticas sobre normas y reglamentos (Keesstra *et al.*, 2016). Esta problemática se presenta porque existe un vínculo directo entre urbanización y el deterioro de los recursos naturales, inseguridad alimentaria, pobreza y desarrollo sustentable (Hatab *et al.*, 2019).

Esta situación, como también las acciones para su mitigación, se encuentran explicitadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (*Sustainable Development Goals*) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (UN, 2015), ya que: “*representan una oportunidad para buscar consenso y acciones colaborativas frente a los actuales desafíos globales para lograr el fin de la pobreza, mejorar y ampliar la educación, enfrentar las consecuencias del cambio climático, defender la democracia y los derechos humanos*”, plan de acción al cual Chile se encuentra actualmente adscrito de manera voluntaria (Chile, 2019).

El auge económico de las ciudades no siempre va acompañado de un desarrollo urbano equilibrado, debido a que el capital suele acumularse en lugares donde se puedan extraer ventajas económicas y tasas de ganancias más elevadas en desmedro de otros lugares tales como zonas rurales o periurbanas (Terra, 2015). Sin embargo, cuando se desarrollan sistemas de uso de suelo sostenibles, con criterios económicos, ambientales y sociales en equilibrio, es necesario considerar las funciones del suelo para evitar desviaciones importantes de los procesos naturales que pueden ser difíciles de corregir (Bouma, 2006).

Si con esto consideramos que los límites de las regiones urbanas muestran tendencias que pueden aparecer en otros lugares (Kareiva *et al.*, 2007), se vuelve necesario el entendimiento de los sistemas de alimentación urbana para resolver los problemas de seguridad alimentaria (Smit, 2016), ya que el proceso de sellamiento conlleva a la modificación de los ecosistemas vecinos (Burghardt, 2006), como las zonas periurbanas, planteando nuevos problemas de acceso físico a los alimentos (Sonnino, 2016). Mientras los procesos de urbanización sigan ocurriendo, los gobiernos necesitan considerar urgentemente la mejor manera de monitorear los suelos urbanos y sus funciones (Rawlins *et al.*, 2015), ya que pueden no solo proveer de bienestar a los residentes, sino también aportar en la mitigación y adaptación al cambio climático (Calzolari *et al.*, 2020).

La motivación de este estudio consistió en generar un incentivo para el estudio del suelo desde una perspectiva predictiva, poniendo a disposición las herramientas computacionales de los Sistemas de Información Geográfica para poder evidenciar el reemplazo de suelos arables (Clases I – IV CUS) por suelo urbano en nuestro territorio y las consecuencias medioambientales que esto implica. La utilización de herramientas de programación podría abrir la posibilidad a valorizar los suelos según una o múltiples funciones, presentando tendencias de un determinado uso de suelo y así entregar información más detallada en la elaboración de nuevas políticas públicas o, incluso aún más importante, leyes que puedan estar orientadas en la protección de los recursos naturales y su utilización, como es el caso del suelo.

CONCLUSIONES

La metodología utilizada en este trabajo, permitió caracterizar y cuantificar la expansión urbana sobre suelos agrícolas, obteniendo una estimación de apropiación total de 46.759 hectáreas en un promedio de 28 años. Además, se caracterizó y cuantificó los suelos según su Clase de Capacidad de Uso de Suelos, entregando como resultado en formato *Excel* la cartografía digital correspondiente a cada ciudad. Finalmente, a partir de los resultados, se pudieron establecer las siguientes conclusiones:

La expansión urbana se está llevando a cabo sobre tierras con gran potencial agrícola, lo que ha generado una apropiación de 39.938 hectáreas de suelos arables, es decir, suelos de Clase de Capacidad de Uso de Suelo entre I y IV. Este valor equivale al 85% de lo expandido entre las 9 ciudades en estudio, siendo Santiago, Rancagua y Los Ángeles, las ciudades que más contribuyeron en el sellamiento de suelos de calidad alta (I, II y III). Además, se estimó que los suelos con Clase III sufrieron el mayor impacto en superficie, ya que contuvieron el 33% de la expansión urbana total, seguidos por aquellos de Clase II con un 22%, Clase I con un 16% y Clase IV con un 14%, lo que refleja una falta de planificación territorial en los cambios de uso de suelo, específicamente para la expansión urbana de estas ciudades.

Considerando la escasa superficie con potencial agrícola en Chile, urge el desarrollo y adopción de políticas de ordenamiento territorial efectivas, normativas y reglamentarias, que consideren la calidad de los suelos y sus funciones ecosistémicas como parte de su planificación, ya que esto genera un impacto no solo sobre la población del país, sino que también sobre el sector agropecuario, debido a que los suelos y su calidad, están íntimamente relacionados con el bienestar de la humanidad y la población de nuestro territorio en términos de seguridad alimentaria, disponibilidad de agua potable y ambientes libres de contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Araneda, M., M. Avendaño y C. Merlo. 2000. Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final. IX Congreso geológico chileno 2(5): 404 - 408. Puerto Varas – Chile.
- Armesto, J., M. Arroyo and L. Hinojosa. 2007. The Mediterranean Environment of Central Chile. En: Veblen, T., K. Young y A. Orme (Ed.). *The Physical Geography of South America*. OXFORD University Press.
- Armesto, J., R. Rozzi, C. Smith-Ramírez and M. Arroyo. 1998. Conservation Targets in South American Temperate Forests. *Science* 282(5392): 1271-1272.
- Banzhaf, E., S. Reyes-Paecke, A. Müller and A. Kindler. 2013. Do demographic and land-use changes contrast urban and suburban dynamics? A sophisticated reflection on Santiago de Chile. *Habitat International* 39: 179–191.
- Beck, H., N. Zimmermann, T. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg and E. Wood. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Nature Scientific Data* 5(1): 180214.
- Bertrand, S. and N. Fagel. 2008. Nature, origin, transport and deposition of andosol parent material in south-central Chile (36–42°S). *CATENA* 73(1): 10–22.
- Besoain, M. 1985. Los suelos. 25 – 106. En: *Suelos volcánicos de Chile*. Tosso, J. (Ed). Santiago – Chile. 716p.
- Bouma, J. 2006. Soil functions and land use. En: Certini, G. and R. Scalenghe (Eds.). *Soils: Basic Concepts and Future Challenges*. Cambridge University Press, Cambridge. p. 211–222.
- Borsdorf, A., R. Sánchez y C. Marchant. 2008. Aprendiendo de los errores. La necesidad de cambios a la política nacional de vivienda en ciudades intermedias chilenas. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona vol. XII (270): 51.
- Buol, S., R. Souhard, R. Graham and P. McDaniel. 2011. *Soil genesis and classification*. 6th ed. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex; Ames, Iowa.
- Burghardt, W. 2006. Soil sealing and soil properties related to sealing. *Geological Society, London, Special Publications* 266(1): 117–124.
- Calzolari, C., P. Tarocco, N. Lombardo, N. Marchi and F. Ungaro. 2020. Assessing soil ecosystem services in urban and peri-urban areas: From urban soils survey to providing support tool for urban planning. *Land Use Policy* 99: 105037.
- Casanova, M., O. Salazar, O. Seguel and W. Luzio. 2013. *The Soils of Chile*. Springer. Netherlands.
- Charrier, R., L. Pinto and M. Rodríguez. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. 21 – 114. En: Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds), *The Geology of Chile*. The Geological Society of London. p. 21–114.
- Chile. 2019. Sustainable Development Knowledge Platform. United Nations. Recuperado en: <https://sustainabledevelopment.un.org/memberstates/chile> (Consultado el 4 de marzo de 2021).
- CAPP (Centro de Análisis de Políticas Públicas). 2019 Informe país: Estado del medio ambiente en Chile 2018. Centro de análisis de políticas públicas, Instituto de asuntos públicos, Universidad de Chile.

- CCCR (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. 2020. Explorador climático. Recuperado en: <http://explorador.cr2.cl> .
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1985. Descripciones de suelos: estudio agrológico área Maule Norte - 2a. etapa, VII Región. Santiago, Chile. 66p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1989. Estudio agrológico de la Provincia de Cautín, IX Región: descripciones de suelos y materiales y símbolos. Santiago, Chile. 211p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 2003. Estudio agrológico X Región: descripciones de suelos, materiales y símbolos. Santiago, Chile. 412p.
- COAG (Comité de Agricultura). 1999. 15° período de sesiones: La agricultura urbana y periurbana. Comité de Agricultura. FAO. Disponible en <http://www.fao.org/unfao/bodies/coag/coaG15/> . (Consultado el 27 de enero de 2021).
- CORFO (Corporación de Fomento de la Producción), Chile. 1966. Carta Agrológica de los suelos Nadis de la Provincia de Osorno. (Publicación TECNICA 1).
- Comisión Nacional de Riego y Agrolog Chile Ltda. 1981. Estudio de suelos del Proyecto Maipo. Santiago, Chile. 801p.
- Comisión Nacional de Riego, Agrolog Chile Ltda. y R&Q Ingeniería Ltda. 1988. Estudios de suelos: proyecto Itata, Etapa II. Santiago, Chile. 118p.
- Corvalán, C., S. Hales and A. McMichael. 2005. Ecosystems and human well-being: health synthesis. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Dominati, E., M. Patterson and A. Mackay. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69(9): 1858–1868.
- Echeverría, C., D. Coomes, J. Salas, J. Rey-Benayas, A. Lara and A. Newton. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological conservation* 130(4): 481-494.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2015. Revised World Soil Charter. Roma. 10p.
- Foley, J.A. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science* 309(5734): 570–574.
- Gallardo, L., F. Barraza, A. Ceballos, M. Galleguillos, N. Huneus, F. Lambert et al. 2018. Evolution of air quality in Santiago: The role of mobility and lessons from the science-policy interface. *Elementa Science of the Anthropocene* 6(38): 23p.
- Giménez, P. y J. Ugarte. 2014. Hacia una Nueva Política Urbana para Chile. *Política Nacional de Desarrollo Urbano* (4): 12-15.
- Gregor, M., M. Löhnertz, C. Schröder, E. Aksoy and G. Louwagie. 2018. Land cover changes and soil functions: An approach for integrated accounting. *ETC/ULS*: 101p.
- Haberl, H., K. Erb, F. Krausmann, V. Gaube, A. Bondeau, C. Plutzer et al. 2007. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(31): 12942–12947.
- Haines-Young, R. and M. Potschin. 2010. The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. En: Raffaelli, D. y Frid, C. *Ecosystem Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. 110–139.
- Hasegawa, T., S. Fujimori, P. Havlík, H. Valin, B. Bodirsky, J. Doelman et al. 2018. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change* 8(8): 699–703.

- Hatab, A., M. Rigo, A. Lindemer and C. Lagerkvist. 2019. Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: A systematic review of the literature. *Cities* 94: 129-142.
- Hidalgo, R., C. De Mattos y F. Arenas. 2009. Chile: del país urbano al país metropolitano. GEOlibros, Santiago. Recuperado en https://www.researchgate.net/publication/272086035_Chile_del_pais_urbano_al_pais_metropolitano (Consultado el 6 de enero de 2021).
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas), Chile. 2018. Síntesis resultados Censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales y Universidad Austral. 1974. Estudio de suelos de la Provincia de Valdivia. Santiago, Chile.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. Climate Change and Land: Summary for Policymakers. IPCC. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf (Consultado el 30 de noviembre de 2020).
- IREN (Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales), Chile. 1964. Proyecto Aerofotogramétrico Chile/OEA/BID. Santiago, Chile.
- IREN (Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales), Chile. 1984. Descripciones de suelos VI Región: estudio agrológico. Provincia de Cachapoal. Santiago, Chile.
- Kareiva, P., S. Watts, R. McDonald and T. Boucher. 2007. Domesticated Nature: Shaping Landscapes and Ecosystems for Human Welfare. *Science* 316(5833): 1866–1869.
- Keesstra, S., J. Bouma, J. Wallinga, P. Tittone, P. Smith, A. Cerdà et al. 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL* 2(2): 111–128.
- Koch, A., A. McBratney, M. Adams, D. Field, R. Hill, J. Crawford et al. 2013. Soil Security: Solving the Global Soil Crisis. *Glob Policy* 4(4): 434–441.
- Koch, J., F. Wimmer and R. Schaldach. 2018. Analyzing the relationship between urbanization, food supply and demand, and irrigation requirements in Jordan. *Science of the Total Environment* 636: 1500–1509.
- Kumar, P., P. Le, A. Papanicolaou, B. Rhoads, A. Anders, A. Stumpf et al. 2018. Critical transition in critical zone of intensively managed landscapes. *Anthropocene* 22: 10–19.
- Lowell, T., C. Heusser, B. Andersen, P. Moreno, A. Hauser, L. Heusser et al. 1995. Interhemispheric Correlation of Late Pleistocene Glacial Events. *Science* 269(9): 1541-1549.
- Luebert F. y P. Pliscoff. 2018. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria. Chile
- Luzio, W., O. Seguel y M. Casanova. 2010. Suelos de la Zona Mediterránea Árida. En: Luzio, W. (Ed.). *Suelos de Chile*. Universidad de Chile. Santiago. 125-130.
- Milano, V., J. Cortet, D. Baldantoni, A. Bellino, F. Dubs, J. Nahmani et al. 2017. Collembolan biodiversity in Mediterranean urban parks: impact of history, urbanization, management and soil characteristics. *Applied Soil Ecology* 119: 428–437.
- Miranda, A., A. Altamirano, L. Cayuela, A. Lara and M. González. 2017. Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change* 17(1): 285-297.

- Montanarella, L. and R. Vargas. 2012. Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4(5): 559–564.
- Moreira-Munoz, A. 2011. *Plant Geography of Chile*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2013. *Urban Policy Reviews: Chile*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. París.
- Ormeño, A. 2007. Geomorfología dinámica del río Maipo en la zona cordillerana de Chile central e implicancias neotectónicas. Tesis de magister. Santiago, Chile.
- Pliscoff, P. and T. Fuentes-Castillo. 2011. Representativeness of terrestrial ecosystems in Chile's protected area system. *Environmental Conservation* 38(3): 303–311.
- Puertas, O., C. Henríquez and F. Meza. 2014. Assessing spatial dynamics of urban growth using an integrated land use model. Application in Santiago Metropolitan Area, 2010–2045. *Land Use Policy* 38: 415–425.
- Ramos, M., A. Folguera, L. Fennell, M. Giménez, V. Litvak, Y. Dzierma et al. 2014. Tectonic evolution of the North Patagonian Andes from field and gravity data (39–40°S). *Journal of South American Earth Sciences* 51: 59–75.
- Rawlins, B.G., J. Harris, S. Price and M. Bartlett. 2015. A review of climate change impacts on urban soil functions with examples and policy insights from England, UK (D. Davidson, editor). *Soil Use Manage* 31: 46–61.
- Richardson, M. and P. Kumar. 2017. Critical Zone services as environmental assessment criteria in intensively managed landscapes. *Earth's Future* 5(6): 617–632.
- Romero, H. and F. Ordenes. 2004. Emerging urbanization in the Southern Andes: Environmental impacts of urban sprawl in Santiago de Chile on the Andean piedmont. *Mountain Research and Development* 24(3): 197–201.
- Rutllant, J. 2004. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. En: Avaria, S., J. Carrasco, J. Rutllant y E. Yañez (Ed.). *El Niño – La Niña 1997-2000*. Comité Oceanográfico Nacional. 61-76.
- Sabatini, F. 2000. Reforma de los mercados de suelo en Santiago, Chile: efectos sobre los precios de la tierra y la segregación residencial. *EURE (Santiago)* 26(77): 49–80.
- Scalenghe, R. and F.A. Marsan. 2009. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning* 90(1–2): 1–10.
- Schulz, J., L. Cayuela, C. Echeverría, J. Salas and J. Benayas. 2010. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008). *Applied Geography* 30(3): 436–447.
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería), Chile. 2003. *Mapa Geológico de Chile: versión digital*. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Digital* 4. Santiago.
- Smit, W. 2016. Urban governance and urban food systems in Africa: Examining the linkages. *Cities* 58: 80–86.
- Sonnino, R. 2016. The new geography of food security: exploring the potential of urban food strategies: The new geography of food security. *The Geographical Journal* 182(2): 190–200.
- Squeo, F., R. Estévez, A. Stoll, C. Gaymer, L. Letelier and L. Sierralta. 2012. Towards the creation of an integrated system of protected areas in Chile: achievements and challenges. *Plant Ecology and Diversity* 5(2): 233–243.

- Terra, P. 2015. Procesos de deterioro urbano en ciudades intermedias de Chile: Una propuesta metodológica. 127 – 148. En: Ciudades intermedias en Chile: Territorios olvidados. F. Maturana and A. Rojas. (Eds). Santiago – Chile. 254p.
- UN (United Nations). 2015. The 17 Goals: Sustainable Development. United Nations En: <https://sdgs.un.org/es/goals> (Consultado el 4 de marzo de 2021).
- Vial, C. 2015. Ciudades intermedias y municipalidades: La carencia de un gobierno: 75 – 103. En: Ciudades intermedias en Chile: Territorios olvidados. F. Maturana and A. Rojas. (Eds). Santiago – Chile. 254p.
- Vitousek, P., H. Mooney, J. Lubchenco and J. Melillo. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277(5325): 494–499.
- Wang, Y., B. Hu, S. Myint, C. Feng, W. Chow and P. Passy. 2018. Patterns of land change and their potential impacts on land surface temperature change in Yangon, Myanmar. *Science of The Total Environment* 643: 738–750.
- Yang, J. and G. Zhang. 2015. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Science and Plant Nutrition* 61(1): 30–46.

ANEXOS

1. Líneas de comando utilizadas para la reclasificación del archivo *raster* de 11 clases, a las 5 utilizadas en este estudio:

```
(("nombre_raster">=1) AND
("nombre_raster"<=3.1))*0+((("nombre_archivo">=3.95) AND
("nombre_archivo"<=7.05))*1+((("nombre_archivo">=7.95) AND
("nombre_archivo"<=8.05))*2+((("nombre_archivo">=8.95) AND
("nombre_archivo"<=9.05))*3+((("nombre_archivo">=9.95) AND
("nombre_archivo"<=11))*4
```

2. Ejemplo de código R-Studio.

```
Rancagua
rm(list=ls())
graphics.off()
#Paquetes
install.packages("rgeos")
install.packages("dplyr")
install.packages("sf")
install.packages("rgdal")
install.packages("maptools")
install.packages("raster")
install.packages("sp")
install.packages("openxlsx")
#Librerías
library(rgeos)
library(dplyr)
library(sf)
library(rgdal)
library(maptools)
library(raster)
library(sp)
library(openxlsx)

setwd("./data/carpeta de trabajo ")
#reconocer mascarar
AE_rancagua<-readOGR(getwd(), "suelo rancagua 2019")
#reconocer sistema de proyeccion
crs(AE_rancagua)
#ver datos
View(AE_rancagua@data)
#área total de expansión
ATRan<-sum(AE_rancagua$Area_ha)
#Extracción de valores, según clase de capacidad de uso de suelo
(Characterización)
C1Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="I",]
C2Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="II",]
C3Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="III",]
C4Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="IV",]
C6Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="VI",]
C7Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="VII",]
C8Ran<-AE_rancagua[AE_rancagua$textcaus=="VIII",]
#Caracterización urbano anterior
CURRan<-AE_rancagua[AE_rancagua$simbvari=="UR",]

#Suma de áreas
AC1Ran<-sum(C1Ran$Area_ha)
```

```

AC2Ran<-sum(C2Ran$Area_ha)
AC3Ran<-sum(C3Ran$Area_ha)
AC4Ran<-sum(C4Ran$Area_ha)
AC6Ran<-sum(C6Ran$Area_ha)
AC7Ran<-sum(C7Ran$Area_ha)
AC8Ran<-sum(C8Ran$Area_ha)
ACXRan<- AC6Ran+AC7Ran+AC8Ran
#Área urbano anterior
AURRan<-sum(CURRan$Area_ha)
#Expansión urbana
EXURRan<-ATRan-AURRan

#Porcentajes (redondeado a 1 decimal)
PC1Ran<-round((AC1Ran/EXURRan)*100,1)
PC2Ran<-round((AC2Ran/EXURRan)*100,1)
PC3Ran<-round((AC3Ran/EXURRan)*100,1)
PC4Ran<-round((AC4Ran/EXURRan)*100,1)
PCXRan<-round((ACXRan/EXURRan)*100,1)

#Porcentaje de expansión urbana sobre suelo arable (I-IV)
PRan<-(AC1Ran+AC2Ran+AC3Ran+AC4Ran)*100/EXURRan
#Exportado de archivos .xlsx para caracterización de suelos de clase II

wb2<-createworkbook()
addworksheet(wb2, sheetName = "Rancagua")
writeDataTable(wb2, sheet = 1, x=data.frame(C2Ran))
addworksheet(wb2, sheetName = "Talca")
writeDataTable(wb2, sheet = 2, x=data.frame(C2Ta1))
addworksheet(wb2, sheetName = "Chillán")
writeDataTable(wb2, sheet = 3, x=data.frame(C2Chi))
addworksheet(wb2, sheetName = "Temuco")
writeDataTable(wb2, sheet = 4, x=data.frame(C2Tem))
addworksheet(wb2, sheetName = "Valdivia")
writeDataTable(wb2, sheet = 5, x=data.frame(C2Va1))
addworksheet(wb2, sheetName = "Osorno")
writeDataTable(wb2, sheet = 6, x=data.frame(C2Os))
saveworkbook(wb2, "./data/carpeta de trabajo/Clase 2.xlsx")

#Fin del ejemplo.

```