



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA BIOCAPACIDAD DE LAS SERIES DE SUELO
OCUPADAS EN EL CRECIMIENTO DE SUPERFICIE DE LA
CIUDAD DE SANTIAGO**

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniera en Recursos Naturales
Renovables y al Grado de
Magíster en Gestión Territorial de Recursos Naturales

FRANCISCA PAOLA PANTOJA LIRA

Guía de Tesis
Marco Pfeiffer
Mauricio Galleguillos

Profesores/as consejeros/as
Marco Billi
Gerardo Ubilla

SANTIAGO - CHILE
2023

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

ESTIMACIÓN DE LA BIOCAPACIDAD DE LAS SERIES DE SUELO OCUPADAS
EN EL CRECIMIENTO DE SUPERFICIE DE LA CIUDAD DE SANTIAGO

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de
Ingeniera en Recursos Naturales Renovables y al Grado de Magíster en Gestión
Territorial de Recursos Naturales.

(FRANCISCA PAOLA PANTOJA LIRA)

	Calificaciones
GUIA DE TESIS/AFE	
Marco Pfeiffer	7,0
Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	
Mauricio Galleguillos	6,7
Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	
PROFESORES/AS CONSEJEROS/AS	
Gerardo Ubilla	6,4
Geografo, MS, Ph.D.	
Marco Billi	6,9
Economista, MS, Ph.D.	

Santiago, Chile
2023

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Muchas personas han sido parte de mi proceso formativo y de tesis, quiero agradecerles por su cariño y paciencia. Especialmente a mi familia, a mis amigas, amigos y profesores. Gracias a mi abuela por haberme formado en tantos aspectos de mi vida y por amarme y apoyarme hasta sus últimos días. La llevaré por siempre conmigo. Gracias a mi perrita por su compañía, amor y enseñanzas.

Además, le agradezco a las personas de ODEPA por su buena disposición y apoyo para la obtención de la información censal, en especial a Jaime Ovalle. Y a la profesora Paola Silva por sus consejos en torno al cultivo de trigo y sus procesos fenológicos.

ÍNDICE

Índice de figuras	II
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
MATERIALES Y MÉTODOS	4
Área de estudio.....	4
Avance de la expansión urbana sobre las distintas series de suelo	4
Estimación de la biocapacidad de las distintas series de suelo	6
Cuantificación de la pérdida de potencial de producción de alimentos a causa de la expansión urbana a través del tiempo	10
RESULTADOS.....	12
Reconstrucción de series de suelo.....	12
La expansión de la ciudad de Santiago desde 1541 al 2017	13
Santiago antes y después de los españoles (1541)	13
Consolidación de Santiago (1541 - 1600).....	14
Crecimiento e independencia del país (1600 - 1895).....	15
Nuevas comunas (1895 - 1930).....	15
Recuperación tras la crisis económica de 1930 y el rol del Estado (1930 - 1985)	16
Nueva dinámica de crecimiento (1985 - 2002).....	17
Ciudad actual (2002 - 2017).....	18
Determinación de los cultivos.....	19
Biocapacidad de los distritos.....	21
Biocapacidad de las series.....	23
Biocapacidad de las series bajo la ciudad de Santiago	24
DISCUSIÓN	27
Determinación espacial de cultivos.....	27
Biocapacidad de los suelos de la RM.....	27
Crecimiento de la ciudad de Santiago y las series de suelo ocupadas por el proceso.....	28
Pérdida de suelos agrícolas	28
Consecuencias sobre la seguridad alimentaria.....	29

Crecimiento de otras ciudades del país y la importancia de considerar al suelo en la planificación territorial.....	29
CONCLUSIONES	30
LITERATURA CITADA.....	31
Henríquez-Dole, L., T.J. Usón, S. Vicuña, C. Henríquez, J. Gironás, and F. Meza. 2018. Integrating strategic land use planning in the construction of future land use scenarios and its performance: the Maipo River Basin, Chile. Land Use Policy 78: 353 – 366.....	33
ANEXOS	38
Anexo 1. Curva fenológica del trigo	38
Anexo 2. Curva fenológica del maíz.....	38
Anexo 3. Plano de Santiago en 1541	39
Anexo 4. Plano de Santiago en 1600	39
Anexo 5. Plano de Santiago en 1895	40
Anexo 6. Plano de Santiago en 1930	40
APÉNDICES.....	42
Apéndice 1. Cartografía de respuesta sísmica y series de Ciren.....	42
Apéndice 2. Biocapacidad de los distritos de la RM en base a los cultivos de trigo y maíz.....	42
Apéndice 3. Cuadro de biocapacidad de las series de suelo de la RM	43
Apéndice 4. Biocapacidad de las series de suelo de la RM en base a trigo y maíz	45

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo biocapacidad de series de suelo.....	10
Figura 2. Crecimiento urbano de la ciudad de Santiago sobre las distintas series desde 1541 hasta 1930, considerando la división de comunas actuales	14
Figura 3. Crecimiento urbano de la ciudad de Santiago sobre las principales series de suelo ocupadas desde 1541 hasta 2017.....	17
Figura 4. Crecimiento por período sobre las distintas series (a) entre los años 1541 a 1895 y (b) entre los años 1930 y 2017	19
Figura 5. Determinación de cultivos de maíz al interior de la máscara de cultivos anuales proveniente del Landcover de 2009, usando un filtro de cambio de NDVI del 40% (a). Acompañado de la comprobación visual del mismo en Google Earth Pro usando Street View (b)	21
Figura 6. Biocapacidad de los distritos de la RM para (a) trigo y (b) maíz.....	22
Figura 7. Biocapacidad potencial de las series de suelo de la RM.	23

Índice de cuadros

Cuadro 1. Crecimiento porcentual sobre cada serie de suelo en los distintos períodos.....	19
Cuadro 2. R2 y RMSE para cada cultivo usando diferentes filtros de cambio de NDVI entre períodos fenológicos.	20
Cuadro 3. Biocapacidad de las principales series de suelo ocupadas por la expansión de la ciudad desde 1541 a la actualidad, usando como referencia a los cultivos de trigo, maíz, el promedio entre ambos y el de mayor productividad.	24
Cuadro 4. Series sin información de biocapacidad y la superficie en hectáreas ocupada por la expansión de Santiago desde 1541 a 2017.	24
Cuadro 5. Comparación entre la superficie real ocupada por cada pulso de expansión y las superficies estimadas (SE) a partir de la biocapacidad identificada para cada serie, en base al trigo, maíz, promedio de ambos cultivos y el de mayor productividad.	25
Cuadro 6. Estimación del número de personas que podrían alimentarse anualmente a partir de los suelos ocupados por el crecimiento urbano de Santiago	26

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Estimación de la biocapacidad de la comuna.....	7
Ecuación 2. Estimación de la biocapacidad de una serie de suelo.....	8
Ecuación 3. Porcentajes de cambio de NDVI considerando distintos momentos temporales (T1, T2 y T3) para el trigo (a y b) y maíz (c).....	8

RESUMEN

La expansión urbana es considerada una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria a nivel global, ya que genera efectos irreversibles sobre la funcionalidad de los suelos. En Chile, Santiago es uno de los principales ejemplos respecto al crecimiento de la superficie urbana en el tiempo. El estudio buscó analizar el efecto de la expansión urbana sobre la disponibilidad de suelos, desde la fundación de la ciudad hasta la actualidad, mediante una estimación simplificada de la biocapacidad de las series de suelo. Para esto se generó la reconstrucción de los suelos sobre las cuales creció la ciudad, se digitalizó y trazó la superficie de la ciudad en distintos períodos y se aplicó un mapeo de cultivos usando su fenología. Los resultados indican que la ciudad creció principalmente sobre suelos altamente productivos, donde 97% de las series de suelo superan la productividad promedio mundial, siendo el doble de productivas en el 66% de los casos. En este sentido, la expansión de la ciudad de Santiago significó la pérdida del potencial de alimentar a casi 2,5 millones de personas anualmente, donde un 94,5% de la pérdida de funcionalidad de suelos se debe a la expansión vivida desde 1930 hasta 2017.

Palabras clave: Expansión urbana; Funcionalidad de los suelos; Seguridad alimentaria; Servicios ecosistémicos.

ABSTRACT

Urban expansion is considered one of the main threats to food security at global scale, since it generates irreversible effects on soil functionality. In Chile, Santiago is one of the main examples regarding the growth of urban area over time. This study seeks to analyze the effect of urban expansion over soils availability, since the foundation of the city until present day, through a simplified estimation of the biocapacity of soil series. For this case, a reconstruction of soils used for the growth of the city was generated, digitizing and tracing the city surface in different periods and applying crop mapping using their phenology. The results indicate that the city grew mainly on highly productive soils, where 97% of the soil series are above the world average soil productivity and being twice as productive in 66% of the cases. The expansion of the city of Santiago meant the loss of the potential to feed almost 2.5 million people, where 94.5% of the loss of soil functionality is due to the expansion experienced from 1930 to 2017.

Keywords: Ecosystem services; Food security; Soil functionality; Urban expansion.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las ciudades albergan a más de 4.000 millones de habitantes, lo que equivale al 51% de la población mundial (Morán y Díaz, 2020), una cifra que se espera aumente en el futuro, considerando el crecimiento demográfico y el potencial de las ciudades para mejorar la calidad de vida de las personas gracias a la alta concentración de servicios básicos y oportunidades laborales (UNHabitat, 2020). Sin embargo, esto ha derivado en una creciente preocupación respecto al ritmo en el que se ha incrementado el radio urbano en distintas ciudades del mundo, proyectando un aumento acelerado de la urbanización durante la próxima década (UNHabitat, 2020).

Si bien el concepto de expansión urbana no posee una definición estandarizada debido a su complejidad y multidimensionalidad, esta se entiende en términos simples como la expansión de la extensión geográfica de la ciudad (Smit 2016; Hatab et al., 2019). Por ende, y en contexto del presente trabajo, el concepto de expansión urbana incluye tanto a procesos de periurbanización como de suburbanización, pese a que ambos responden a dinámicas de crecimiento diferenciadas, donde el primero se refiere al emplazamiento de viviendas en el contorno del área urbana y el segundo señala el asentamiento fuera del margen de la ciudad (Harris, 2015).

Estos procesos de expansión y crecimiento de la superficie urbana son considerados como una respuesta natural frente al crecimiento demográfico y la necesidad habitacional, generando la urbanización tanto de la periferia urbana como en zonas suburbanas, las cuales representan espacios más económicos que al interior de la misma (Harris, 2015; Janků *et al.*, 2016). El uso de estos suelos puede ser especialmente problemático si se considera que, históricamente, las diversas urbes de todo el planeta han sido en su mayoría fundadas sobre los suelos más fértiles, debido a la necesidad de producir alimentos de buena calidad que fueran fácilmente accesibles para la población (Janků *et al.*, 2016).

La urbanización altera directamente las características físicas y bióticas de los suelos, por lo que genera la pérdida total e irreversible de la productividad de los mismos (Chen, 2007). En este sentido, los cambios en el uso del suelo impulsados por el crecimiento de la ciudad, han provocado una pérdida generalizada e irreversible de suelos de alta calidad, transformando suelos con fines agrícolas a espacios urbanizados y forzando el desplazamiento de la agricultura hacia zonas menos productivas que, en muchos casos, no se consideran aptas para la labranza (Chen, 2007; Ferrara *et al.*, 2014; Zambon *et al.*, 2018). Esto genera que, en la actualidad, la expansión urbana sea considerada una de las principales amenazas para la seguridad alimentaria a nivel mundial (Friedrich, 2014).

La competencia por el uso del suelo ha generado un mayor interés en definir y estudiar las distintas funciones y potencialidades de dicho recurso (Bouma, 2014). Por lo que diversos autores han optado por categorizar las funciones del suelo a través de los servicios ecosistémicos, es decir, el estudio y cuantificación de los beneficios que estos entregan a los seres humanos y el ecosistema (Adhikari y Hartemink, 2016). Los servicios ecosistémicos del suelo corresponden a una expresión de sus funciones, las cuales dependen de las propiedades del mismo (Adhikari y Hartemink, 2016; Rabot *et al.*, 2018). Sin embargo, aún

no existe certeza de cómo medir con exactitud los diversos servicios que otorgan los suelos, ni cómo interaccionan las distintas funciones y procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en el suelo (Baveye, 2015; Vogel *et al.*, 2018). Por lo que existe un gran requerimiento de información precisa respecto a las funciones y servicios ecosistémicos otorgados por los diferentes tipos de suelo.

Hasta ahora, la investigación sobre las funciones y servicios ecosistémicos del suelo se han concentrado principalmente en Europa, generando importantes vacíos de información en el resto del mundo, en especial en Latinoamérica, donde se contabilizan solo el 6% del total de estudios realizados en torno al tema (Adhikari y Hartemink, 2016). Esto es especialmente relevante para la problemática de la expansión urbana, sobre todo si se considera que la totalidad de estudios generados apuntan a la urbanización como un factor relevante en la disminución de la cantidad y calidad de funciones ecosistémicas del suelo (Malucelli *et al.*, 2014; Adhikari y Hartemink, 2016). Un ejemplo de esto es el trabajo de autores como Malucelli *et al.* (2014), quienes cuantificaron que la región de Emilia-Romagna perdió el potencial de alimentar a más de 400.000 personas en tan solo seis años a causa de la urbanización.

A nivel nacional, el proceso de expansión urbana ha impactado especialmente en la zona central, donde la ciudad de Santiago ha concentrado parte importante del crecimiento demográfico del país a través de los años, aumentando en 1,4 millones de habitantes entre 1992 y 2009 (Banzhaf *et al.*, 2013). Debido a lo anterior, la transformación del paisaje suburbano es especialmente preocupante para Chile, ya que solo el 6,13% de la superficie nacional corresponde a suelos arables, los cuales se concentran precisamente en la zona con mayor desarrollo urbano e industrial, incluyendo a la región Metropolitana de Santiago (RM) (Pfeiffer *et al.*, 2019). Esto ha derivado en una competencia entre ambas actividades, la cual ha significado la pérdida de más de 30 mil hectáreas de suelos de alta calidad agrícola en las últimas décadas (Soto, 2021). Del mismo modo, el crecimiento poblacional de Santiago se ha concentrado en las comunas suburbanas de la ciudad (Banzhaf *et al.*, 2013), desplazando a la agricultura hacia áreas ocupadas por vegetación nativa (Aguayo *et al.*, 2009).

Tomando en cuenta lo anterior, este trabajo busca analizar el efecto de la expansión urbana en Santiago de Chile sobre la producción potencial de alimentos, desde la fundación española de la ciudad en 1541 hasta la actualidad, basándose en la premisa de que el desarrollo urbano ha usado suelos altamente productivos. Para esto, el estudio se basa en el enfoque empleado por Malucelli *et al.* (2014), el cual cuantifica la capacidad de producir alimentos a través de la estimación de la biocapacidad de los suelos, siendo necesario identificar sobre qué series ha avanzado la urbanización y en qué medida. Para esto es necesario conocer la biocapacidad de cada serie, con el fin de estimar cuántos alimentos se podrían producir si los suelos ocupados por la ciudad estuvieran disponibles en la actualidad y cuántas personas podrían alimentarse de ellos.

HIPÓTESIS

El crecimiento progresivo de la superficie de la ciudad de Santiago se ha emplazado sobre suelos de alta calidad agrícola.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estimar el efecto de la expansión urbana sobre la disponibilidad de suelos desde la fundación española de la ciudad en 1541 hasta la actualidad.

Objetivos específicos

- Cuantificar el avance de la expansión urbana sobre las distintas series de suelo en los períodos entre los años: 1541, 1600, 1895, 1930, 1985, 2002 y 2017.
- Estimar la biocapacidad de las distintas series de suelo mediante el uso de un cultivo de referencia.
- Cuantificar la pérdida del potencial de producción de alimentos a causa de la expansión urbana a través del tiempo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La ciudad de Santiago (33°S-70°O) está ubicada en la zona central de Chile, en la región Metropolitana de Santiago. Esta última posee una superficie total de 15.403 km², abarcando 52 comunas, de las cuales al menos 32 forman parte de la ciudad (SUBDERE, 2021). Santiago concentra gran parte de la población nacional (40,5%), siendo habitada por más de siete millones de personas en la actualidad (INE, 2017).

La región presenta un ecosistema semi árido con bioclima mediterráneo (Luebert y Pliscoff, 2006) y se encuentra emplazada en el centro del valle del Maipo (350 msnm), limitando al este con la Cordillera de los Andes (5.500 msnm) y al oeste con la Cordillera de la Costa (1.800 msnm) (Puertas *et al.*, 2014). Cuenta con un total de 85 series de suelo descritas (ODEPA, 2019). Los suelos son, en su mayoría, de origen aluvial o aluvio-coluvial, profundos, de colores pardo a pardo oscuro, donde la clase textural del horizonte superficial varía de franca a franco arcillosa (Luzio, 2010). Gran parte de las series descritas para la región corresponden a suelos del orden Mollisol, constituyendo “suelos muy productivos aptos para todos los cultivos de la región” (Luzio y Casanova, 2006).

Desde el punto de vista de su superficie agrícola, la región Metropolitana de Santiago es una de las regiones con menor presencia silvoagropecuaria en Chile, abarcando solo el 1,79% de la superficie de predios agrícolas a nivel nacional (ODEPA, 2019). Pese a esto, la participación regional en el PIB sectorial (silvoagropecuario) es una de las más altas del país, alcanzando un 12,1%, por lo que se posiciona como la cuarta región con mayor aporte dentro del rubro silvoagropecuario (ODEPA, 2019). Esta discordancia entre la baja cantidad de superficie destinada a cultivos y su alto aporte al PIB podría indicar que la región se caracteriza por ser altamente productiva, aumentando el interés en estudiar la productividad de los suelos de la misma. Además, cabe mencionar que la región Metropolitana de Santiago se encuentra entre las regiones con mayor producción de hortalizas de consumo interno, considerando que el 85% de la superficie hortícola nacional se concentra entre las regiones de Coquimbo y el Maule (ODEPA, 2019), por lo que los cultivos de la RM cumplen un rol importante dentro de la producción nacional de alimentos.

Avance de la expansión urbana sobre las distintas series de suelo

La base cartográfica para determinar los tipos de suelo presentes al momento de los diversos pulsos de expansión urbana corresponde al concepto de serie de suelo, el cual consiste en unidades del paisaje con suelos de la misma secuencia de horizontes (USDA, 2017). Las series de suelo están representadas de manera cartográfica por polígonos, consistentes en unidades de mapeo donde predomina una serie de suelos determinada. Como se mencionó anteriormente, en la región Metropolitana de Santiago se han identificado 85 series de suelo

(CIREN, 1996), que corresponden a la base cartográfica para delimitar los análisis que se describen a continuación.

La ubicación de estas series dentro de la región fue determinada en base a la cartografía de Series de Suelo de CIREN. Esta cuenta con información para toda la región Metropolitana de Santiago en una escala de 1:20.000, sin embargo, dentro de la ciudad de Santiago existen múltiples áreas categorizadas como “No Suelo” debido a que estas ya habían sido urbanizadas al momento del estudio (CIREN, 1996). Dichos polígonos fueron eliminados y posteriormente se completaron manualmente todas las zonas vacías que se encontraban completamente inmersas dentro de una serie, es decir, se asumió que las áreas urbanas rodeadas por una única serie de suelo fueron emplazadas sobre la misma.

Para completar la información faltante en la zona norte de la capital, se usó la cartografía de reconocimiento de suelos para la zona de Colina – Bатуco, elaborada por el Ministerio de Agricultura (1962) a escala 1:100.000. Esta presentó algunas diferencias en comparación a la cartografía de CIREN debido a la diferencia de escala entre ambos materiales, pese a esto, permitió complementar la información faltante en torno a series señaladas anteriormente como No Suelo.

Para la zona centro y sur se usó la cartografía de Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago, Región Metropolitana de Santiago, elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería a escala 1:250.000 (von Igel *et al.*, 2004). Esta cartografía determina una serie de categorías de respuesta en base al material geológico sobre el cual se presentan los suelos, otorgando información referente al material parental de los suelos, pedregosidad, pendiente, entre otros.

Estos materiales permitieron delimitar unidades cartográficas y correlacionarlas a las series de suelo más cercanas mediante el uso de criterio experto, considerando las características de cada serie y cómo estas pueden asemejarse a las diferentes series de suelo presentes en la región, guiando de este modo la reconstrucción de las mismas. La reconstrucción y el trazado de polígonos se realizó a una escala de 1:20.000, igualando la escala de trabajo de CIREN (1996).

Posteriormente, para identificar las series de suelo sobre las que se expandió la ciudad, se generó un cruce de información entre mapas de expansión urbana de Santiago y la cartografía de series de suelo obtenida anteriormente. Los años a estudiar corresponden a 1541, 1600, 1895, 1930, 1985, 2002 y 2017, permitiendo conocer la forma en que se ha expandido el área urbana de la ciudad desde la fundación española hasta la actualidad.

La inclusión de diversos años intermedios hizo posible identificar el crecimiento físico de la superficie de la ciudad tras diferentes procesos económicos, políticos y sociales que resultan claves para comprender el contexto de las dinámicas de expansión urbana de la capital. Estos incluyen la inestabilidad atribuida a la resistencia indígena tras la llegada de los españoles (1541); la consolidación de la ciudad de Santiago durante la época colonial (1600); el crecimiento e independencia del país (1895); creación de nuevas comunas en contexto de la promulgación de la ley “Comuna Autónoma” y la concentración de capitales provenientes del salitre en la zona Metropolitana de Santiago (1930); recuperación del país tras la crisis económica de 1930 y el rol del Estado en el crecimiento de Santiago, incluyendo los efectos

de las diversas reformas agrarias y la liberalización de los suelos como un bien no escaso en contexto de la dictadura (1985); la promulgación del Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) (2002) y sus posteriores modificaciones (2017).

Cabe mencionar que la inclusión de estos períodos se basa a su vez en la disponibilidad de información cartográfica respecto a la superficie ocupada por la ciudad de Santiago. De este modo, la inclusión de múltiples años buscó comprender el crecimiento físico progresivo de la ciudad a través de los períodos determinados por estos, sin considerar los límites urbanos especificados por herramientas de planificación urbana como el PRMS y sus modificaciones.

La cuantificación del crecimiento de la superficie ocupada por la ciudad entre los distintos años estudiados, se realizó mediante la digitalización de los mapas contenidos en la Biblioteca Nacional Digital de Chile. Luego estos fueron trazados manualmente en QGIS a una escala de trabajo de 1:5.000. Para el año 1985 se generó un trazo manual mediante el uso de Google Earth usando imágenes de la época a escala de 1:5.000. Mientras que para los años 2002 y 2017 se usó información en formato vectorial proveniente del MINVU, la cual da cuenta de la superficie ocupada por la ciudad de Santiago en dichos años. La cuantificación del avance de la expansión urbana fue determinada para cada período entre los años señalados, generando una resta entre las áreas de los períodos consecutivos, permitiendo identificar la expansión atribuida a cada periodo en función de la variación de la superficie urbanizada entre el año de estudio y el anterior.

Estimación de la biocapacidad de las distintas series de suelo

La biocapacidad hace referencia a la capacidad de un ecosistema de producir materiales biológicos útiles para los seres humanos (Kitzes *et al.*, 2007; Rees y Wackernagel 2008). Para su estimación se consideran una serie de factores tecnológicos y de gestión, además de características propias del lugar (país, región, etc.), como la productividad de los suelos, el clima, entre otros, permitiendo estimar qué tan productivo es un lugar en cada año, considerando que muchos de estos factores varían durante el tiempo (Monfreda *et al.*, 2004).

De este modo, la biocapacidad es cuantificada a través de hectáreas globales estandarizadas (GHA, por sus siglas en inglés), indicando el rendimiento potencial de un área biológicamente productiva, en base a la productividad media mundial de un año determinado (Wackernagel *et al.*, 2002); por lo que permite estimar la oferta potencial del medio respecto a cada tipo de recurso (Monfreda *et al.*, 2004), generando datos simples, estandarizados y comparables con cualquier otro lugar del mundo (Rees y Wackernagel, 2008). Siendo señalado como un indicador confiable para la determinación de, por ejemplo, la funcionalidad de los suelos (Malucelli *et al.*, 2014).

Para fines de este trabajo, se realizó una estimación simplificada de la biocapacidad de los suelos de la RM, mediante la comparación de la productividad promedio mundial e información del censo agrícola 2007. Esto se generó a una escala de serie de suelo ya que esta categoría engloba suelos con “secuencias similares de horizontes genéticos”, formados a partir del mismo material parental, además de compartir una serie de factores de formación

de suelos y procesos de transformación del material parental (CIREN, 1996; Luzio y Casanova, 2006), por lo que se espera que los suelos pertenecientes a una misma serie posean una productividad potencial similar. Sin embargo, actualmente no existe información disponible que permita vincular la productividad de cultivos a cada serie de manera directa, por ende, la estimación de biocapacidad de las series de suelo se llevó a cabo usando como base la productividad de los diversos distritos censales que componen la región Metropolitana de Santiago (Figura 1).

La estimación de la productividad del distrito se generó en base a los cultivos anuales de trigo y maíz, ya que estos corresponden a algunos de los cultivos más abundantes dentro de la región según datos del censo agrícola del 2007. Por lo demás, cereales como el trigo y maíz corresponden a los principales cultivos de referencia a la hora de estimar la productividad de las diversas regiones del mundo, considerando que son un cultivo con gran presencia a nivel global y la importancia de los mismos para la seguridad alimentaria (Malucelli *et al.*, 2014; Cai *et al.*, 2022).

Posteriormente se generó una comparación entre la productividad de los diversos distritos que componen la RM y la productividad promedio mundial respectiva de los cultivos de trigo y maíz en ese año, disponible en la página web de la FAO, para obtener las GHA respectivas a cada cultivo del distrito (Ecuación 1). Esto permitió obtener la biocapacidad de diversos distritos de la región para trigo y/o maíz, dependiendo de si este presentaba dicho tipo de cultivo en su información censal (Figura 1).

$$Biocapacidad (GHA) = \frac{Productividad\ del\ distrito}{Productividad\ media\ mundial}$$

Ecuación 1. Estimación de la biocapacidad de la comuna

Donde,

Productividad del distrito: Información del censo agrícola respecto a la productividad de cada distrito (kg/ha).

Productividad media mundial: Productividad del cultivo en una hectárea promedio mundial (kg/ha).

Estos datos fueron llevados a una escala de serie de suelo mediante el cruce de información de la biocapacidad del distrito y la ubicación de los cultivos de trigo y maíz dentro del mismo, permitiendo determinar sobre qué serie de suelo se desarrollan y la superficie de la serie destinada a cada cultivo en cada distrito. Luego, se estimó la productividad de cada serie incorporando la información respectiva al distrito, a través de un promedio ponderado con la superficie que ocupa el cereal dentro del mismo (Ecuación 2, Figura 1). Adicionalmente, se calculó la biocapacidad promedio en base a la biocapacidad estimada para cada cultivo presente en la serie; y la biocapacidad potencial, usando el mayor de ambos cultivos. En caso de presentar solo un cultivo, se usó este valor como biocapacidad promedio y potencial de la serie (Figura 1).

$$Biocapacidad\ de\ la\ serie = \sum_{i=1}^n \frac{Biocapacidad\ distrito_i * superficie_i}{Superficie\ total\ cultivada\ de\ la\ serie}$$

Ecuación 2. Estimación de la biocapacidad de una serie de suelo

Donde,

n : Total de distritos que componen la RM.

$Biocapacidad\ distrito_i$: Biocapacidad del distrito en base al trigo o maíz (GHA).

$Superficie_i$: Superficie cultivada por el cereal respectivo dentro del distrito y la serie (ha).

$Superficie\ total\ cultivada\ de\ la\ serie$: Área ocupada por el cultivo del cereal respectivo en el total de los distritos que contienen a la serie de suelo (ha).

La ubicación espacial de los cultivos fue determinada en base a un mapa de cobertura de suelos (*Landcover*) del año 2009, elaborado por el Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas, recortado al área de estudio. De este, se seleccionó la categoría de “Praderas, pastizales y cultivos anuales” que incluye, entre otros, a los cultivos de trigo y maíz.

Ambos cereales presentan patrones de crecimiento característicos, lo que permite diferenciarlos de otros cultivos anuales a partir de los cambios fenológicos del mismo (Jha *et al.*, 2016). En base a lo anterior, se usaron las curvas fenológicas de ambos cultivos (Anexo 1 y 2) para poder determinar su ubicación espacial entre otros cultivos presentes en el *Landcover* mediante las variaciones temporales de NDVI, ya que este índice refleja los procesos fenológicos de la vegetación (Fan *et al.*, 2008).

Para esto, se usó el software Google Earth Engine (GEE) para cargar la máscara de cultivos anuales proveniente del *Landcover* y aplicar filtros de cambio porcentual de NDVI del 20, 30 y 40% entre los diferentes períodos fenológicos de maíz y trigo por separado (Ecuación 3, Figura 1). El índice fue estimado a partir de imágenes Landsat 5 del año 2009 y 2010, usando tres momentos temporales: (T1) febrero a abril de 2009; (T2) de septiembre a noviembre de 2009 y (T3) de diciembre de 2009 a febrero de 2010. Para cada colección temporal se aplicó un filtro de nubes inferior al 20%, ya que la nubosidad puede corromper la señal de reflectancia, afectando la visualización y obtención de datos de la superficie, lo que es especialmente relevante en la generación de monitoreo agrícola y estudios de cobertura de suelo (Meraner *et al.*, 2020).

$$\begin{array}{ll}
 \text{a)} & \frac{NDVI_{T2} - NDVI_{T1}}{NDVI_{T2}} \times 100 > \begin{array}{l} 20\% \\ 30\% \\ 40\% \end{array} & \text{c)} & \frac{NDVI_{T3} - NDVI_{T2}}{NDVI_{T3}} \times 100 > \begin{array}{l} 20\% \\ 30\% \\ 40\% \end{array} \\
 \text{b)} & \frac{NDVI_{T2} - NDVI_{T3}}{NDVI_{T2}} \times 100 > \begin{array}{l} 20\% \\ 30\% \\ 40\% \end{array} & &
 \end{array}$$

Ecuación 3. Porcentajes de cambio de NDVI considerando distintos momentos temporales (T1, T2 y T3) para el trigo (a y b) y maíz (c).

Luego, se evaluó la precisión alcanzada por cada filtro de NDVI. Para esto, se extrajo el número de píxeles identificados como cultivos de trigo o maíz por distrito y se calculó el área

en hectáreas, permitiendo determinar la superficie de cada cultivo en los diversos distritos según cada filtro. Esto se comparó con el área de los cultivos por distrito declarada por el censo agrícola (2007) mediante los estadísticos R^2 y RMSE (Yang *et al.*, 2021) (Figura 1). Posteriormente se seleccionaron las imágenes con mayor R^2 y menor RMSE para generar una comprobación visual.

Para esta última comprobación se seleccionaron únicamente polígonos con un área superior a las 5 hectáreas, se determinó su centroide y luego se seleccionaron al azar el 10% de estos para cada cultivo. Los centroides fueron cargados en Google Earth Pro, usando la herramienta temporal entre los años 2005 y 2011 para comprobar que los puntos y el área identificada como cultivo correspondiera en su mayor parte al mismo. Adicionalmente, se usó la herramienta Street View cada vez que fuera posible.

Por último, cabe mencionar que la elección del *Landcover* y las imágenes satelitales se basan en la antigüedad del último censo agrícola disponible (2007), considerando que la superficie cultivada dentro de la RM ha disminuido de manera significativa en los últimos años (ODEPA, 2019), por ende, si bien la información satelital actual podría mejorar la precisión con la cual se detectan los cultivos y su superficie, esta no resultaría representativa en cuanto a los cultivos que se presentaban en el momento del censo agrícola.

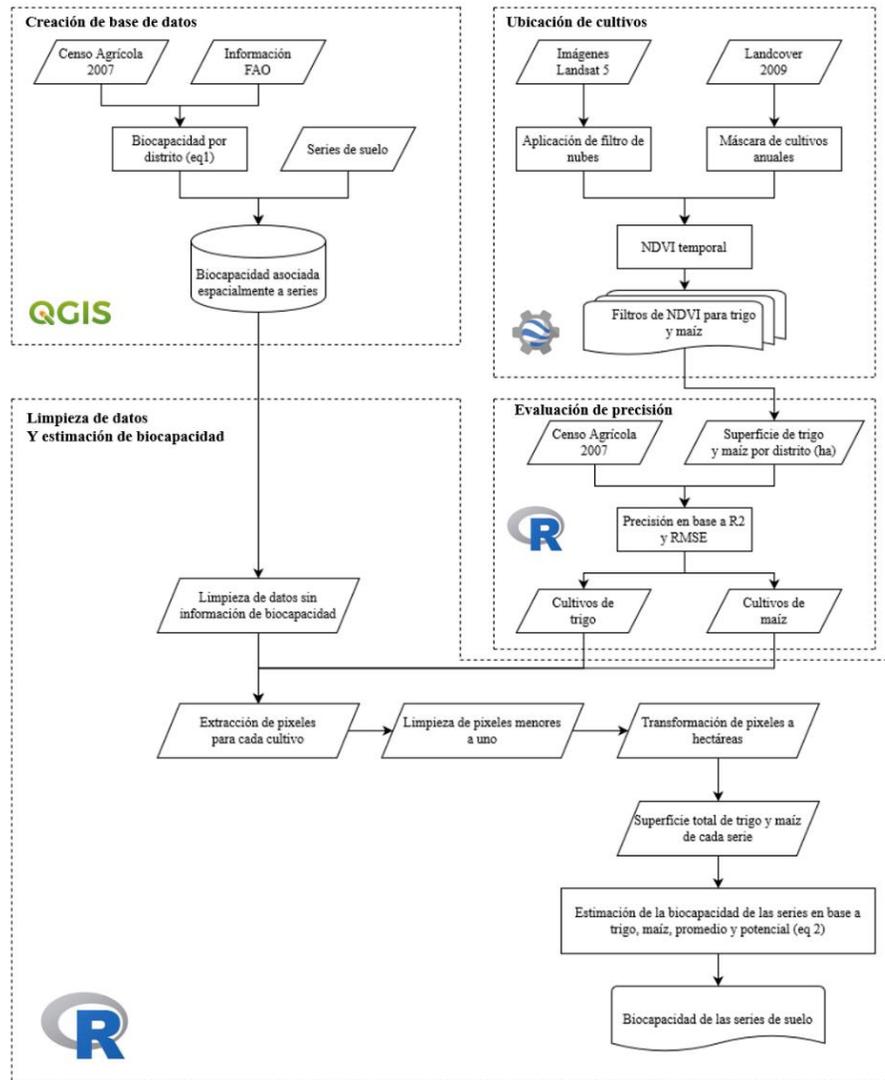


Figura 1. Diagrama de flujo biocapacidad de series de suelo

Cuantificación de la pérdida de potencial de producción de alimentos a causa de la expansión urbana a través del tiempo

Una vez estimada la biocapacidad de cada serie de suelo, ésta fue transformada a la producción potencial de trigo tomando como referencia la producción promedio mundial del año 2018, en base a los datos de la FAO. De este modo, cada GHA será equivalente a 34,273 quintales de trigo, lo que corresponde a 3.427,3 kilogramos. Esto permitió estimar la cantidad de kilogramos de trigo que podría producir anualmente cada serie de suelo si se encontrara disponible en la actualidad.

Adicionalmente, se consideró que cada kilogramo de trigo posee un potencial calorífico de 3.400 kcal kg⁻¹, lo cual fue comparado con el requerimiento calorífico de una persona adulta,

el cual se estima que alcanza las 2.400 kcal día⁻¹ (Curtis *et al.*, 2002; FAO, 2004; USDA, 2012; Malucelli *et al.*, 2014), de este modo se logró estimar la cantidad de personas que podrían alimentarse anualmente a partir de los suelos ocupados en cada pulso de expansión de la ciudad.

Sobre este punto de la metodología, cabe mencionar que diversos autores han dado cuenta respecto a la disminución de la productividad de los cultivos en todo el mundo a causa del cambio climático, indicando una reducción en los ciclos de crecimiento y la esterilización del polen a causa de las altas temperaturas, lo que genera una gran incertidumbre en torno a la productividad de los diversos cultivos en el futuro, en especial en el caso de los cereales, donde el trigo es uno de los cuatro cultivos más estudiados (Chen, 2007; Larson, 2013; Franke *et al.*, 2020).

Este es un fenómeno global, el cual ha sido mitigado por los distintos países a través del uso de diferentes tecnologías (Lobell *et al.*, 2011). En este sentido, se espera que la productividad promedio mundial varíe en el tiempo, ya que responde a la aplicación de estas medidas y a los efectos climáticos presentados en cada zona del planeta. Pese a esto, se asume la relación entre la biocapacidad promedio mundial y la de cada serie de suelo se mantendrá relativamente estable en el tiempo, permitiendo evaluar el nivel de producción potencial de cada serie en comparación con el promedio mundial de un mismo año.

Un ejemplo de esto es la relación entre la productividad promedio mundial y la productividad nacional para los cultivos de trigo, donde la biocapacidad nacional bordea las 1,7 GHA para el trigo desde 2007 hasta 2017. Pese a existir una diferencia con la biocapacidad de 1961, donde la biocapacidad nacional alcanzaba las 1,23 GHA para el trigo.

RESULTADOS

Reconstrucción de series de suelo

En base a la cartografía de la respuesta sísmica (von Igel *et al.*, 2004), se determinó que la zona B presente en la zona central de la capital y al sur del río Mapocho, corresponde a la serie Maipo. Esto se debe a que la zona B corresponde a una unidad con buena respuesta sísmica, con suelos descritos como una zona de “abanicos aluviales constituidos por gravas en matriz arenosa, con niveles de agua subterránea profundos (> 20 m)” (von Igel *et al.*, 2004). Mientras que CIREN describe a la serie Maipo como suelos de origen aluvial, profundos, con una topografía plana, donde su “substrato se encuentra constituido por gravas y piedras con matriz franco arenosa que representa entre el 40 y 60% en volumen” (CIREN, 1996). Por lo demás, la zona B presenta amplias zonas de traslape con la serie Maipo, reforzando la relación entre ambas categorías (Apéndice 1). La zona D1, ubicada entre las comunas de Macul, San Joaquín, San Miguel y Pedro Aguirre Cerda, también fue considerada como serie Maipo.

La zona de respuesta D3, presente en las comunas de Maipú, Cerrillos, Lo Prado y Pudahuel fueron considerados como serie Pudahuel, debido a que esta área de respuesta se caracteriza por ser una “zona de cenizas volcánicas, con fragmentos líticos y pómez subordinados. En algunas zonas se encuentran erosionadas y re depositados, con abundante mezcla de arenas, limos y arcillas.” (von Igel *et al.*, 2004). Lo cual coincide con las características de formación de los suelos de la serie Pudahuel, considerando que se formaron a partir de “cenizas volcánicas, redepositadas por agua, de tipo pumicítico” (ODEPA, 1996). Además de que las zonas reconstruidas incorporadas corresponden a áreas de lomaje suave o planicie, respetando características de ubicación de la serie.

Los suelos categorizados como zona E1, presente en las comunas de Conchalí, Renca, Cerro Navia, Quilicura y Pudahuel fueron consideradas como serie Mapocho, considerando la ubicación de la zona de respuesta sísmica en cercanías del cauce del río con el mismo nombre. Adicionalmente, la zona E1 es descrita como una “zona de abanicos aluviales, constituidos por limos y arcillas, con intercalaciones de gravas, arenas y cenizas volcánicas” (von Igel *et al.*, 2004). Lo cual coincide con el origen y clase textural predominante de la serie Mapocho (CIREN, 1996).

Para la zona de la precordillera al sur los suelos fueron reconstruidos como Los Morros, considerando que esta serie se ubica en terrazas intermedias. Para delimitar la serie se usó como base el polígono de respuesta sísmica C1, categoría que se caracteriza por una alta presencia de bloques y gravas levemente angulosos, lo que coincide con la composición del substrato sobre el cual descansa la serie Los Morros, compuesto en gran medida por piedras angulares. Mientras que hacia la cordillera los suelos fueron reconstruidos como Asociación Challay, considerando que corresponde a “Suelo delgado, formado a partir de rocas volcánicas de colores claros, en topografía de cerros y que se ubican preferentemente en los primeros cordones de la Cordillera de Los Andes y algunos cerros de los Valles Transversales” (CIREN, 1996). Para su reconstrucción también se utilizaron algunos

polígonos de respuesta sísmica C3 y A2, compuestos por gravas y roca respectivamente, ubicados en el piedemonte y la cordillera.

Para la zona de Lo Barnechea, se reconstruyó como serie Santiago a los polígonos de respuesta sísmica D1, B y E2, considerando principalmente la ubicación de estos en el cono aluvial y zona de baja pendiente. Esta serie fue reconstruida también para el polígono D1 presente en la comuna de Puente Alto, considerando la ubicación característica de la serie Santiago en las cercanías del río Maipo (CIREN, 1996).

Por otro lado, la información faltante coincidente con el polígono de respuesta sísmica A3, ubicada en las cercanías de la cordillera de la Costa, fue reconstruida como serie Lo Vásquez y Asociación Mansel, diferenciando ambas series en base a su orientación dentro de la ladera debido al efecto de la humedad (Pfeiffer y Casanova, 2019). En este sentido, las zonas de exposición Oeste fueron atribuidas a la serie Lo Vásquez, mientras que los suelos de exposición Este fueron reconstruidos como Asociación Mansel.

La reconstrucción también incorporó criterio técnico, permitiendo separar algunas zonas de respuesta sísmica en pos de una mejor asignación de series de suelo. Un ejemplo de esto es la serie B presente en la comuna de San Bernardo, donde se encuentran las series de suelo Maipo, Linderos y Buin. Estas se diferenciaron usando como referencia las calles y la ubicación de las series presentes en CIREN, permitiendo disgregar un solo polígono de respuesta sísmica en tres series de suelo diferentes.

La expansión de la ciudad de Santiago desde 1541 al 2017

Santiago antes y después de los españoles (1541)

Previo a la llegada de los españoles, la zona donde hoy se encuentra el centro de la ciudad de Santiago era ocupada por el pueblo Inca (Stehberg y Sotomayor, 2012). Durante este período, los suelos de la ciudad fueron dedicados principalmente a la agricultura debido a que estos eran considerados como suelos de buena calidad, dando lugar a diversos sistemas de chacras en torno al cauce del río Mapocho, ocupando las comunas de Huechuraba, Quilicura, Conchalí y Renca (Stehberg y Sotomayor, 2012). En 1541, Pedro de Valdivia arriba a Santiago con aproximadamente 150 acompañantes (De Ramón, 2007; Sagredo, 2014), y decide establecer la ciudad sobre el mismo lugar donde estaba situado el asentamiento inca, usando “las mismas tierras agrícolas y canales y acequias” (De Ramón, 2007), con la intención de mantener a la población cerca de las tierras con potencial agrícola (Ferrando, 2008).

La traza urbana no fue construida de inmediato, puesto que la población española era mínima y apenas conseguía responder a la resistencia indígena de esa época, lo que generó que la ciudad fuera prácticamente destruida poco después de su fundación (Sagredo, 2014). Se estima que en 1558 aún no había 40 manzanas pobladas, logrando la repartición de la totalidad de la traza urbana realizada por Gamboa (Anexo 3) recién en 1580 (De Ramón, 2007). Pese a esto, considerando al plano esquemático de la fundación de Santiago como la

totalidad de la superficie urbana para la segunda mitad del siglo XVI, es posible estimar que la traza urbana de la ciudad abarcaba un total cercano a las 102 hectáreas (Cuadro 1), correspondientes en su totalidad a la serie Maipo (Figura 2 y 4).

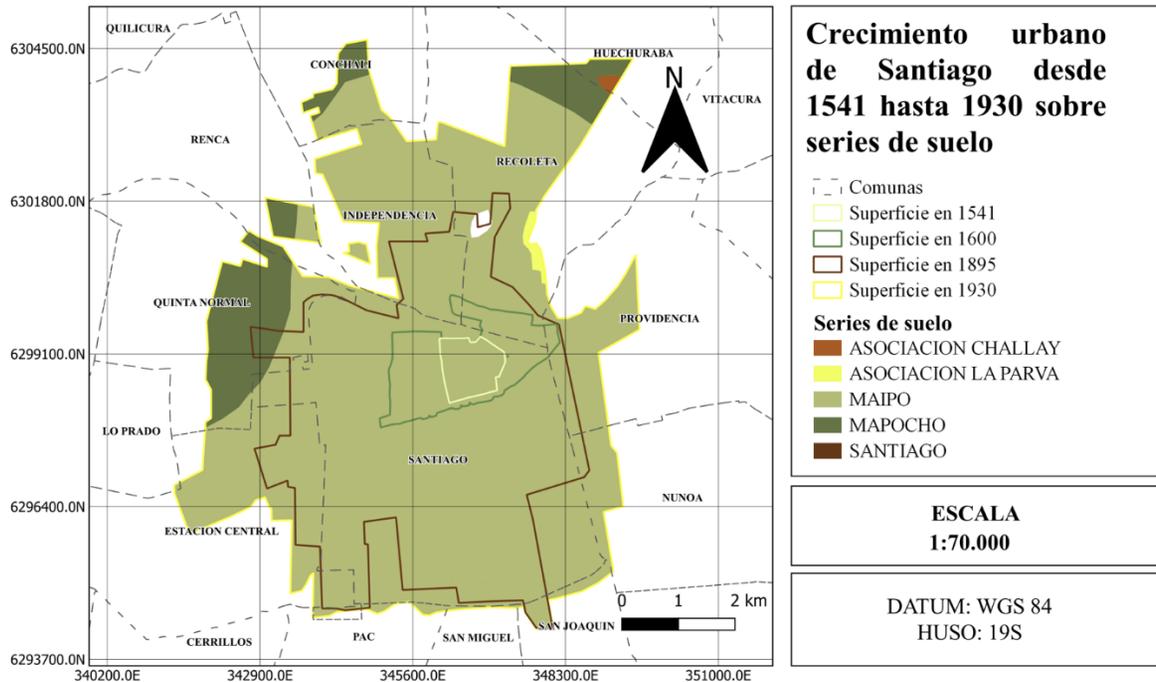


Figura 2. Crecimiento urbano de la ciudad de Santiago sobre las distintas series desde 1541 hasta 1930, considerando la división de comunas actuales

Consolidación de Santiago (1541 - 1600)

El cese de ataques indígenas en la zona propició a que habitantes de diversas ciudades del país, donde aún se mantenía latente el miedo a la resistencia indígena, decidieran abandonar sus tierras y bienes para trasladarse a Santiago; esto derivó en que en 1625 la población de la ciudad superara los dos mil habitantes, bordeando los 12 mil a fines del siglo XVII (de Ramón, 2007). En esta época el Cronista Jerónimo de Quiroga (1690) describe a la ciudad y los alrededores como campos de jardines infinitos, llenos de árboles frutales (de Ramón, 2007). Esta caracterización pone en evidencia la estrecha cercanía que aún mantenía la ciudad de Santiago con su entorno rural.

El croquis realizado por Tomas Thaller Ojeda (Anexo 4) permite estimar que la superficie de la traza urbana de Santiago era de aproximadamente 393 hectáreas (Cuadro 1), marcando un crecimiento aproximado de 291 hectáreas totales en comparación con el periodo anterior (Figura 3). Para este período, la ciudad seguía ocupando en su totalidad suelos correspondientes a la serie Maipo (Figura 2).

Crecimiento e independencia del país (1600 - 1895)

En el siglo XVIII se genera un punto de quiebre para el crecimiento y consolidación del país gracias a la liberalización de la economía y su expansión hacia el mercado peruano, donde la agricultura proveniente de la zona central del país jugó un rol fundamental no solo para el desarrollo de Chile, sino que también para la independencia del país a causa de la consolidación de la aristocracia criolla, momento en que la “producción de trigo desde Aconcagua hasta Colchagua se transformó en la principal actividad económica y fuente de riqueza de la aristocracia, grupo propietario de las haciendas donde se cultivaba el cereal” (Sagredo, 2014).

Tras la independencia del país, la ciudad de Santiago continuó representando un centro de crecimiento poblacional, alcanzando una población de aproximadamente 250.000 personas (Gross, 1985). El aumento de la población vino acompañado con un mayor crecimiento de la ciudad a través del establecimiento de diversos suburbios alrededor de la capital, generando que Santiago se expandiera principalmente hacia el sur de la Cañada de San Francisco (Anexo 5), calle que hoy conocemos como Alameda (Zañartu, 1975; de Ramón, 2007). Mapas de la época permiten estimar que el tamaño de la ciudad en ese entonces alcanzaba las 2.668 hectáreas (Cuadro 1), por lo que el crecimiento de la ciudad respecto a 1600 es de aproximadamente 2.275 hectáreas (Figura 3). Para este período, la ciudad seguía creciendo principalmente por sobre la serie Maipo, comenzando a incluir a la serie Mapocho (Figura 2).

Hasta finales del siglo XIX, la expansión urbana había sido frenada por una serie de normativas que buscaban evitar el deterioro de la homogeneidad y estética de la ciudad, sin embargo, esto cambió tras la promulgación de la ley “Comuna Autónoma” en 1891 (De Ramón, 2007). Dicha ley permitió subdividir la ciudad en las diversas comunas, impulsando aún más la expansión urbana, ya que cada comuna debía tener sus propios servicios municipales, sin importar si la comuna fuera totalmente urbana, rural o mixta, propiciando la conformación de nuevos barrios en las cercanías de cada centro municipal (De Ramón, 2007).

Nuevas comunas (1895 - 1930)

Hasta fines del siglo XIX, si bien la ciudad de Santiago había aumentado su superficie de manera considerable, esta seguía manteniendo algunas características arrastradas desde la colonia como, por ejemplo, una marcada periferia semi rural (De Ramón, 2005). Esto posee a su vez una dimensión cultural, considerando que la población de aquella época tenía una gran afición por los paseos al aire libre, además de interés por mantenerse cerca de sectores rurales donde se producían alimentos, priorizando el consumo de frutas y verduras frescas y económicas (De Ramón, 2005).

Estas características fueron cambiando años después de la promulgación de la ley “Comuna Autónoma” mencionada anteriormente, generando la progresiva creación y subdivisión de las distintas comunas de Santiago, lo que derivó a su vez en la extensión de la ciudad alrededor de los centros comunales y sus instituciones. Esto puede percibirse en la creación

de las comunas de San Miguel (1896), Providencia y Pudahuel (1897), La Florida (1899), Las Condes (1901) y Quinta Normal (1915) (De Ramón, 2007).

Durante este período, el crecimiento de la ciudad fue sustentado principalmente por las ganancias de la explotación salitrera, ocupando los suelos de las afueras de la ciudad (De Ramón, 2007). Para el año 1930 la población de Santiago alcanzaba los 712.533 habitantes (De Ramón, 2007), mientras que la superficie urbanizada de la ciudad abarcaba una totalidad de 5.276,7 hectáreas (Anexo 6). Al comparar la superficie urbana con el periodo anterior, es posible estimar que la ciudad de Santiago creció un total de 2.608,6 hectáreas en 55 años (Cuadro 1). Este crecimiento se centró principalmente sobre la serie Maipo y Mapocho, incorporando en menor medida a los suelos de la Asociación La Parva, Asociación Challay y serie Santiago (Figura 2 y 4).

Recuperación tras la crisis económica de 1930 y el rol del Estado (1930 - 1985)

La crisis económica de 1930 generó una importante reducción de las exportaciones a nivel mundial, afectando especialmente a la minería salitrera y la agricultura nacional, alcanzando una reducción de casi 90 y 86% de las exportaciones respectivamente (Gazmuri, 2012). Generando un gran aumento en el desempleo y la migración de múltiples familias hacia la capital en busca de mejores oportunidades laborales (De Ramón, 2007). Esta migración se vio incrementada, a su vez, a causa de las medidas tomadas por el Estado para amortiguar la crisis, ya que este impulsó una serie de iniciativas para la modernización y fomento a la inversión en industrias manufactureras, las cuales se vieron concentradas especialmente en la ciudad de Santiago, junto con un aumento de la centralización del poder ejecutivo en la capital (De Ramón, 2007). Esto se contrapone con la recuperación financiera de la agricultura en zonas rurales, donde “el lento crecimiento agrícola se manifestó en la disminución de la población rural y favoreció la migración campo-ciudad” (Gazmuri, 2012).

Durante 1958 se elabora el Plan Regulador Intercomunal de Santiago (PRIS) el cual define los límites urbanos de la ciudad, buscando de esta manera impedir el crecimiento no regulado de la capital, siendo aprobado en 1960 (De Ramón, 2007). Sin embargo, estos límites no fueron respetados ni por el mismo Estado, el cual utilizó terrenos agrícolas para la construcción de viviendas sociales, buscando reducir el gasto fiscal; de esta manera el gobierno se convirtió en uno de los principales actores en torno al crecimiento de la ciudad entre 1960 y 1975 (Petermann, 2006). Esta acción fue imitada por diversas empresas, las cuales presionaron al Estado para poder adquirir este tipo de terrenos que eran más económicos que los suelos urbanos (De Ramón, 2007).

Tras el golpe militar de 1973 y la instauración del modelo económico neoliberal, el gobierno reduce su influencia sobre la determinación del uso de suelo, con el objetivo de reducir los altos costos de la vivienda a través del actuar del mercado, por lo que el uso del suelo se verá determinado por la competencia de rentabilidad entre el uso urbano y agrícola (De Ramón, 2007; Trivelli, 2009). Esto elimina las limitaciones normativas para la urbanización, bajo el argumento de que la visión del suelo como un recurso escaso aumenta su valor de manera artificial, por lo que la Política Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU) de 1979 declara al

suelo urbano como un bien no escaso, permitiendo que su destino sea decidido por el libre mercado de tierras (Ferrando, 2008; Trivelli, 2009). La promulgación de esta política generó que la ciudad se expandiera sobre suelos agrícolas “a un ritmo que superó las capacidades de los servicios públicos” y, contrario a la finalidad de la política de liberalización, el precio de los terrenos aumentara aún más (Ferrando, 2008; Trivelli, 2009).

De este modo, la ciudad de Santiago alcanza un ritmo de crecimiento promedio de 635 hectáreas por año en el período que va entre 1930 y 1980, superando con creces el crecimiento de 50 hectáreas anuales de los primeros años del siglo XX; siendo habitado por 4.289.900 personas en 1985 (De Ramón, 2007). Para ese mismo año, se estima que la traza urbana abarcaba una superficie aproximada de 39.738,3 hectáreas, mostrando un crecimiento de 34.461,6 hectáreas en torno al periodo anterior (Cuadro 1). Este crecimiento se centró principalmente sobre la serie Maipo, además de un importante avance sobre las series Mapocho, Los Morros, Pudahuel y Santiago y, afectando en menor medida a suelos de Asociación La Parva, Asociación Challay, entre otras series (Figura 3 y 4).

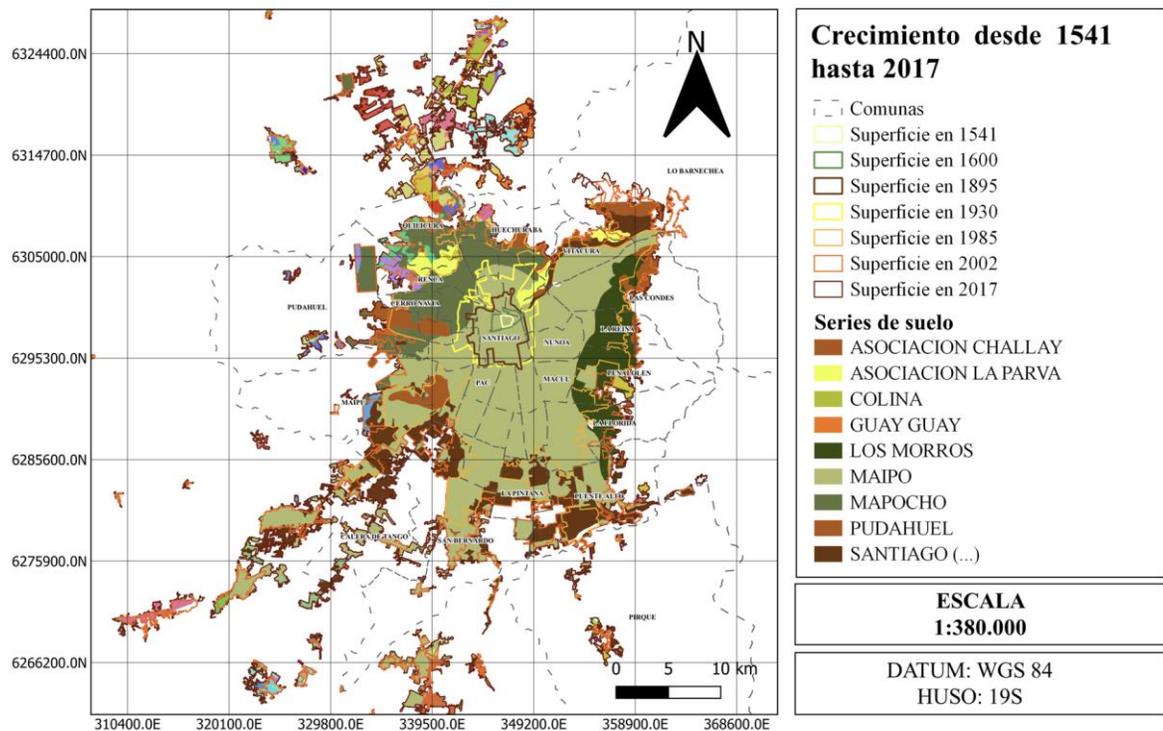


Figura 3. Crecimiento urbano de la ciudad de Santiago sobre las principales series de suelo ocupadas desde 1541 hasta 2017

Nueva dinámica de crecimiento (1985 - 2002)

En 1985 se publica una segunda versión de la PNDU, esta vez señalando al suelo como un recurso escaso; sin embargo, fue derogada en el año 2000, dejando a Chile sin política urbana hasta el año 2013 (Ubilla-Bravo y Chia, 2021). Paralelamente, en 1994, se aprueba el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS) el cual otorga reconocimiento al “patrimonio agroproductivo” y establece un límite de superficie urbanizable máxima de 59.330 hectáreas,

abogando por la densificación del área ya urbanizada a través de proyectos de renovación (Petermann, 2006). Pese a esto, estudios estiman que durante la década de 1990 la ciudad de Santiago creció un promedio de 1.339 hectáreas por año (Ducci, 2002).

En este período se produce un aumento de condominios cerrados dirigidos a grupos de medio-altos y altos recursos, además de conjuntos de viviendas sociales en la periferia de la ciudad, generando un crecimiento disperso de la ciudad de Santiago (De Mattos 2008; Vicuña, 2017). Lo cual se vio representado en el intenso crecimiento de la superficie urbana sobre las comunas de Puente Alto, Maipú, Las Condes y Quilicura (Banzhaf *et al.*, 2013; De Mattos *et al.*, 2014). Adicionalmente, a fines de la década de 1980 se genera un aumento de la urbanización dispersa y fragmentada debido al uso de la figura de “parcelas de agrado” creada en 1980 por la ley N°3.516 (Silva y Vergara-Perucich, 2021).

Para el año 2002, la ciudad contaba con una superficie aproximada de 71.128 hectáreas, marcando un crecimiento de 31.390 hectáreas respecto al período anterior (Cuadro 1). Durante este período el crecimiento de la ciudad ocupa principalmente los suelos de la serie Maipo, Santiago, Mapocho y Pudahuel, además de incorporar una mayor diversidad de series de suelo que períodos anteriores (Figura 3 y 4).

Ciudad actual (2002 - 2017)

En los últimos años la ciudad ha visto un aumento del crecimiento vertical, especialmente en la zona central de la capital, aumentando la concentración de población en el centro de la ciudad (De Mattos *et al.*, 2014). Mientras que el aumento de superficie urbanizada siguió concentrándose en comunas suburbanas como Puente Alto, Maipú, Quilicura, entre otras. (Banzhaf *et al.*, 2013). En 2014, se aprueba una nueva PNDU la cual incluye entre sus objetivos la corrección de las imperfecciones en el mercado del suelo, aunque “no señala cómo se corregirá ni cuáles son estas imperfecciones” (Ubilla-Bravo y Chia, 2021).

Para el año 2017, la ciudad presenta una superficie total de 94.716 hectáreas, señalando un aumento de 23.587 hectáreas en relación al período anterior (Cuadro 1). Este crecimiento ocupa una gran diversidad de series de suelo, alcanzando un total de 76 series afectadas por el aumento de la superficie de la ciudad de Santiago. Entre estas destacan las series Santiago, Maipo, Mapocho y Colina, las cuales soportan gran parte del crecimiento urbano en este último período (Figura 3 y 4).

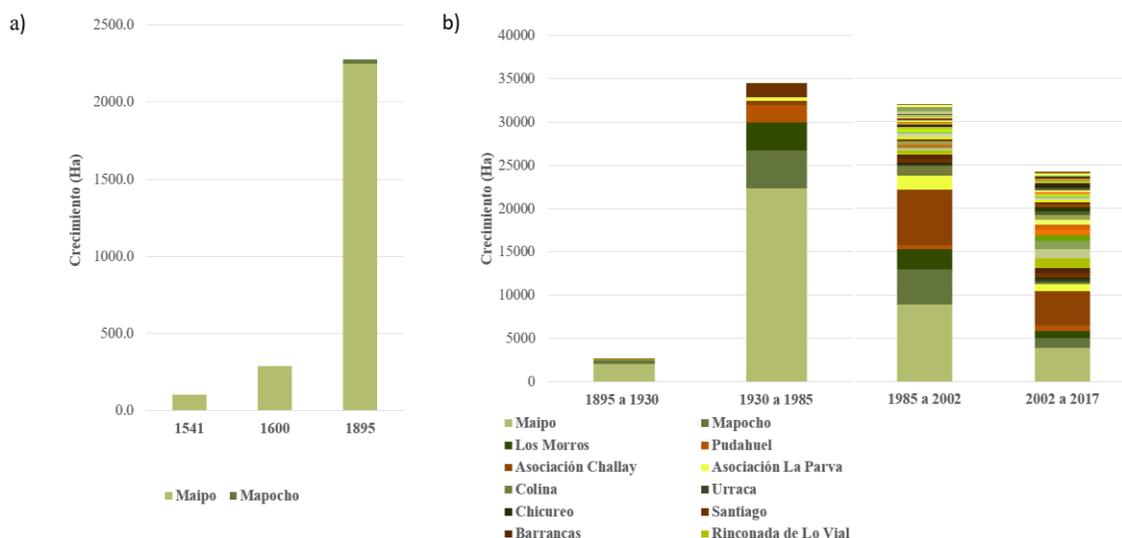


Figura 4. Crecimiento por período sobre las distintas series (a) entre los años 1541 a 1895 y (b) entre los años 1930 y 2017

Cuadro 1. Crecimiento porcentual sobre cada serie de suelo en los distintos períodos

Serie	1541	1541-1600	1600-1895	1895-1930	1930-1985	1985-2002	2002-2017	Sup. total
Maipo	100%	100%	100%	78,9%	64,8%	28,4%	16,4%	42,1%
Mapocho	-	-	-	20%	12,6%	12,7%	4,9%	10,6%
Los Morros	-	-	-	-	9,3%	7,4%	3,4%	6,7%
Pudahuel	-	-	-	-	6,1%	1,7%	2,7%	3,4%
Asociación La Parva	-	-	-	0,7%	1,2%	3,6%	1,2%	1,9%
Asociación Challay	-	-	-	0,3%	1,2%	5%	3,3%	2,9%
Santiago	-	-	-	0,005%	4,5%	20,4%	16,8%	12,6%
Urraca	-	-	-	-	-	0,7%	4,5%	1,4%
Chicureo	-	-	-	-	-	0,3%	4%	1,1%
Colina	-	-	-	-	-	1,5%	4,9%	1,7%
Otros	-	-	-	-	0,2%	18,2%	37,9%	15,5%
Área total (ha)	101,7	291,2	2.275,2	2.608,6	34.461,6	31.390,2	23.587,4	94.715,9

Determinación de los cultivos

En el caso del maíz, el filtro de NDVI de mayor efectividad para determinar la ubicación de dicho cultivo corresponde al filtro de 40%, con un R^2 de 0,57 y RMSE de 111,46 ha (Cuadro 2). Al realizar la comprobación visual se determinó que el 85% de los puntos de control correspondían a cultivos de maíz, mientras que en el resto de los casos se presentaron cultivos de hortalizas y vid. La Figura 5 presenta un ejemplo de los cultivos de maíz detectados y la comprobación visual del mismo, demostrando la diferenciación del maíz de otros cultivos anuales mediante su curva fenológica.

Para el trigo, el filtro de menor error corresponde a un cambio de NDVI del 20% para cada período, con un R^2 de 0,26 y un RMSE de 25,02 ha (Cuadro 2). La comprobación visual reveló que solo el 42% de los puntos de control correspondían a cultivos de trigo, mientras que en el resto de los casos se debía mayoritariamente a zonas de pradera y, en menor medida, a hortalizas.

Cuadro 2. R^2 y RMSE para cada cultivo usando diferentes filtros de cambio de NDVI entre períodos fenológicos.

Filtro NDVI	R^2	RMSE
Maíz 20%	0,55	110,65
Maíz 30%	0,56	111,09
Maíz 40%	0,57	111,46
Trigo 20%	0,26	25,02
Trigo 30%	0,25	25,36
Trigo 40%	0,23	26,14



Figura 5. Determinación de cultivos de maíz al interior de la máscara de cultivos anuales proveniente del Landcover de 2009, usando un filtro de cambio de NDVI del 40% (a). Acompañado de la comprobación visual del mismo en Google Earth Pro usando Street View (b)

Biocapacidad de los distritos

La biocapacidad de los distritos al interior de la región Metropolitana de Santiago es altamente heterogénea en ambos cultivos, tanto de trigo como maíz (Figura 6). En el caso del trigo, la biocapacidad varía desde las 0,18 GHA hasta una productividad máxima de 2,66 GHA, con un promedio de 1,73 GHA (Figura 6, a). Mientras que, para el maíz, la biocapacidad va desde las 0,15 a 3,61 GHA con un promedio de 1,93 GHA (Figura 6, b). Las cartografías de ambos cultivos permiten identificar que la mayoría de los datos se encuentran por sobre una GHA, lo que indica que los distritos de la RM poseen una mayor productividad en comparación con la productividad promedio mundial y, por ende, señalan una alta

fertilidad de los suelos de la región. Pese a esto, no existe relación entre la productividad de ambos cultivos dentro de un mismo distrito (Apéndice 2).

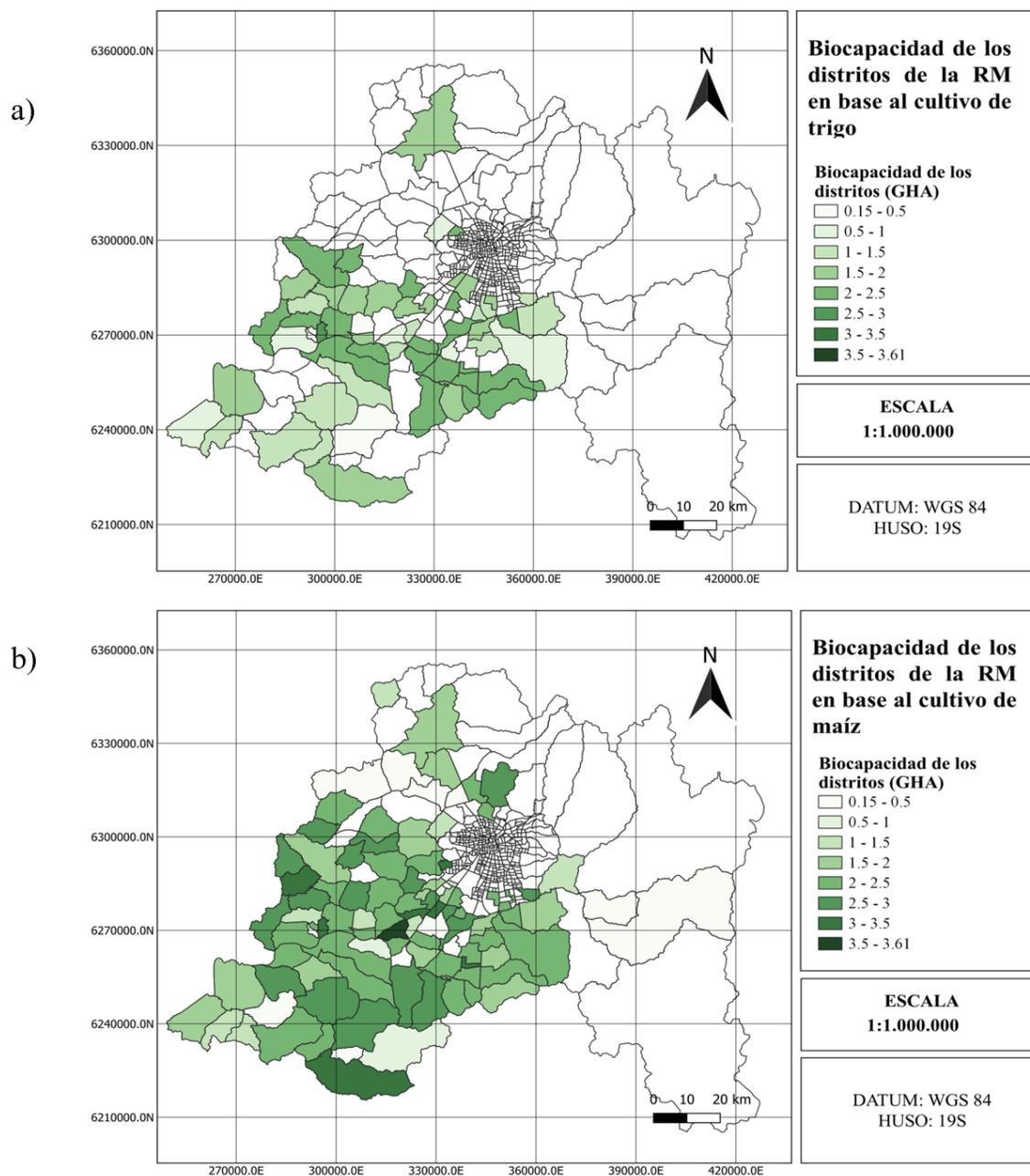


Figura 6. Biocapacidad de los distritos de la RM para (a) trigo y (b) maíz.

Biocapacidad de las series

El uso de los cultivos de trigo y maíz como referentes permitió estimar la biocapacidad de 79 series de suelo y tres terrazas (Anexo 2). De estas, se identificaron 78 series de suelo con presencia de cultivos de maíz y 69 para el cultivo de trigo, mientras que 62 series contaban con la presencia de ambos.

En el caso del trigo, se determina una biocapacidad promedio de 1,59 GHA, donde los suelos de Terrazas Remanentes (2,31 GHA), y las series de suelo Los Cardenales (2,27 GHA), Cuesta Barriga (2,19 GHA), Pataguilla (2,18 GHA) y Valdivia de Paine (2,18 GHA) son las más productivas. Mientras que las series Santa Sara, Asociación Cuzco, Cerrillos y Peralillo son las de menor producción (0,94 GHA), estando muy cercanas a igualar la productividad promedio mundial para el cultivo de trigo. Por su parte, el cultivo de maíz determina un promedio de 2,06 GHA, con las series Chinihue (2,87 GHA), Estancilla (2,72 GHA) y Alcantar (2,66 GHA) como las más productivas. Mientras que las series Santa Rosa (0,15 GHA), Lampa (0,43 GHA) y Barrancas (1 GHA) corresponden a las de menor producción.

Para las series que poseen ambos cultivos, se determina que en promedio estas poseen una productividad que va desde las 0,97 hasta 2,32 GHA. Mientras que, en el caso de la productividad potencial, es decir, la mayor producción estimada para cada serie, el 98% de las series cuentan con una biocapacidad potencial superior a una GHA y un 30% mayor a dos GHA (Figura 7). Mientras que la media de los valores de biocapacidad potencial es de 2,07 GHA. Pese a esto, y al igual que en el caso de los distritos, no existe una relación entre la biocapacidad de ambos cultivos (Anexo 3).

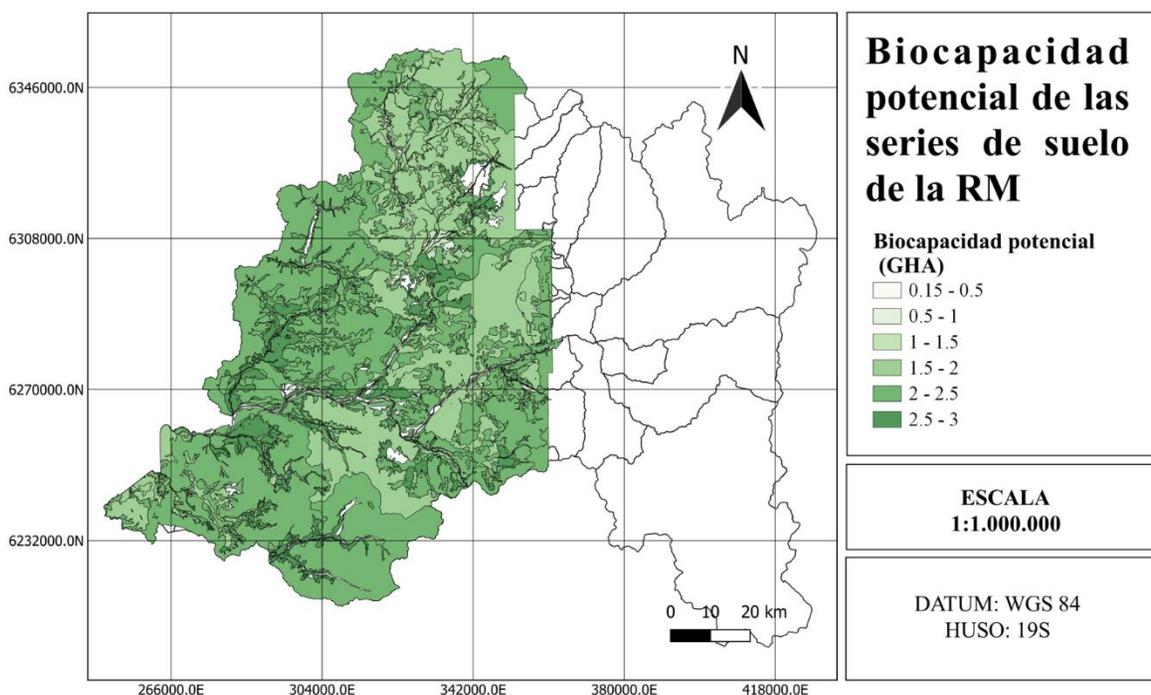


Figura 7. Biocapacidad potencial de las series de suelo de la RM.

Biocapacidad de las series bajo la ciudad de Santiago

En torno a las series de suelo ocupadas por el crecimiento de la ciudad de Santiago, desde su fundación hasta la actualidad, fue posible estimar la biocapacidad del 92% de las series. A continuación, se presenta la biocapacidad estimada según los distintos cultivos, el promedio y la biocapacidad máxima detectada para las principales series ocupadas por la expansión urbana de la capital (Cuadro 3).

Cuadro 3. Biocapacidad de las principales series de suelo ocupadas por la expansión de la ciudad desde 1541 a la actualidad, usando como referencia a los cultivos de trigo, maíz, el promedio entre ambos y el de mayor productividad.

Serie	Trigo	Maíz	Promedio	Potencial
Maipo	1,86	1,94	1,90	1,94
Mapocho	1,02	2,02	1,52	2,02
Los Morros	1,71	1,52	1,62	1,71
Pudahuel	1,75	2,57	2,16	2,57
Asociación La Parva	-	1,60	1,60	1,60
Asociación Challay	1,67	2,06	1,86	2,06
Santiago	1,32	2,45	1,88	2,45
Urraca	-	2,00	2,00	2,00
Chicureo	-	2,59	2,59	2,59
Colina	-	-	-	-

Adicionalmente, se identificaron seis series de suelo de las cuales se desconoce su productividad, incluyendo a la serie Colina, la cual fue altamente relevante en la expansión urbana de 2002 (1,53% del total) y 2017 (4,87% del total). Además de un área total de 466,9 ha de las cuales se desconoce la serie de suelo asociada. Ambas categorías abarcan una superficie que supera las tres mil hectáreas, que no pudieron ser incluidas dentro de los efectos de la expansión urbana de la ciudad de Santiago, lo que corresponde a un 3,28% de la superficie alcanzada hasta 2017 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Series sin información de biocapacidad y la superficie en hectáreas ocupada por la expansión de Santiago desde 1541 a 2017.

Serie	Superficie (ha)
Colina	1.628,04
Guay Guay	650,33
Lo Aguirre	98,03
Lo Vargas	26,63
Mingaco	236,90
San Luis	5,64
Sin reconstrucción	466,90

Pese a esto, los resultados obtenidos señalan que el crecimiento de la ciudad de Santiago se concentró, incluso en la estimación más conservadora, en suelos de alta productividad agrícola. Del mismo modo, al analizar la biocapacidad potencial de la totalidad de las series de suelo ocupadas por la expansión urbana de Santiago, estas se encuentran en un 97% por sobre la GHA y en un 66% por sobre dos GHA (Figura 7). Esto genera que, al comparar la superficie real de expansión, extraída de las distintas cartografías y mapas históricos, con las estimaciones derivadas de la biocapacidad, la pérdida de suelos sea cercano al doble (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación entre la superficie real ocupada por cada pulso de expansión y las superficies estimadas (SE) a partir de la biocapacidad identificada para cada serie, en base al trigo, maíz, promedio de ambos cultivos y el de mayor productividad¹.

Perío- do	Superficie real (ha)	SETrigo (GHA)	SEMaíz (GHA)	SEPromedio (GHA)	SEPotencial (GHA)
1541	101,7	189,54	197,68	193,61	197,68
1541- 1600	291,2	542,94	566,27	554,61	566,27
1600- 1895	2.275,2	4.221,57	4.425,53	4.323,55	4.425,53
1895- 1930	2.608,6	4.418,49	5.073,16*	4.761,247	5.104,01
1930- 1985	34.461,6	58.809,49*	67.229,59*	63.371,92	68.575,70
1985- 2002	31.390,2	45.257,36*	59.048,07*	54.513,54*	62.427,70*
2002- 2017	23.587,4	25.992,89*	44.541,68*	40.542,83*	45.524,60*
Total	94.715,9	139.432,30*	181.081,99*	168.261,30*	186.821,50*

En cuanto a la pérdida de funcionalidad de los suelos, esta se estimó a través del número de personas que se podrían alimentar anualmente si los suelos usados por la expansión de la ciudad estuvieran disponibles en la actualidad, considerando la producción de trigo en cada escenario de biocapacidad de los suelos y el potencial calorífico del cultivo. Estas estimaciones indican que los suelos usados por el crecimiento de la ciudad de Santiago podrían alimentar a un número de personas que va desde los 1,86 a 2,49 millones (Cuadro 6). Siendo el período que va entre los años 1930 y 1985 el que generó mayores impactos sobre la disponibilidad de suelos de alta calidad agrícola. Del mismo modo, los periodos posteriores presentan un impacto importante sobre la disponibilidad de suelos, concentrando un 94,5% de la pérdida de funcionalidad de los suelos desde 1930 hasta 2017, considerando el número de personas que se podrían alimentar anualmente en base a esos suelos.

¹ * Indica que no existe información sobre la biocapacidad de todas las series ocupadas por la urbanización en dicho período.

Cuadro 6. Estimación del número de personas que podrían alimentarse anualmente a partir de los suelos ocupados por el crecimiento urbano de Santiago²

Periodo	Trigo (Personas/ año)	Maíz (Personas/ año)	Promedio (Personas/ año)	Potencial (Personas /año)	Porcentaje potencial
1541	2.520,88	2.629,20	2.575,04	2.629,20	0,11%
1541- 1600	7.221,12	7.531,41	7.376,27	7.531,41	0,30%
1600- 1895	56.146,92	58.859,58	57.503,25	58.859,58	2,36%
1895- 1930	58.765,85	67.473,03*	63.324,59	67.883,32	2,73%
1930- 1985	782.166,22*	894.153,55*	842.846,54	912.056,81	36,62%
1985- 2002	602.340,76*	785.663,08*	725.400,90*	830.706,29*	33,36%
2002- 2017	350.947,97*	596.466,01*	543.871,74*	610.719,71*	24,52%
Total	1.860.109,71*	2.412.775,87*	2.242.898,32*	2.490.386,32*	

² * Indica que no existe información sobre la biocapacidad de todas las series ocupadas por la urbanización en dicho período.

DISCUSIÓN

Determinación espacial de cultivos

La determinación espacial de los cultivos correspondió al punto más desafiante de la investigación, considerando los bajos niveles de confianza en torno a la predicción (Cuadro 2). Sin embargo, cabe considerar que el mapeo de cultivos es complejo, incluso con el uso de puntos de entrenamiento específicos de cada cultivo e imágenes satelitales actuales de mejor resolución (Chu et al., 2016; Dong et al., 2020; Yang et al., 2021; Cai et al., 2022). En este sentido, el mapeo de maíz logró alcanzar coeficientes de correlación, entre el área determinada y el área señalada por el censo agrícola, similares a otros estudios (R^2 0,67) (Bolton y Friedl, 2013). Lo cual se refuerza mediante la comprobación visual. Mientras que en caso del trigo se presenta una precisión mucho menor en comparación con otros estudios (Chu et al., 2016; Cai et al., 2022), confundiendo en muchos casos al cultivo con áreas de pradera debido a las similitudes fenológicas de ambas coberturas (Yang et al., 2021).

Adicionalmente, cabe considerar que en la actualidad el mapeo de cereales ha vivido un auge a nivel mundial, especialmente en países como China. Debido a la necesidad de generar información espacial precisa y actualizada en torno a los cultivos para así resguardar la producción y seguridad alimentaria de los países (Chu et al., 2016; Dong et al., 2020; Yang et al., 2021; Cai et al., 2022). En este sentido, la percepción remota corresponde a una alternativa económica, rápida y de fácil acceso en comparación con otros métodos tradicionales de terreno (Wu y Li, 2012). Lo que deriva en un aumento de metodologías de mapeo mediante información satelital, planteando la oportunidad de mejorar el mapeo aplicado durante el estudio, en caso de contar con información censal actualizada en el futuro, o extenderlo a otras ciudades del país.

Biocapacidad de los suelos de la RM

El estudio de biocapacidad de las distintas series de suelo señala la alta productividad de los suelos de la región, siendo en la mayoría de los casos superior al promedio mundial (Figura 6 y Cuadro 3). Esta estimación varía entre los cultivos estudiados, pudiendo señalar que existen diferencias de rendimiento de los cultivos debido a los requerimientos propios de los mismos. Por ejemplo, el cultivo de maíz requiere de suelos profundos y planos (Lagos, 1982); mientras que el trigo puede ser cultivado en zonas menos profundas y con una ligera pendiente, pese a mantener una mayor productividad en zonas profundas (Martínez, 1976; Jobet *et al.*, 2016). Del mismo modo, es posible que la inclusión de otros cultivos indique índices de biocapacidad diferentes, por ende, se identifica a la estimación potencial como un buen referente para poder comprender la capacidad productiva máxima de los distintos suelos en las condiciones climáticas y de manejo actuales.

Crecimiento de la ciudad de Santiago y las series de suelo ocupadas por el proceso

Históricamente, la fertilidad de los suelos sobre los cuales se emplaza la ciudad de Santiago ha sido un factor clave para el asentamiento y expansión de la misma. El estudio por períodos permitió percibir los patrones de crecimiento de la ciudad en cada pulso de expansión, identificando un cambio en torno a la forma centralizada y compacta en que había crecido la ciudad hasta 1930 (Figura 3). Tras dicho período, la ciudad presenta un crecimiento disperso y fragmentado, el cual es destacado por otros autores debido a que las nuevas zonas urbanas se emplazan de forma intercalada entre áreas agrícolas y terrenos baldíos de zonas suburbanas y periurbanas (Puertas et al., 2014; Silva y Vergara-Perucich, 2021).

Los resultados, además, plantean una mayor diversidad de series de suelo afectadas por el crecimiento disperso de la ciudad en los últimos años, generando una pérdida de funcionalidad de los mismos al ser ocupados por la urbanización (Figura 3 y 4). Este tipo de crecimiento es identificado como parte del fenómeno *urban sprawl*, el cual se ha descrito como una problemática creciente a nivel global debido al ineficiente uso del suelo, alta dependencia de transporte privado, segregación económica, polución del aire, etc. (Barton y Ramírez, 2019; Silva y Vergara-Perucich, 2021). Adicionalmente, este patrón de crecimiento disperso de la ciudad disminuye la distancia entre viviendas y cultivos, aumentando la probabilidad de que estos últimos sean urbanizados (Ferrara et al., 2014). Lo que a nivel mundial ha generado una rápida disminución de tierras agrícolas en la franja urbano-rural (Tan et al., 2005; Liu y Zhou, 2021).

Pérdida de suelos agrícolas

En todos los escenarios evaluados se evidencia que la pérdida de suelos estimada para cada período de expansión de la ciudad de Santiago es superior a la pérdida real cuantificada por el aumento de la superficie urbana, señalando que la ciudad creció sobre suelos altamente productivos (Cuadro 5). Dicha pérdida de suelos de alta calidad es especialmente preocupante si se considera el trabajo de Henríquez-Dole et al. (2018) en la cuenca del Maipo, donde se identifica que el cambio de uso de suelo a causa de la urbanización está concentrado principalmente en zonas agrícolas. De esta forma, la expansión urbana de la ciudad de Santiago no corresponde solo a una pérdida teórica de suelos altamente productivos, sino que a una desaparición real de zonas agrícolas de alta calidad. Este fenómeno se asimila al vivido en otras regiones del mundo, donde se ha identificado una preocupante ocupación de tierras agrícolas altamente productivas y suelos de alta calidad a causa de la expansión urbana (Tan et al., 2005; Kuang et al., 2016; Liu et al., 2018; Liu y Zhou, 2021).

La información referente a la pérdida de suelos en el contexto urbano es de vital importancia si se considera que, a nivel global, solo un tercio de la población podría alimentarse de cultivos locales en un radio de 100 km (Kinnunen et al., 2020). Por lo que la disponibilidad de alimentos y el acceso a los mismos depende en gran medida de la importación. En este sentido, la seguridad alimentaria a nivel global es altamente susceptible a la estabilidad del mercado importador, por lo que conflictos internacionales, fenómenos climáticos extremos,

entre otros, podrían desestabilizar la provisión de alimentos y afectar el acceso a los mismos de manera significativa (Liu y Zhou, 2021). Tal y como se vivió durante la pandemia de COVID-19, la cual alteró la cadena de suministros y el comercio exterior a nivel mundial (Laborde *et al.*, 2021).

Consecuencias sobre la seguridad alimentaria

Durante el estudio, no fue posible captar la totalidad del efecto de la expansión urbana sobre los suelos, en especial durante los últimos períodos dado que se desconoce la productividad potencial de algunos de los suelos ocupados por la ciudad en dicho período de expansión (Cuadro 4). Pese a esto, el estudio señala una pérdida del potencial de alimentar a un número cercano a los 2,5 millones de personas a causa del asentamiento y expansión histórica de la capital, de las cuales el 94,5% se deben a la expansión vivida desde 1930 hasta 2017 (Figura 4, Cuadro 6). Esto podría agravarse aún más si se considera el crecimiento proyectado para Santiago, alcanzando las 93.000 ha para 2045 (Puertas *et al.*, 2014), disminuyendo la capacidad de la región para proveer de alimentos a la creciente población en un escenario global donde la producción local parece tomar más y más importancia para sostener la seguridad alimentaria de los países (Rodríguez *et al.*, 2020).

Del mismo modo, cabe considerar que, si bien Chile posee uno de los mejores niveles de seguridad alimentaria dentro de Latino América, la demanda nacional se sostiene en gran medida a través de la importación de alimentos como legumbres (70 a 90%), papas (40%) y cereales (50%), siendo estos últimos dos, los de menor dependencia externa (Méndez y Araya-Valenzuela, 2017; Egaña *et al.*, 2020). Estas cifras reflejan la susceptibilidad del país frente a la estabilidad de la importación de alimentos, realzando la importancia de los suelos nacionales para sostener la seguridad alimentaria del país en el futuro.

Crecimiento de otras ciudades del país y la importancia de considerar al suelo en la planificación territorial

La información en torno al potencial productivo de los distintos suelos presentes en el país es de especial relevancia si se considera el aumento del crecimiento disperso (*urban sprawl*) en múltiples ciudades de Chile, siguiendo patrones de crecimiento similares a los de la ciudad de Santiago (Barton y Ramírez, 2019). A esto, se suman los efectos del cambio climático sobre los cultivos en el mundo, ya que el aumento de las temperaturas ha disminuido la productividad de los cultivos y desplazado áreas de cultivo hacia sectores que antes no eran usados para la agricultura debido a sus bajas temperaturas (Chen, 2007; Larson, 2013; Liu y Zhou, 2021). Por lo que es posible que las dinámicas agrícolas del país cambien en los próximos años, al igual que el uso de los suelos.

En este sentido, es fundamental contar con una planificación territorial que considere al suelo, reduciendo la ocupación de suelos para uso urbano, concentrándolos en suelos de menor calidad (Zambon *et al.*, 2018; UNHabitat, 2020). Disminuyendo así el impacto de la

expansión urbana sobre la producción de alimentos y los ecosistemas naturales (Van Vliet, 2019).

CONCLUSIONES

El estudio permitió identificar que la RM posee suelos altamente productivos, sin embargo, no se observó una relación entre la productividad de ambos cultivos a nivel de distrito ni de serie de suelo, lo que podría deberse a los requerimientos propios de los cultivos. Por esto, se define a la biocapacidad potencial como la estimación más adecuada para evaluar la funcionalidad de los suelos de la región en base a las características climáticas y de manejo actuales, contemplado la posibilidad de incorporar otros cultivos para mejorar la precisión de la estimación.

Por su parte, el estudio por periodos permitió dilucidar las dinámicas de crecimiento de la ciudad de Santiago, identificando una mayor dispersión tras 1930, afectando a un mayor número de series de suelo. Por lo demás, se determinó que la ciudad creció, en todos los periodos, principalmente sobre series de suelo altamente productivas, estando en la mayoría de los casos por sobre la productividad promedio mundial. En este sentido, la expansión urbana de Santiago significó una pérdida del potencial de alimentar a casi 2,5 millones de personas, de las cuales el 95% se deben a la expansión vivida desde 1930 hasta 2017. Reduciendo la disponibilidad de suelos de buena calidad y zonas agrícolas altamente productivas, en un contexto donde la agricultura local es cada vez más relevante a nivel mundial para resguardar la seguridad alimentaria de los países.

Adicionalmente, es importante considerar el efecto de la expansión urbana de otras ciudades del país, además del movimiento de la agricultura a causa de la baja disponibilidad de suelos y efectos del cambio climático. Por lo que es fundamental ampliar el estudio en torno a los suelos de otras regiones del país, considerando además otras funciones y servicios ecosistémicos de los suelos. Para así generar una planificación territorial que considere al suelo como un factor relevante, contribuyendo de esta manera a la resiliencia y sustentabilidad de las ciudades y el país.

LITERATURA CITADA

- Adhikari, K., and A. Hartemink. 2016. Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* 262: 101–111.
- Aguayo, M., A. Pauchard, G. Azócar, and O. Parra. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural* 82 (3): 361-374.
- 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.
- Barton, J., and M.I. Ramírez. 2019. The Role of Planning Policies in Promoting Urban Sprawl in Intermediate Cities: Evidence from Chile. *Sustainability* 11(24): 7165.
- Baveye, P. 2015. Grand challenges in the research on soil processes. *Frontiers in Environmental Science* 3(10).
- Bolton, D., and M. Friedl. 2013. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology* 173 (15): 74 – 84.
- Bouma, J. 2014. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177 (2): 111-120.
- Cai, W., J. Tian, X. Li, L. Zhu, and B. Chen. 2022. A New Multiple Phenological Spectral Feature for Mapping Winter Wheat. *Remote Sensing* 14 (18): 4529.
- Chen, J. 2007. Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security. *Catena* 69 (1): 1-15.
- Chu, L., Q.S. Liu, C. Huang, and G.H. Liu. 2016. Monitoring of winter wheat distribution and phenological phases based on MODIS time-series: a case study in the Yellow River Delta, China. *Journal of Integrative Agriculture* 15(10): 2403-2416.
- CIREN. 1996. Descripciones de suelos materiales y símbolos estudio agrológico región Metropolitana.
- Curtis, B., S. Rajaram and H. Gómez. 2002. Bread Wheat: improvement and production. FAO. Rome, Italy. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20033015139> (Consultado en julio de 2021).
- De Mattos, C. 2008. Globalización, negocios inmobiliarios y mercantilización del desarrollo urbano. p. 23–40. *In:* Pereira, C., and R. Dattwyler (eds.) Producción inmobiliaria y

reestructuración Metropolitana en América Latina. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

De Mattos, C., L. Fuentes, and F. Link. 2014. Tendencias recientes del crecimiento metropolitano en Santiago de Chile: ¿Hacia una nueva geografía urbana?. *Revista INVI* 29(81): 193-219.

De Ramón, A. 2007. Santiago de Chile: Historia de una sociedad urbana. Editorial Catalonia. Santiago, Chile.

Dong, Q., X. Chen, J. Chen, C. Zhang, L. Liu, X. Cao, Y. Zang, X. Zhu, and X. Cui. 2020. Mapping winter wheat in North China using sentinel 2A/B data: a method based on phenology-time weighted dynamic time warping. *Remote Sensing* 12 (2020): 1274.

Ducci, M.E., 2002. Área urbana de Santiago 1991-2000: expansión de la industria y la vivienda. *EURE* 28(85): 187-207.

Egaña, D., L. Rodríguez, and C. Baginsky. 2020. Escasez de legumbres: un problema de seguridad y soberanía alimentaria. Disponible en <https://www.uchile.cl/noticias/163902/escasez-de-legumbres-un-problema-de-seguridad-y-soberania-alimentaria> (Consultado en agosto de 2021).

Fan, L., Y. Gao, H. Brück, and Ch. Bernhofer. 2008. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology* 95: 151-156.

FAO. 2004. Human Energy Requirements.

Ferrando, F. 2008. Santiago de Chile: antecedentes demográficos, expansión urbana y conflictos. *Revista de Urbanismo* (18).

Ferrara, A., L. Salvati, A. Sabbi, and A. Colantoni. 2014. Soil resources, land cover changes and rural areas: towards a spatial mismatch?. *The Science of the total environment* 478: 116–122.

Franke, J., C. Muller, J. Elliott, A. Ruane, J. Jägermeyr, J. Balkovic, P. Ciais, M. Dury, P. Falloon, C. Folberth, L. Francois, T. Hank, M. Hoffmann, R.C. Izaurralde, I. Jacquemin, C. Jones, N. Khabarov, M. Koch, M. Li, W. Liu, S. Olin, M. Phillips, T. Pugh, A. Reddy, X. Wang, K. Williams, F. Zabel, and E. Moyer. 2020. The GGCM Phase 2 experiment: global gridded crop model simulations under uniform changes in CO₂, temperature, water, and nitrogen levels (protocol version 1.0). *Geoscientific Model Development* 13 (5): 2315 – 2336.

Friedrich, T. 2014. La seguridad alimentaria: retos actuales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 48 (4): 319-322.

Gazmuri, C. 2012. Historia de Chile 1891-1994: Política, economía, sociedad, cultura, vida privada, episodios. RIL Editores. Santiago, Chile.

Gross, P. 1985. El hábitat colectivo. p. 19-38 *In*: León, L. (ed.) Santiago de Chile: Características histórico ambientales, 1891 – 1924. Londres, Inglaterra.

Harris, R. 2015. Suburbanization and Suburbanism. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*: 660–666.

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.

Henríquez-Dole, L., T.J. Usón, S. Vicuña, C. Henríquez, J. Gironás, and F. Meza. 2018. Integrating strategic land use planning in the construction of future land use scenarios and its performance: the Maipo River Basin, Chile. *Land Use Policy* 78: 353 – 366.

INE. 2017. Síntesis de resultados Censo 2017. Disponible en <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf> (Consultado en agosto de 2021).

Janků, J., O. Jakšík, J. Kozák, and A. Marhoul. 2016. Estimation of land loss in the Czech Republic in the near future. *Soil & Water Research* 11 (3): 155–162.

Jha, A., R. Ranjan, and A.S. Nain. 2016. Land use, land cover assessment and discrimination of wheat crop using remote sensing in Tarai region of Uttarakhand. *International Journal of Basic and Applied Agricultural Research* 14 (2): 134-138.

Jobet, C., C. Ortiz, and H. Pauchard. 2016. Recomendaciones técnicas para el cultivo de trigo en la Región de Los Lagos. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/66763/Ficha%20T%c3%a9cnica%20INIA%20N%c2%b0%2005?sequence=1&isAllowed=y> (Consultado en febrero de 2023).

Kinnunen, P., J.H.A. Guillaume, M. Taka, P. D’Odorico, S. Siebert, M.J. Puma, M. Jalava, and M. Kummu. 2020. Local food crop production can fulfil demand for less than one-third of the population. *Nature Food* 1: 229 – 237.

Kitzes, J., A. Peller, S. Goldfinger, and M. Wackernagel. 2007. Current Methods for Calculating National Ecological Footprint Accounts. *Science for Environment & Sustainable Society* 4 (1).

Kuang, W., J. Liu, J. Dong, W. Chi, and C. Zhang. 2016. The rapid and massive urban and industrial land expansions in China between 1990 and 2010: A CLUD-based analysis of their trajectories, patterns, and drivers. *Landscape and Urban Planning* 145: 21-33.

Laborde, D., W. Martin, J. Swinnen, and R. Vos. 2020. COVID-19 risks to global food security. *Science* 369 (6503): 500-502.

- Lagos, C. 1982. Maíz: suelo, variedad, densidad y época de siembra. *Investigación y Progreso Agropecuario Quilamapu*, (13): 2 - 5.
- Larson, C. 2013. Losing Arable Land, China Faces Stark Choice: Adapt or Go Hungry. *Science*, 339 (6120): 644-645.
- Lehmann, J., D. Bossio, I. Kögel-Knabner, and M.C. Rilling. 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment* 1: 544 - 553.
- Liu, Y., Z. Zhang, and Y. Zhou. 2018. Efficiency of construction land allocation in China: An econometric analysis of panel data. *Land Use Policy* 74: 261 – 272.
- Liu, Y., and Y. Zhou. 2021. Reflections on China's food security and land use policy under rapid urbanization. *Land Use Policy* 109.
- Lobell D., W. Schlenker, and J. Costa-Roberts. 2011. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science* 333(6042): 616 – 620.
- Luebert, F., and P. Plissock. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Universitaria Chile, Santiago, Chile.
- Luzio, W. 2010. Suelos de Chile. Universitaria Chile, Santiago, Chile.
- Luzio, W., and M. Casanova. 2006. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería de Suelos, Servicio Agrícola y Ganadero. Disponible en <http://bosques.ciren.cl/handle/123456789/25409> (Consultado en agosto de 2021).
- Malucelli, F., G. Certini, and R. Scalenghe. 2014. Soil is brown gold in the Emilia-Romagna region, Italy. *Land Use Policy* 39: 350–357.
- Martínez, M. 1976. Diferentes alternativas en la preparación de suelos para trigo. *Investigación y Progreso Agrícola* 8(1): 6 – 8.
- Méndez, C., and R. Araya-Valenzuela. 2017. Cambio climático y producción de cultivos anuales esenciales: Una mirada desde la seguridad alimentaria en Chile. *Política y Estrategia* (129): 157-187.
- Meraner, A., P. Ebel, X. Xiang, and M. Schmitt. 2020. Cloud removal in Sentinel-2 imagery using a deep residual neural network and SAR-optical data fusion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 166: 333-346.
- Ministerio de Agricultura. 1962. Recopilación de antecedentes de suelos: Provincia de Santiago. Zona III Colina – Batuco.

Monfreda, C., M. Wackernagel, and D. Deumling. 2004. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy* 21(3): 231-246.

Morán, S., and C. Díaz. 2020. El objetivo de desarrollo sostenible 11 de la Agenda 2030. *Cuadernos de Estrategia* (206): 21-68.

ODEPA. 2019. Panorama de la agricultura chilena. Disponible en <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/panorama2019Final.pdf> (Consultado en agosto de 2021).

Petermann, A. 2006. ¿Quién extendió a Santiago? Una breve historia del límite urbano 1953-1994. p. 205-230. *In*: Parker, A., and A. Aravena (eds.) *Santiago: dónde estamos y hacia dónde vamos*. Centro de Estudios Públicos. Santiago, Chile.

Pfeiffer, M., and M. Casanova. 2019. Guide to soil excursion at mediterranean Chile, German Greve Silva experimental station, Rinconada de Maipu, region of Santiago: Joint workshop for digital soil mapping and global soil map. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/347902741_GUIDE_TO_SOIL_EXCURSION_A_T_MEDITERRANEAN_CHILE_GERMAN_GREVE_SILVA_EXPERIMENTAL_STATION_RINCONADA_DE_MAIPU_REGION_OF_SANTIAGO_JOINT_WORKSHOP_FOR_DIGITAL_SOIL_MAPPING_AND_GLOBAL_SOIL_MAP (Consultado en abril de 2022).

Pfeiffer, M., J. Perez-Quezada, and M. González. 2019. Capítulo 5: Suelos. p. 274-317. *In*: *Informe País: Estado el Medio Ambiente en Chile 2018*. Universidad de Chile.

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: 425 – 425.

Rabot, E., M. Wiesmeier, S. Schüller, and H.-J. Vogel. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314: 122-137.

Rees, W., and M. Wackernagel. 2008. Urban Ecological Footprints: Why Cities Cannot be Sustainable—and Why They are a Key to Sustainability. *Urban Ecology*: 537-555.

Rodríguez, L., D. Egaña, P. Gálvez, D. Navarro-Rosenblatt, M. Araya, M. Carroza, M. Begoña, and C. Baginsky. 2020. Evitemos la inseguridad alimentaria en tiempos de COVID-19 en Chile. *Revista chilena de nutrición* 47(3): 347-349.

Ruel, M., J. Garrett, S. Yosef, and M. Olivier. 2017. Urbanization, Food Security and Nutrition. *Nutrition and Health in a Developing World*: 705 – 735.

Sagredo, R. 2014. *Historia mínima de Chile*. Turner Publicaciones. Madrid, España.

Silva, C., and F. Vergara – Perucich. 2021. Determinants of urban sprawl in Latin America: evidence from Santiago de Chile. *SN Social Science* 202.

Smit, W. 2016. Urban governance and urban food systems in Africa: Examining the linkages. *Cities* 58: 80-86.

Soto, N. 2021. Caracterización y cuantificación de suelos bajo sellamiento debido a expansión urbana en 9 ciudades de Chile. 47 p. Memoria de título Pregrado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.

Stehberg, R., and G. Sotomayor. 2012. Mapocho Incaico. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural* (61): 85-149.

SUBDERE. 2021. Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. Disponible en <http://www.subdere.gov.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-metropolitano-de-santiago> (Consultado en diciembre de 2021).

Tan, M., X. Li, H. Xie, and C. Lu. 2005. Urban land expansion and arable land loss in China—a case study of Beijing–Tianjin–Hebei región. *Land Use Policy* 22(3): 187 – 196.

Trivelli, P. 2009. Sobre la evolución de la política urbana y la política de suelo en el Gran Santiago en el período 1979-2008. p. 207-227. *In: Carrión, F., M. Cohen, P. Pérez, A. Rodríguez and M. Dammert (eds.) Santiago, una ciudad neoliberal.* OLACCHI. Quito, Ecuador.

Ubilla-Bravo, G., and E. Chía. 2021. Construcción del periurbano mediante instrumentos de regulación urbana: caso de ciudades intermedias en la Región Metropolitana de Santiago-Chile. *Cuadernos Geográficos* 60(2): 275-296.

UNHabitat. 2020. World Cities Report 2020. Disponible en https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf (Consultado en noviembre de 2021).

United States Department of Agriculture. 2017. Soil survey manual No. 18. US Department of Agriculture. Disponible en https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054262 (Consultado en noviembre de 2021).

USDA. 2012. National Nutrient Database for Standard Reference.

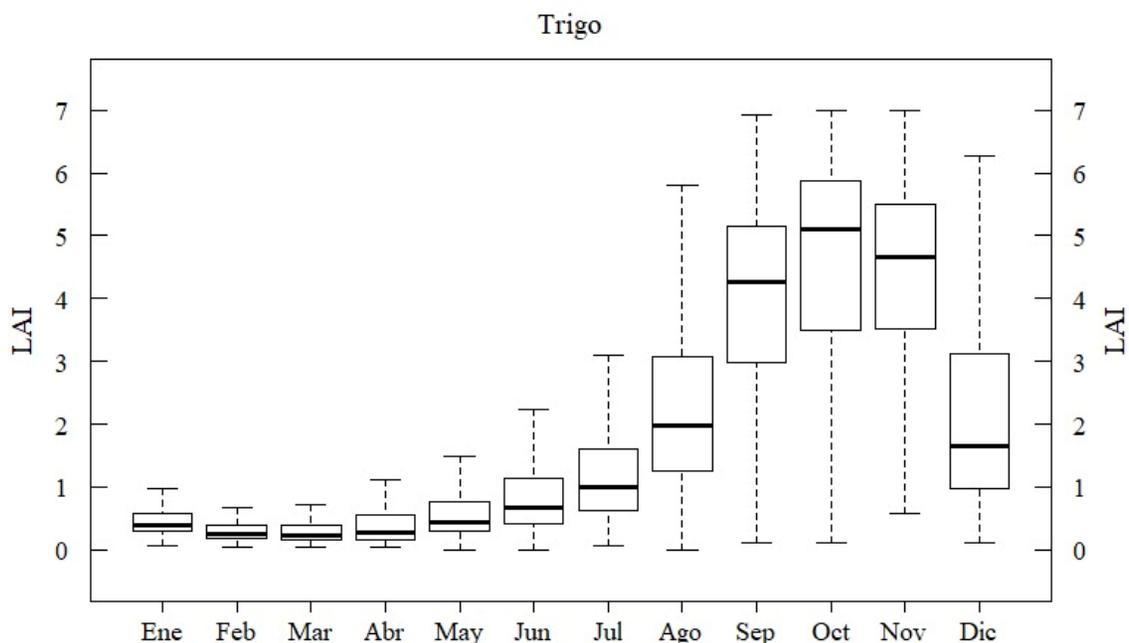
Vicuña, M. 2017. Planificación Metropolitana de Santiago: cambios de estilo frente a las recientes transformaciones urbanas. *Revista Iberoamericana de Urbanismo* (13): 47-64.

Vogel, H., S. Bartke, K. Daedlow, K. Helming, I. Kögel-Knabner, B. Lang, E. Rabot, D. Russell, B. Stöbel, U. Weller, M. Wiesmeier, and U. Wollschläger. 2018. A systemic approach for modeling soil functions. *SOIL* 4: 83–92.

- von Igel, B; Naranjo, J.A.; Wall, R. 2004. Respuesta sísmica de la Región Metropolitana de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-04-25, mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Wackernagel, M., N. Schulz, D. Deumling, A. Callejas, M. Jenkins, V. Kapos, C. Monfreda, J. Loh, N. Myers, R. Norgaard, and J. Randers. 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy. PNAS 99 (14): 9266-9271.
- Wang, Y. 2019. The Challenges and Strategies of Food Security under Rapid Urbanization in China. Sustainability 11(2): 542.
- Wu, B., and Q. Li. 2012. Crop planting and type proportion method for crop acreage estimation of complex agricultural landscapes. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 16: 101-112.
- Yang, G., W. Yu, X. Yao, H. Zheng, Q. Cao, Y. Zhu, W. Cao, and T. Cheng. 2021. AGTOC: A novel approach to winter wheat mapping by automatic generation of training samples and one-class classification on Google Earth Engine. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 102.
- Zambon, I., A. Benedetti, C. Ferrara y L. Salvati. 2018. Soil Matters? A Multivariate Analysis of Socioeconomic Constraints to Urban Expansion in Mediterranean Europe. Ecological Economics 146: 173–183.
- Zañartu, S. 1975. Santiago Calles Viejas. Editora Nacional Gabriela Mistral. Santiago, Chile.

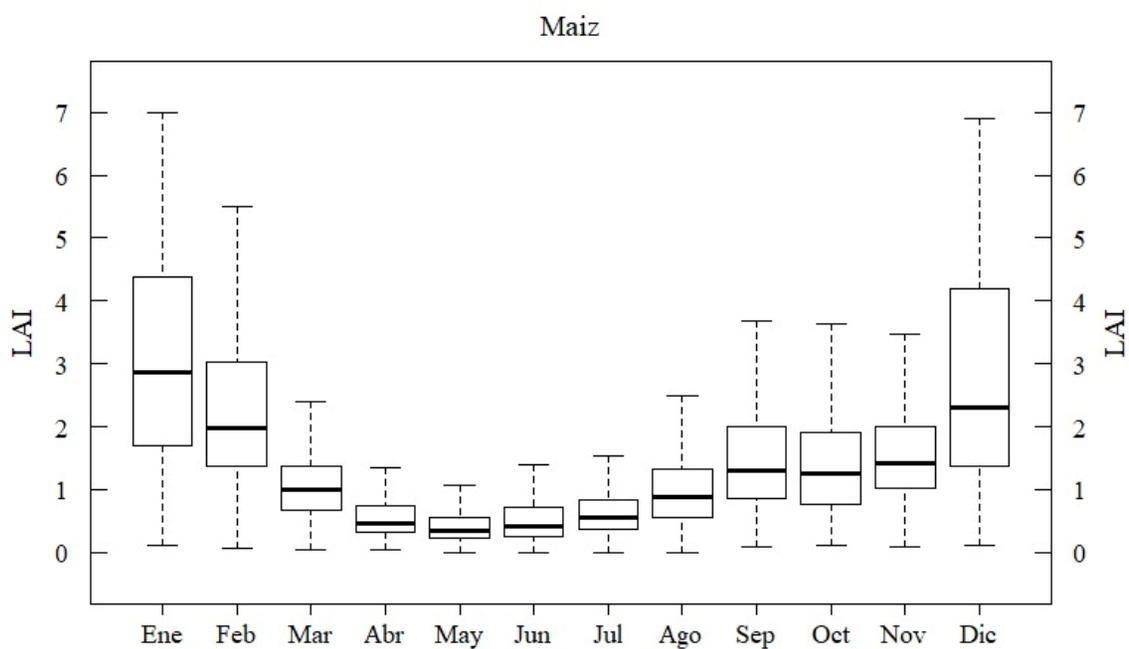
ANEXOS

Anexo 1. Curva fenológica del trigo



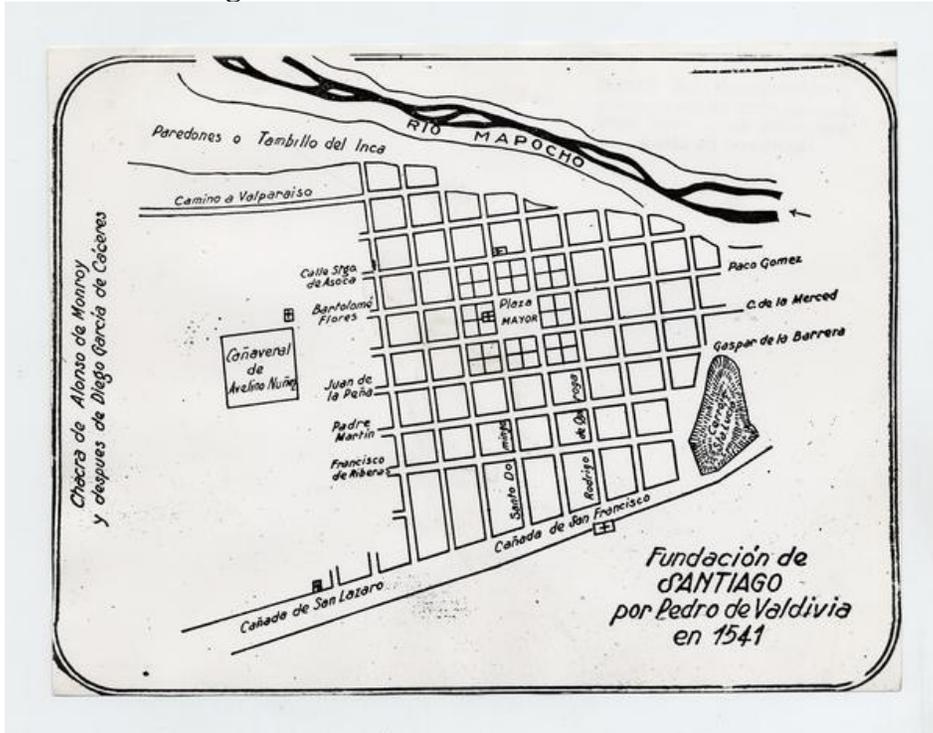
Fuente: Elaborado por el Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas (Universidad de Chile).

Anexo 2. Curva fenológica del maíz



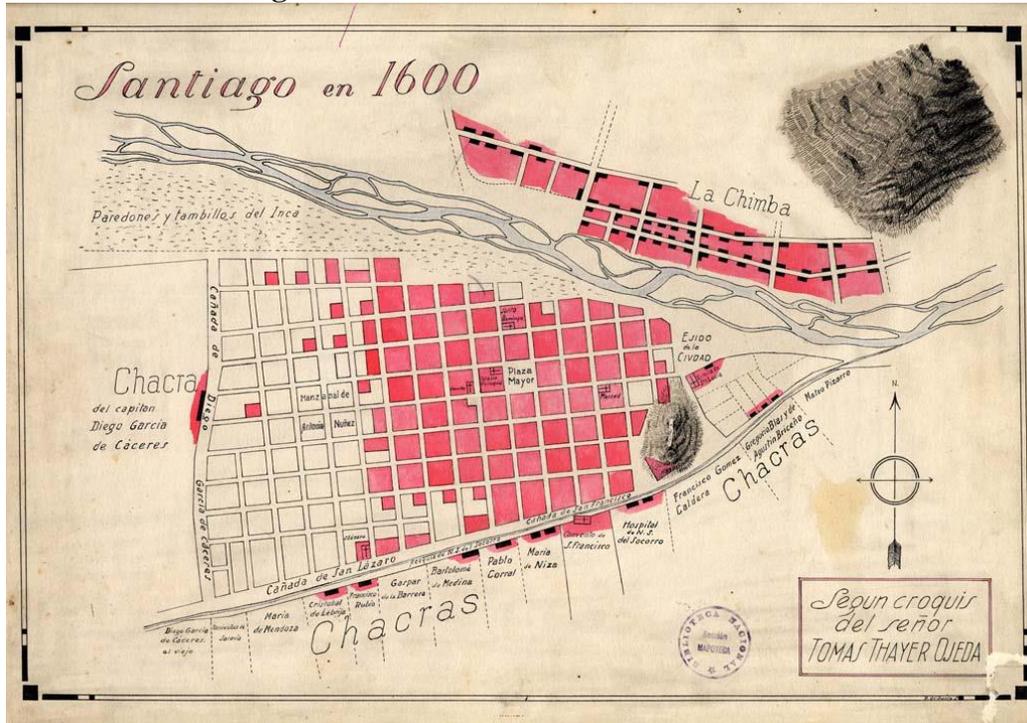
Fuente: Elaborado por el Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas (Universidad de Chile).

Anexo 3. Plano de Santiago en 1541



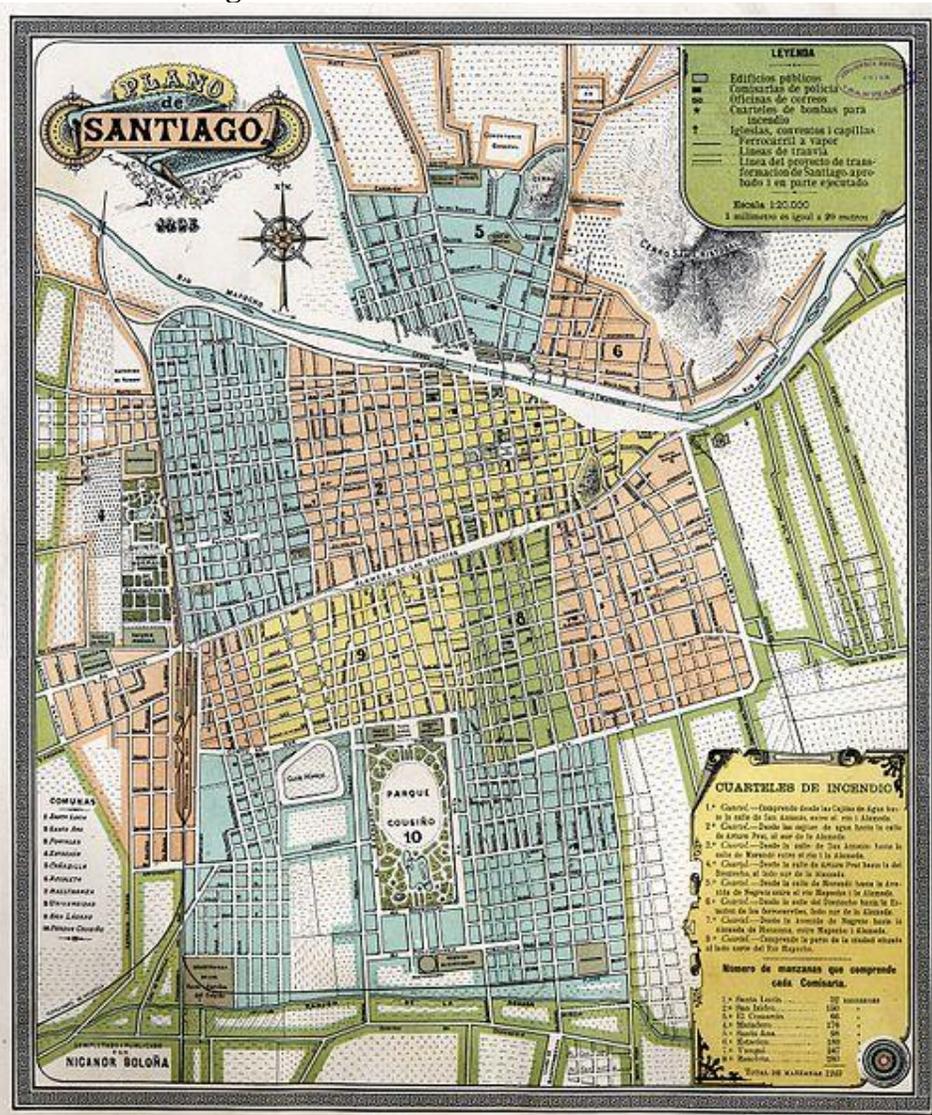
Fuente: Plano esquemático en el tiempo de la Fundación de Santiago por Pedro de Valdivia en 1541. Sala Medina. Disponible en Biblioteca Nacional Digital de Chile <http://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnd/635/w3-article-314957.html> (Consultado en febrero de 2022).

Anexo 4. Plano de Santiago en 1600



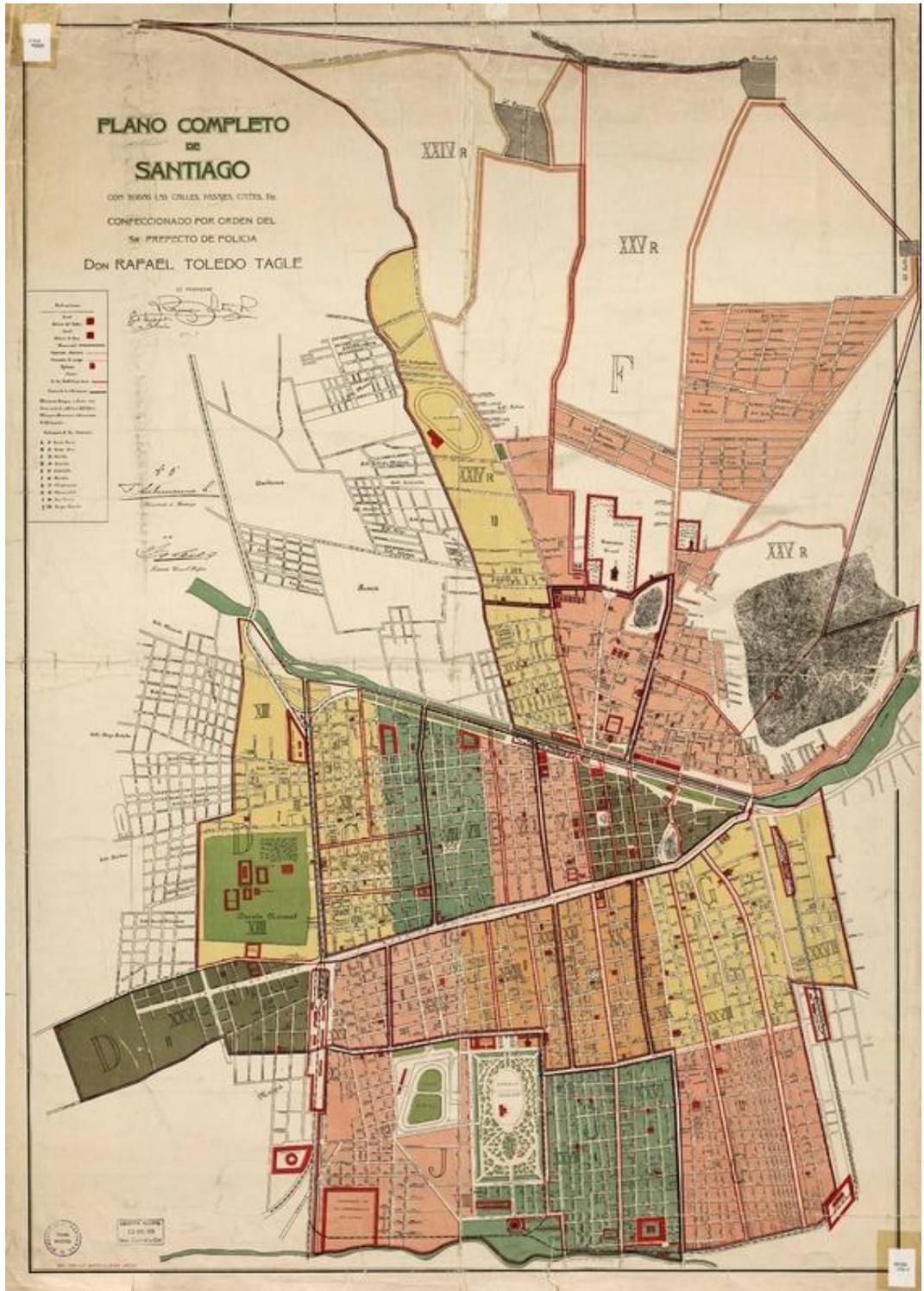
Fuente: Santiago en 1600 según croquis del señor Tomás Thayer Ojeda. Mapoteca. Disponible en Biblioteca Nacional Digital de Chile <http://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnd/635/w3-article-330158.html> (Consultado en febrero de 2022).

Anexo 5. Plano de Santiago en 1895



Fuente: Plano de Santiago, 1895. Disponible en Memoria Chilena, Biblioteca Nacional de Chile <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-68088.html> (Consultado en febrero de 2022).

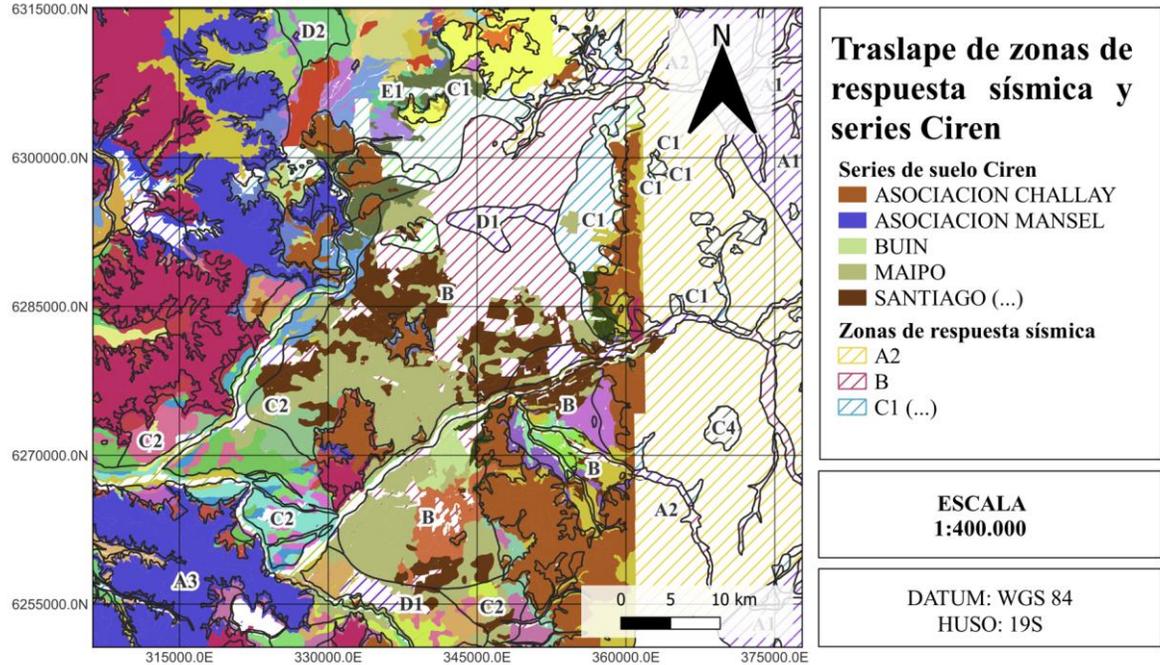
Anexo 6. Plano de Santiago en 1930



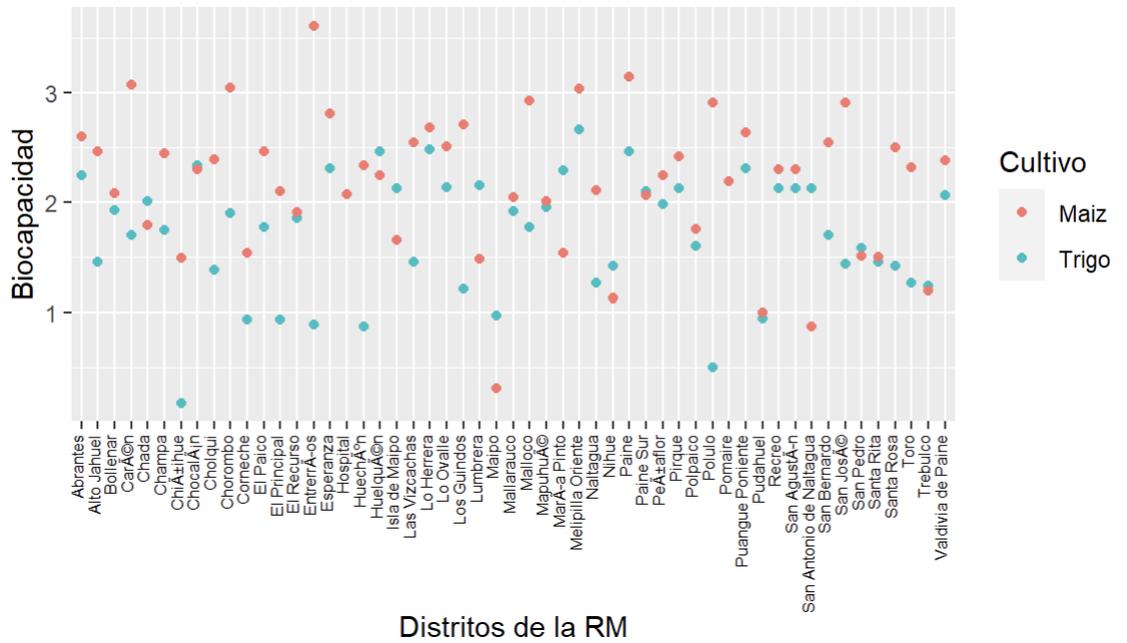
Fuente: Plano completo de Santiago con todas las calles, pasajes, citées, etc. confeccionado por orden del Sr. Prefecto de Policía Don Rafael Toledo Tagle. Mapoteca. Disponible en Biblioteca Nacional Digital de Chile <http://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnd/635/w3-article-320627.html> (Consultado en febrero de 2022).

APÉNDICES

Apéndice 1. Cartografía de respuesta sísmica y series de Ciren



Apéndice 2. Biocapacidad de los distritos de la RM en base a los cultivos de trigo y maíz
Biocapacidad de los distritos para trigo y maíz



Apéndice 3. Cuadro de biocapacidad de las series de suelo de la RM

	Serie	Trigo		Maíz		Biocapacidad Promedio	Biocapacidad Potencial
		Biocapacidad	Datos	Biocapacidad	Datos		
1	AGUA DEL GATO	1,66	8	2,44	11	2,05	2,44
2	ALCANTAR	1,90	2	2,66	3	2,28	2,66
3	ASOCIACION CHALLAY	1,67	97	2,06	12	1,86	2,06
4	ASOCIACION CUZCO	0,94	18	1,54	4	1,24	1,54
5	ASOCIACION LA LAJUELA	1,42	25	2,10	4	1,76	2,10
6	ASOCIACION LA MANGA	1,20	14	1,54	2	1,37	1,54
7	ASOCIACION LA PARVA	1,60	39	-	-	1,60	1,60
8	ASOCIACION MANSEL	1,69	35	1,62	7	1,65	1,69
9	BARRANCAS	1,89	3	1,00	1	1,45	1,89
10	BATUCO	-	-	1,96	12	1,96	1,96
11	BUIN	1,85	4	1,91	3	1,91	1,91
12	CERRILLOS	0,94	1	-	-	0,94	0,94
13	CHADA	2,07	19	-	-	2,07	2,07
14	CHAPE	-	-	1,67	4	1,67	1,67
15	CHICAUMA	1,60	2	-	-	1,60	1,60
16	CHICUREO	-	-	2,59	6	2,59	2,59
17	CHINCOLANTE	-	-	1,57	6	1,57	1,57
18	CHINIHUE	1,06	7	2,87	8	1,96	2,87
19	CHOLQUI	1,61	7	2,27	8	1,94	2,27
20	CHOROMBO	2,13	3	2,51	3	2,32	2,51
21	CLARILLO	1,08	16	2,28	16	1,68	2,28
22	CODIGUA	1,99	24	2,25	35	2,12	2,25
23	COTUBA	-	-	2,41	2	2,41	2,41
24	CUESTA BARRIGA	2,20	9	2,03	6	2,11	2,20
25	CUESTA VIEJA	-	-	2,45	4	2,45	2,45
26	ESTANCILLA	1,12	46	2,72	24	1,92	2,72
27	ESTERO SECO	1,40	8	2,39	8	1,90	2,39
28	HACIENDA ALHUE	1,32	6	2,33	7	1,83	2,33
29	HOSPITAL	2,08	8	2,36	8	2,22	2,36
30	HUECHUN	1,60	10	1,76	7	1,68	1,76
31	HUECHURABA	-	-	2,21	2	2,21	2,21
32	HUINGAN	1,45	12	1,50	9	1,48	1,50
33	ISLA DE HUECHUN	1,49	18	2,11	20	1,80	2,11
34	LA HIGUERA	1,78	14	1,98	12	1,88	1,98
35	LA VILANA	-	-	2,41	3	2,41	2,41
36	LAMPA	1,60	5	0,43	18	1,02	1,60
37	LAS MERCEDES	-	-	2,33	7	2,33	2,33
38	LAS PERDICES	1,83	54	2,08	39	1,95	2,08
39	LINDEROS	1,83	4	2,34	5	2,09	2,34
40	LINGOLINGO	1,53	13	1,27	4	1,40	1,53
41	LIRAY	-	-	2,41	5	2,41	2,41

42	LO PRADO	1,46	2	2,33	22	1,91	2,33
43	LO VASQUEZ	1,48	321	2,28	93	1,76	2,28
44	LONQUEN	1,24	2	1,79	8	2,03	2,27
45	LOS CARDENALES	2,27	18	1,77	12	1,74	1,77
46	LOS MORROS	1,71	14	1,52	9	1,62	1,71
47	MAIPO	1,86	65	1,94	52	1,90	1,94
48	MAPOCHO	1,02	18	2,02	7	1,52	2,02
49	MISCELANEOS	1,39	34	2,32	26	1,86	2,32
50	PAHUILMO	1,82	6	2,37	9	2,10	2,37
51	PAINÉ	2,06	5	2,37	8	2,22	2,37
52	PATAGUILLA	2,19	3	1,61	8	1,90	2,19
53	PERALILLO	0,94	7	1,00	4	0,97	1,00
54	PEUMO CHICO	1,38	26	2,09	11	1,74	2,09
55	PEUMO LO CHACON	1,39	33	1,64	29	1,52	1,64
56	PIEDMONT ESTRATIFICADO	1,50	10	2,30	4	1,90	2,30
57	PINTUE	2,09	37	2,51	28	2,30	2,51
58	POLPAICO	1,60	26	1,76	11	1,68	1,76
59	POMAIÉ	1,83	35	2,41	22	2,12	2,41
60	POPETA	1,21	4	2,46	6	1,83	2,46
61	PUANGUE	2,12	5	2,05	19	2,08	2,12
62	PUDAHUEL	1,75	56	2,57	47	2,16	2,57
63	PUNTILLA	-	-	2,40	10	-	-
64	QUILAMUTA	1,30	43	2,57	27	1,93	2,57
65	QUILAPILUN	1,60	6	1,63	4	1,61	1,63
66	QUILICURA	0,94	2	-	-	0,94	0,94
67	RINCONADA DE LO VIAL	-	-	2,05	8	2,05	2,05
68	RUNGUE	1,60	29	1,76	2	1,68	1,76
69	SAN DIEGO	2,11	11	2,47	11	2,29	2,47
70	SANTA ROSA	-	-	0,15	1	0,15	0,15
71	SANTA SARA	0,94	23	2,14	16	1,54	2,14
72	SANTIAGO	1,32	52	2,45	31	1,88	2,45
73	TAQUERAL	0,94	6	1,35	6	1,15	1,35
74	TERRAZA ALUVIAL VALLES COSTERO	1,41	14	1,53	2	1,47	1,53
75	TERRAZAS ALUVIALES ESTRATIFICA	1,75	17	2,40	21	2,07	2,40
76	TERRAZAS REMANENTES	2,31	6	-	-	2,31	2,31
77	TRONADOR	1,50	4	2,30	3	1,90	2,30
78	TUPARTIS	1,51	11	2,64	9	2,08	2,64
79	URRACA	-	-	2,00	7	2,00	2,00
80	VALDIVIA DE PAINÉ	2,18	20	2,49	22	2,34	2,49
81	VILUMA	1,89	18	2,31	6	2,10	2,31
82	VINA VIEJA	1,35	24	2,57	11	1,96	2,57

Apéndice 4. Biocapacidad de las series de suelo de la RM en base a trigo y maíz

Biocapacidad de series de suelo para trigo y maíz

