

**MODELACIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN
LOS SUELOS DEL ÁREA URBANA DEL GRAN SANTIAGO
Y SU RELACIÓN CON EL NIVEL SOCIOECONÓMICO**

MEMORIA ENTREGADA A LA UNIVERSIDAD MAYOR EN CUMPLIMIENTO DE
LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

ALEJANDRA SOFIA ASTETE PINTO

PROFESOR GUIA:

IGNACIO FERNÁNDEZ CHICHARRO

MIEMBROS COMISIÓN EVALUADORA

JAVIER ANTONIO REYES VIZCARRA

CLAUDIA MONTOYA TANGARIFE

SANTIAGO DE CHILE

JUNIO 2022

RESUMEN

Los registros históricos evidencian la ocurrencia de inundaciones en la ciudad de Santiago desde su fundación. Estas inundaciones siguen siendo frecuentes en la actualidad, generando problemas en el funcionamiento de la ciudad y afectando negativamente la calidad de vida de sus habitantes. Es así, como actualmente existe una importante parte de la población que vive en sectores proclives a inundarse por lluvias invernales, afectando principalmente a aquellos estratos socioeconómicos más vulnerables de la población.

Este estudio, titulado “Modelación de la capacidad de infiltración en los suelos del área urbana del Gran Santiago y su relación con el nivel socioeconómico” tiene como objetivo caracterizar y modelar la distribución espacial de la capacidad de infiltración de los suelos en el área urbana de Santiago, identificar áreas con mayor potencial de inundación, y evaluar si estos resultados se asocian con el nivel socioeconómico de las zonas potencialmente afectadas.

Para ello se utilizaron modelos de elevación digital, evaluación de capacidad de infiltración en terreno, registros bibliográficos, cartografía de tipos de suelos, clasificación por firma espectral de imágenes satelitales y datos sociodemográficos del Censo 2012.

Como resultado de la investigación se identificaron tipologías de suelos con distinta capacidad de infiltración, y en base a ello se generaron mapas que señalan aquellas áreas con mayor o menor probabilidad de sufrir inundaciones por lluvias invernales. Esta información fue cruzada con el nivel socioeconómico para evaluar potenciales inequidades en la distribución socioeconómica de la población y el peligro de inundación. Los resultados indican que no existe una relación entre la probabilidad de inundación y nivel socioeconómico a escala de la ciudad, pero sí es posible observar dicha relación a nivel municipal.

Estos resultados sugieren que, en Santiago, el riesgo de inundación no se explica en mayor medida por la capacidad de infiltración de los suelos y las variaciones de pendiente dentro de la cuenca, sino en mayor medida por una limitada planificación territorial que tiende a promover la escorrentía superficial, conduciendo y acumulando las aguas lluvias en los sectores bajos de la ciudad.

Se espera que la información generada por este estudio sea de utilidad para contribuir a mejorar la planificación territorial y disminuir el riesgo de inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

A los encargados de las plazas y parques visitados, por su amabilidad, empatía y buen recibimiento al momento de realizar los experimentos, y por darnos agua para seguir haciendo los análisis durante el día.

A mis compañeros y docentes pertenecientes a la escuela de geología, por su tiempo, apoyo y conocimientos compartidos durante mis años de formación, en especial al Profe Javier por su apoyo durante el desarrollo de la tesis.

A mis familiares y amigos cercanos por su comprensión ante el abandono y negativa frecuente a actividades socio recreativas dado el interés y preocupación personal por terminar mi periodo universitario. En especial a mi incondicional Christina Brevis sus papis y hermana, por su apoyo y confianza para abrirme sus puertas y brindarme un espacio para compartir preocupaciones, trabajos, anécdotas, y prestarme el sillón las veces que pernoctaba allí, ayudándome a disminuir el recorrido necesario para llegar a la universidad y más.

A Victoria Paredes, jefa de investigación y doctorados de la vicerrectoría de Investigación, por su apoyo durante y después de la escuela de verano, ya que me permitió mejorar mis conocimientos profesionales y abrirme camino en la investigación, y por haber sido el nexo que me llevo conocer a mi profe guía en un seminario, gracias a una invitación enviada por ella vía correo.

A mi amiga y partner Natalia Marchant, por acompañarme y apoyarme en todo el proceso de toma de datos en terrenos, incluido el levantarnos “antes de que cante el gallo”, por compartir esos dolores de piernas dado las sentadillas echas de forma obligatoria para anotar el dato del infiltrómetro, por soportar el calor de estar horas bajo el sol y el peso de los instrumentos de medición mientras recorríamos la ciudad en transporte público, perdiendo la dignidad al avanzar las horas, gracias al aumento exponencial del sudor, suciedad y chasconeo.

Al profe Ignacio, por la oportunidad de conocer el mundo de la investigación de forma práctica y directa desde el inicio, por el apoyo para realizar la tesis en un tema de mi interés, permitiéndome utilizar la geología y todos los conocimientos adquiridos en mi carrera como una herramienta para conectar las ciencias con el que hacer social, por su guía y vocación, por las incontables enseñanzas en herramientas de análisis geoespacial y estadística, por su buena disposición para resolver mis incontables e inagotables dudas, aclarar confusiones y revisar avances de manera constante, por enseñarme que se puede ser un profesional excepcional sin perder la humildad.

A mi mamá por todo. Por nunca faltarle palabras de aliento. Por siempre darme ánimos y fuerzas a pesar de todas las adversidades que muchas veces fueron incomprendidas. Por no dejarme olvidar que somos más que un número. Por nunca abandonar su vocación como profesora al corregir y revisar muchos de los incontables textos redactados en mis años como estudiante, no solo como universitaria. Por siempre estar allí, y darme un lugar seguro al cual volver cada vez que salgo a investigar y entender el mundo. Por ser junto a mi Yaya, los pilares que admiro, quienes me sustentan y guían a ser una profesional humana.

SOLO USO ACADÉMICO

INDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS.....	1
3.	HIPOTESIS.....	2
4.	MARCO TEÓRICO	2
4.1.	Ciclo Hidrológico	2
4.2.	Definición del concepto de infiltración	3
4.3.	Factores geológicos que afectan el proceso de infiltración	4
4.3.1.	Litología	4
4.3.2.	Estructuras.....	4
4.3.3.	Topografía.....	5
4.4.	Desigualdad Ambiental	5
5.	ÁREA DE ESTUDIO	7
5.1.	Ubicación	7
5.2.	Clima	10
5.3.	Variables Geológicas	10
I.	Litología.....	10
II.	Geología Estructural	13
III.	Topografía.....	15
5.4.	Historial de inundaciones en el Gran Santiago	16
6.	PROCEDIMIENTOS METODOLOGICOS	18
6.1.	Modelo cobertura de suelos	19
6.2.	Modelo de precipitación	20
6.3.	Toma de datos en Terreno.....	28
6.4.	Relación entre modelo precipitación y modelo de coberturas de suelo ...	30
I.	Construido.....	30
II.	Suelo desnudo y pasto	31
III.	Vegetación decidua y vegetación siempre verde.....	32
6.5.	Nivel socioeconómico (NSE).....	33
7.	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	34
7.1.	Modelo de Precipitación.....	34

7.2.	Índice Relativo de Riesgo de Inundación (IRRI).....	34
I.	Índice De Amenaza.....	35
II.	Índice De Vulnerabilidad.....	36
7.3.	Relación IRRI con el Nivel Socioeconómico.....	38
8.	DISCUSIÓN.....	40
8.1.	Influencia de las variables geológicas en el proceso de infiltración.....	40
8.2.	Comparación de la capacidad de infiltración en coberturas tipo pasto y suelo desnudo.....	40
8.3.	Relación del nivel socioeconómico con el índice relativo de riesgo de inundación.....	41
8.4.	Desigualdad Ambiental relacionada con la topografía.....	42
9.	CONCLUSIÓN.....	43
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	43

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.	Esquema del ciclo hidrológico.....	2
Imagen 2.	Mapa de daños durante el Evento Hidrometeorológico del 29 de junio y 4 de julio del 2020 en la Región Metropolitana.....	6
Imagen 3.	Perfiles topográficos de Santiago.....	7
Imagen 4.	Área urbana del Gran Santiago.....	8
Imagen 5.	Ubicación de la cuenca de Santiago.....	9
Imagen 6.	Mapa con la geología superficial de la Cuenca de Santiago.....	13
Imagen 7.	Mapa geológico simplificado del área de Santiago.....	15
Imagen 8.	Mapa de pendientes del Gran Santiago.....	16
Imagen 10.	Clasificación de coberturas de suelo dentro del área urbana del Gran Santiago.....	20
Imagen 12.	Correlogramas espaciales.....	26
Imagen 17.	Modelo de precipitación remanente.....	33
Imagen 19.	Índice de amenaza.....	36
Imagen 20.	Índice de vulnerabilidad.....	37
Imagen 21.	Índice relativo de riesgo de inundación (IRRI).....	38
Imagen 22.	Correlación IRRI vs NSE en el Gran Santiago.....	39

Imagen 23. Correlación IRRI vs NSE en San Bernardo y Puente Alto..... 39

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que afectan a la infiltración 4

Tabla 2. Relación espacial en base a los valores del índice de Moran's obtenidos del programa Geoda. 22

Tabla 3. Relación espacial en base a los valores de correlación entre la altura y los datos de precipitación promedio mensual del 2010 al 2020..... 23

Tabla 4. Herramientas de análisis probabilístico de QGis a utilizar para cada mes en base a las relaciones con el espacio y altura 24

Tabla 5. Modelo de planilla utilizada para medir la infiltración in situ 30

Tabla 6. Promedio de infiltración calculado a partir de los datos obtenidos en terreno..... 32

SOLO USO ACADÉMICO

1. INTRODUCCIÓN

El balance hídrico del suelo tiene como base el principio de conservación de masa, que señala que la cantidad de agua que entra debe ser la misma que se almacena más la que sale del sistema; siendo las precipitaciones la principal entrada de agua, mientras que las salidas ocurren a través de la descarga en acuíferos y la evapotranspiración (Fetter, 2001; Alvarado & Barahona, 2017).

También debe considerarse que la infiltración del agua en el suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico pues, dependiendo de las condiciones geológicas, el agua puede permanecer en el suelo en forma de humedad; escurrir subsuperficial o superficialmente, aflorar en una naciente, recargar el acuífero, entre otros. Además, la velocidad de infiltración determina generalmente la cantidad de agua de escurrimiento, pudiendo detectarse así el peligro de inundaciones en periodos de lluvias intensas.

Cabe señalar que la ciudad de Santiago posee registros históricos que dejan en evidencias los problemas y daños que las inundaciones han causado en esta urbe desde sus inicios hasta la actualidad, además los factores socioeconómicos reflejan el acceso diferenciado a recursos y oportunidades entre la población de altos y bajos ingresos, lo que genera notorias diferencias al momento de afrontar, como particular, el riesgo ante el peligro de inundaciones en la capital.

Dado lo anterior, el presente estudio busca generar un modelo geoespacial de capacidad de infiltración de suelos en Santiago, identificando la variabilidad espacial de la vulnerabilidad ante eventos de inundación, considerando factores geológicos como la litología, estructuras y pendientes y como estos se relacionan con la capacidad de infiltración de las coberturas de suelos en la ciudad. Además, se evalúa si estos resultados se relacionan con el nivel socioeconómico de los residentes.

2. OBJETIVOS

Generales

1. Modelar la distribución espacial de la capacidad de infiltración de los suelos en el área urbana de Santiago, evaluando la relación entre los patrones de vulnerabilidad a inundación y el nivel socioeconómico de las distintas áreas de Santiago.

Específicos

1. Identificar coberturas de suelos en el área urbana de Santiago.
2. Determinar la capacidad de infiltración de las coberturas de suelo identificadas.
3. Generar un modelo de la distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia de inundaciones por lluvias invernales.

4. Relacionar la distribución de la probabilidad de inundación con la distribución del nivel socioeconómico.
5. Evaluar potenciales inequidades en la distribución de la probabilidad de inundaciones en la ciudad.

3. HIPOTESIS

I. Es posible generar un modelo del potencial de infiltración de los suelos de Santiago en base a la integración de información geoespacial y datos recolectados en terreno.

II. La capacidad de infiltración de agua de los suelos de Santiago es espacialmente heterogénea, siendo las zonas con mayor probabilidad de inundación aquellas que poseen menor nivel socioeconómico.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Ciclo Hidrológico

El agua es un elemento natural esencial para la existencia de la vida, y esta se encuentra en la naturaleza de diferentes formas, generalmente en continuo movimiento; de acuerdo con un ciclo que incluye las nubes o vapor de agua, la precipitación en forma de lluvia granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración, la escorrentía, las corrientes subterráneas, los acuíferos, los ríos y quebradas, los mares y los lagos (Suárez, 2001). El agua continuamente está cambiando de forma de acuerdo con un ciclo natural denominado ciclo hidrológico (Imagen 1).

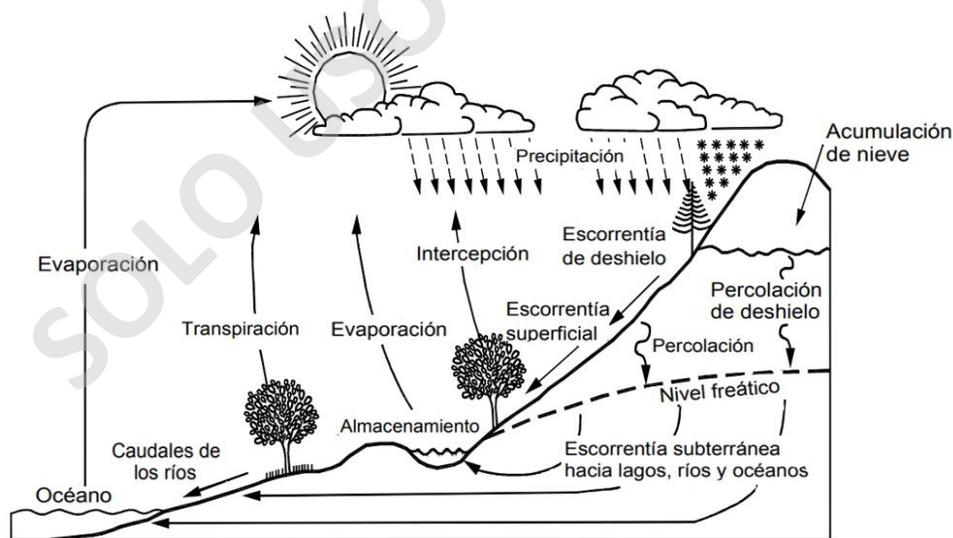


Imagen 1. Esquema del ciclo hidrológico. Modificado de Suárez (2001).

La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea (Suárez, 2001).

La escorrentía es la proporción de precipitación que fluye superficialmente sobre el suelo. Cuanto más pronunciadas, impermeables y desprovistas de vegetación son las laderas y más copiosas las precipitaciones, tanto mayor es la parte de estas que se convierte en escorrentía. Una lluvia fuerte puede producir abundante escorrentía, pero una llovizna ligera puede absorberse en forma casi total en el suelo antes de que produzca mucha escorrentía, porque el suelo a menos que esté muy seco se satura en forma relativamente rápida y no puede absorber más agua. La escorrentía generalmente se concentra en corrientes de agua, las cuales pueden formar surcos o cárcavas de erosión. Para cuantificar la cantidad de escorrentía que llega a un punto determinado, se debe calcular la cantidad de agua disponible después de una lluvia, teniendo en cuenta las características de la superficie del terreno, cobertura vegetal e infiltración (Suárez, 2001).

4.2. Definición del concepto de infiltración

Existen varias definiciones relacionadas con el concepto de infiltración. Para el presente estudio, el proceso de infiltración se define como la entrada del agua de la superficie del suelo hacia el interior de este, influenciado por la fuerza de gravedad y capilar, las que impulsan el desplazamiento del agua, pudiendo penetrar los intersticios más grandes de la zona no saturada (Peñaloza, 2009; Freeze y Cherry, 1979).

A partir de Horton (1933), es posible definir la capacidad de infiltración como la velocidad máxima en la que el agua de lluvia puede ser absorbida en superficie. Esta propiedad del suelo disminuye conforme aumenta la profundidad. Si se aplica agua a determinada superficie de suelo, a una velocidad que incrementa en forma uniforme, tarde o temprano se llega a un punto en que la velocidad de aporte comienza a exceder la capacidad del suelo para absorber agua y el exceso se acumula sobre la superficie, o escurre si las condiciones de pendiente lo permiten. Mientras la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la capacidad de infiltración, el agua se infiltra tan rápidamente como es aportada. Sin embargo, una vez que la velocidad de aporte excede la capacidad de infiltración del suelo, es ésta última la que determina la velocidad real de infiltración (Gurovich, 1985).

Existen diversos factores que pueden afectar el proceso de infiltración como: el tipo de suelo, vegetación, porosidad, evapotranspiración, variaciones estacionales, etc. En consecuencia, el tiempo de infiltración puede durar hasta varios años (Clark y Fritz, 1954). La Tabla 1 resume los factores que afectan la infiltración en un medio permeable.

		FACTOR	EFFECTO SOBRE LA INFILTRACIÓN
Características del medio permeable	Condiciones de superficie	Compactación	Si es mayor la compactación se reduce la I
		Desnudez	Si es mayor la desnudez se reduce la I
		Suelo con vegetación	La existencia de vegetación favorece la I
		Pendiente	Si la pendiente es mayor se reduce la I
		Área urbana	la existencia de área urbana reduce la I
	Características del terreno	Textura y estructura	La I varía en función de la granulometría del suelo
		Calor específico del terreno	Afecta a la viscosidad del fluido
	Condiciones ambientales	Humedad inicial del suelo	Si la humedad inicial del suelo crece se reduce la I
		Intensidad de la lluvia	Si f es grande, la intensidad de precipitación no influye
			Si f es pequeña solo se podrá infiltrar una parte de la precipitación que vendrá limitada por f

I: infiltración, f: capacidad de infiltración

Tabla 1. Factores que afectan a la infiltración. Modificado de <http://fcihs.espintime.com/tema1/docs/clase1-5-A.pdf>

En el caso de la cuenca del Santiago, la recarga al acuífero ocurre principalmente por la infiltración de los cauces superficiales y por las zonas de depósitos coluviales en los márgenes oriente y poniente, que permiten la infiltración de las precipitaciones (Araneda *et al* 2019). La ciudad de Santiago y sus áreas urbanizadas (cubiertas duras no porosas) actúan como capa impermeable que no permite la percolación de las aguas lluvias y éstas escurren hasta ser evacuadas en los cauces naturales del río Mapocho y Maipo (Araneda *et al* 2019).

4.3. Factores geológicos que afectan el proceso de infiltración

A partir de análisis bibliográficos, se reconocen tres factores geológicos que influyen en el proceso de infiltración: litología, estructuras y topografía.

4.3.1. Litología

El trabajo realizado por Mazaheri y Mahmoodabadi (2012) y Alfaro *et al.* (2020), muestra la importancia de conocer la litología del área a estudiar, ya que evidencian que la infiltración, escorrentía y entrada de agua al sistema aumenta equitativamente dependiendo del porcentaje de arena, y disminuye al tener mayor cantidad de arcilla, limo y materia orgánica.

4.3.2. Estructuras

Las fallas pueden ser zonas donde el agua se infiltre y circule, pero también pueden ser zonas de barrera para las aguas subterráneas, por lo que conocer su

posición, dirección y buzamiento es importante para especificar las direcciones preferenciales de desplazamiento e infiltración en una zona determinada (Alfaro *et al.*, 2020).

4.3.3. Topografía

La topografía es un factor relevante para la infiltración debido a que el agua se acumula dentro del suelo en algunas áreas, como depresiones topográficas o donde el agua de escorrentía superficial se acumula (Kim, 2011). Esto se respalda con la investigación realizada en Arrupe, Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, donde Chavez *et al.* (2016) realizó la instalación de equipos de medición de humedad para verificar la incidencia de la topografía y la concentración de la escorrentía superficial, demostrando que la topografía de la parte superior de los taludes influye en la infiltración del agua de lluvia, dando como ejemplo que las laderas con una superficie parecida a una cúpula o en forma de cresta, impiden la infiltración del agua y son siempre más secas que las zonas adyacentes.

4.4. Desigualdad Ambiental

La desigualdad ambiental se define como la exposición diferenciada de determinados grupos sociales a situaciones de riesgo o vulnerabilidad ambiental, o bien con acceso diferenciado a los bienes o bienestar ambientales como aire puro, agua limpia, áreas verdes (Carmona *et al.*, 2015).

En el estudio realizado por Roldan *et al.* (2020), se identifican y georreferencian daños por lluvias en el Gran Santiago, principalmente anegamientos graves y moderados, cortes de rutas totales u ocasionales, desbordes de canales, activación de quebradas (menos frecuente), desborde de ríos o canales, filtración de construcciones urbanas entre otros. En base a esto, fue posible reconocer que las comunas con mayores puntos de impacto recurrentes están ubicadas en el sector oeste de la ciudad, a excepción de La Florida (Imagen 2). Según Roldan *et al.* (2020), esto se puede relacionar con que dichas zonas coinciden con una disminución en la altura (Imagen 3), por ende, tienden a tener una mayor concentración de aguas lluvias. Pero, además, algunas presentan deficiencias puntuales en el Plan Maestro de Aguas Lluvias, relacionadas con la mantención, limpieza, distribución, estructura y el diseño de la Planificación urbana actual, evidenciando un ejemplo de desigualdad en esta zona (Roldán *et al.*, 2020).

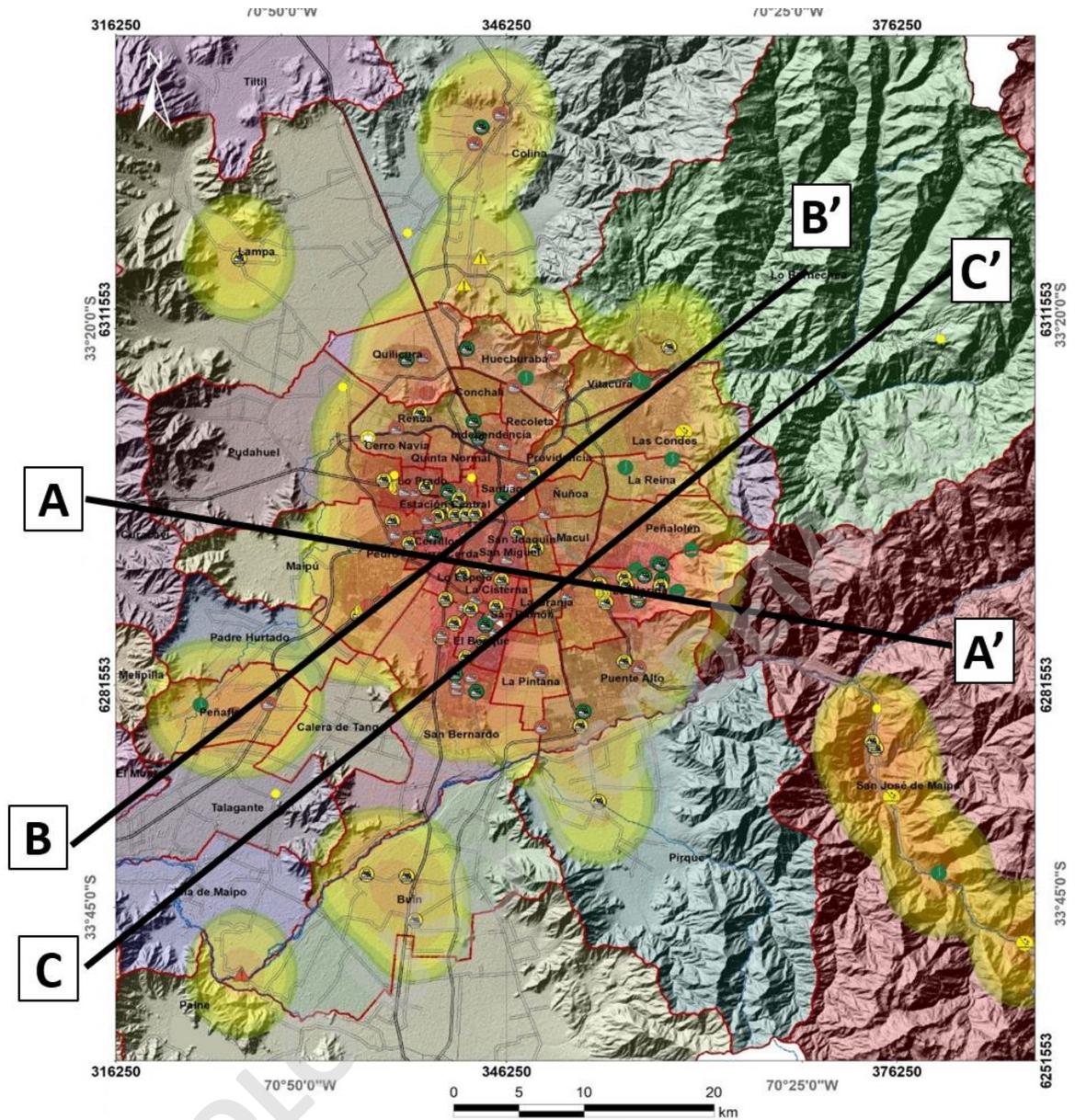


Imagen 2. Mapa de daños durante el Evento Hidrometeorológico del 29 de junio y 4 de julio del 2020 en la Región Metropolitana. En negro se visualiza la traza de los perfiles presentes en la imagen 3. Modificado de Roldán et al. (2020).

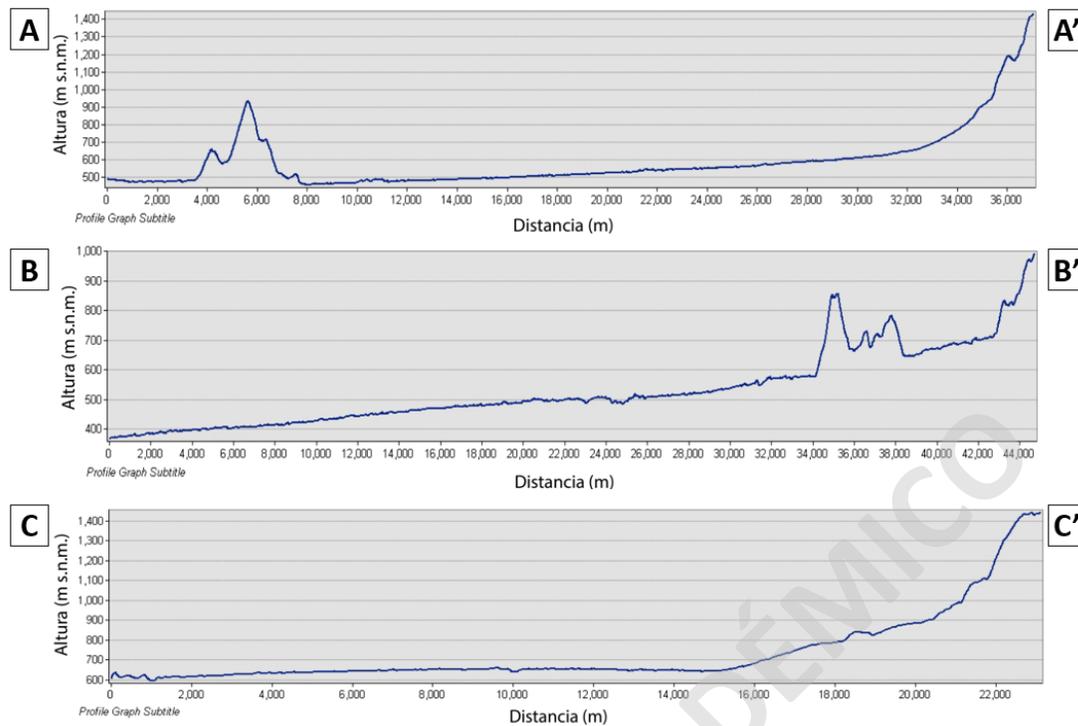


Imagen 3. Perfiles topográficos de Santiago. Muestra la variación del relieve en 3 zonas de Santiago, desde el oeste (lado izquierdo de los perfiles) al este (derecha de los perfiles) de la ciudad. Modificado de Roldan et al., 2020.

5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1. Ubicación

La investigación se lleva a cabo en la región Metropolitana, abarcando específicamente las 34 comunas que conforman el área urbana del Gran Santiago (Imagen 4), dentro del rasgo geomorfológico de dirección norte sur conocido como

Depresión Central, situado entre la Cordillera de los Andes al este, y por la Cordillera de la Costa al oeste (Imagen 5).

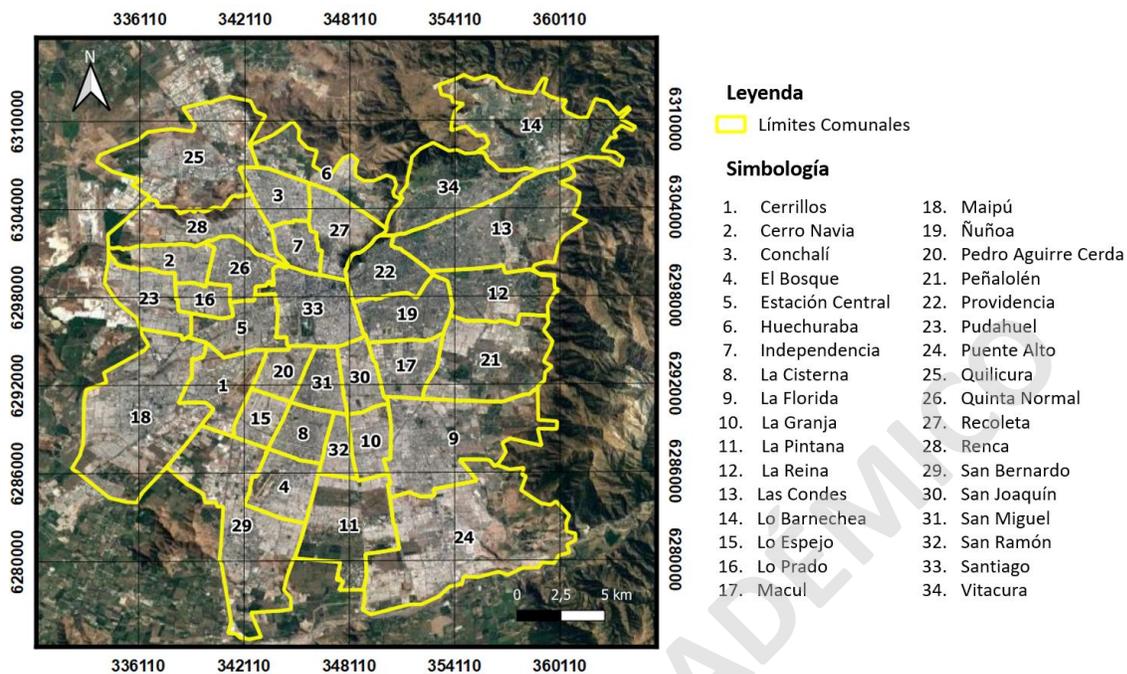


Imagen 4. Área urbana del Gran Santiago dividida en las 34 comunas que la integran. Elaboración propia.

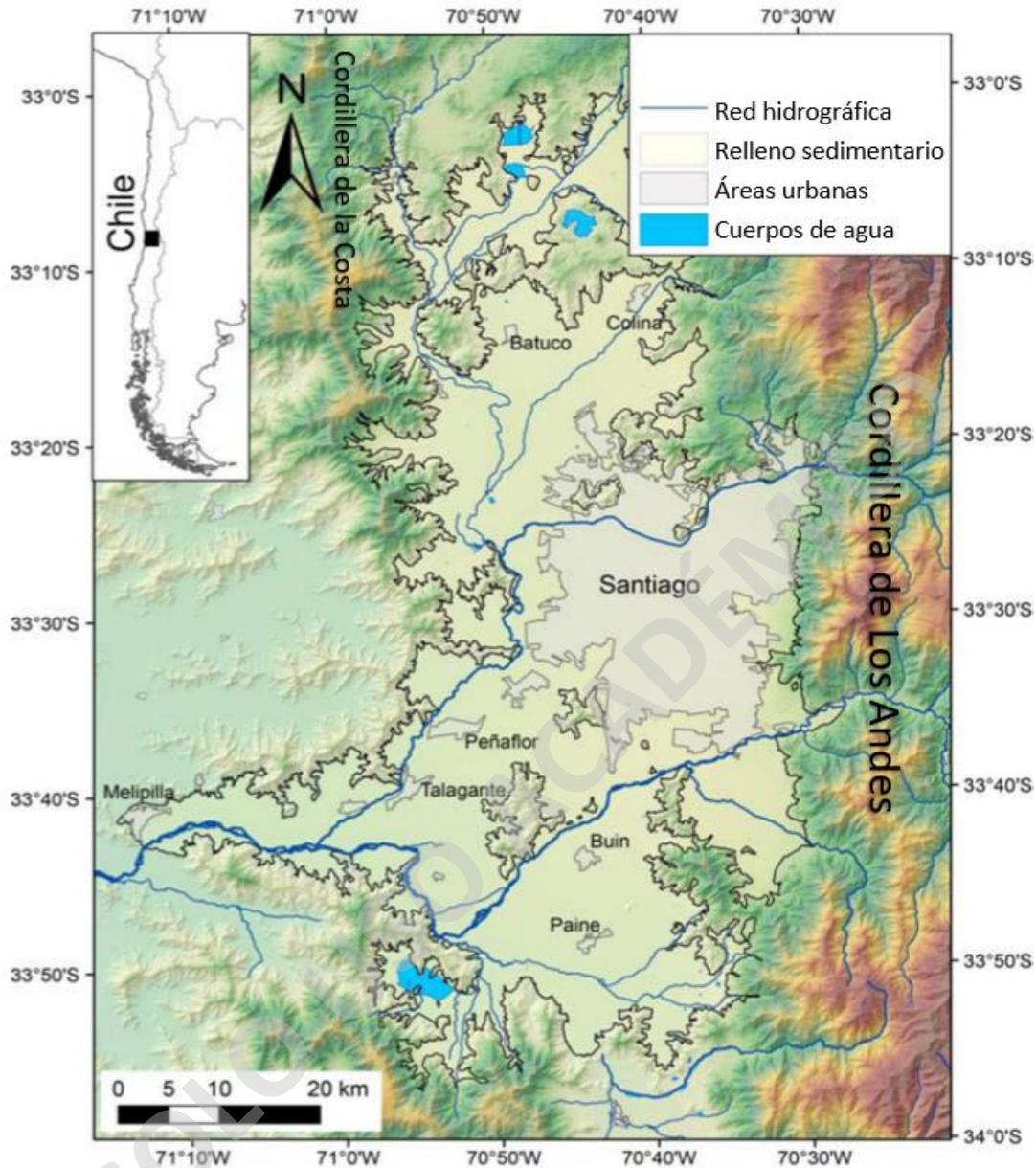


Imagen 5. Ubicación de la cuenca de Santiago. Modificado de Yañez (2015).

La cuenca de Santiago forma parte de la cuenca hidrográfrica del río Maipo, cuyas nacientes provienen de la Cordillera de los Andes, a partir de la divisoria de aguas en el límite con Argentina, hasta evacuar sus aguas en el océano Pacífico en el sector de Santo Domingo, Región de Valparaíso (Araneda *et al* 2019). Dada la gran extensión de esta cuenca hidrográfrica, es posible subdividirla en tres tramos: Maipo Superior, Maipo Intermedio y Maipo Inferior. La cuenca de Santiago pertenece a la cuenca de Maipo Intermedio y, a su vez se puede subdividir en 5 subcuencas: río Mapocho, del estero Lampa, estero Angostura, estero Colina y la cuenca del Maipo propiamente tal (Araneda *et al* 2019).

5.2. Clima

Las principales características climáticas que presenta la Región Metropolitana corresponden al tipo "mediterráneo", de estación seca larga y con un invierno lluvioso. La temperatura media anual es de 13,9°C, en tanto que el mes más cálido corresponde al mes de enero, alcanzando una temperatura de 22.1°C, y el mes más frío corresponde al mes de julio con 7,7°C. Las precipitaciones anuales promedio históricas para Santiago alcanzan los 369,5 mm, concentrándose principalmente en los meses de mayo, junio, julio y agosto. Las precipitaciones decrecen desde la costa hacia la depresión intermedia, para aumentar nuevamente en la cordillera de los Andes; originándose de esta manera líneas bioclimáticas generales de la región y de la zona central de Chile (Sistema Integrado de Información Territorial, 2021).

5.3. Variables Geológicas

Los principales rasgos geológicos del Gran Santiago capaces de afectar la infiltración del suelo en la ciudad son: la litología, la geología estructural y la topografía.

I. Litología

Las rocas que componen el basamento de la cuenca de Santiago corresponden a la parte oriental de la Cordillera de la Costa y la parte occidental de la Cordillera de los Andes. Aquellas que provienen de la Cordillera de la Costa están compuesto por rocas volcánicas y secuencias sedimentarias del Jurásico-Cretácico superior y rocas intrusivas del Jurásico-Cretácico (Gana *et al.*, 1996; Wall *et al.*, 1996; Wall *et al.*, 1999; Sellés and Gana, 2001). Las rocas de la parte occidental de la Cordillera de los Andes son en su mayoría volcánicas y en menor medida se componen de secuencias sedimentarias depositadas durante el Cenozoico (Charrier *et al.*, 2002; Charrier *et al.*, 2005; Fock, 2005; Fock *et al.*, 2006; Jara *et al.*, 2012; Jara and Charrier, 2014).

Depósitos fluvioaluviales y fluviales, de tamaño grava a arena han llenado la cuenca desde el Pleistoceno inferior, según la datación de antiguos abanicos aluviales (Rauld, 2011). Su origen está relacionado con los sistemas fluviales conformados por los ríos Maipo y Mapocho, que transportan sedimentos de la Cordillera de los Andes hacia el oeste. Mucho menos abundante, es la presencia de grava angular a subangular con matriz de grano medio a fino, correspondiente a depósitos coluviales, que se encuentran en los bordes de la cuenca. Además, es posible encontrar sedimentos lacustres (arena limosa a arcilla) localmente en el noroeste y suroeste de la cuenca. Los afloramientos de los depósitos piroclásticos de la Ignimbrita Pudahuel se ubican principalmente en la parte centro-occidental de la cuenca. Estos depósitos corresponden a tobas riolíticas del Pleistoceno (Stern *et al.*, 1984), que en algunos casos están interestratificados con sedimentos aluviales finos.

Para definir adecuadamente los depósitos sedimentarios dentro de la Cuenca, Leyton (2010) consideró las principales características granulométricas en los primeros 30 m, prácticamente eliminando la transición de zonas entre diferentes unidades, utilizando información de pozos y estudios de Valenzuela (1978), Wall et al. (1999), Milovic (2000), Fernández (2001, 2003), Rauld (2002), Sellés & Gana (2001), y Fock (2005). De acuerdo con esto, Leyton definió las siguientes unidades para caracterizar la litología en la cuenca (Imagen 6):

- Unidad I. Roca madre. Aflora en cadenas montañosas alrededor de la cuenca de Santiago y cerros aislados (Chena, Santa Lucía, Renca y otros). Según Fock (2005), hacia los afloramientos NE y E son principalmente rocas de la Formación Abanico, intruidas por rocas ígneas. El N y W está dominado por rocas más antiguas, asignadas a las formaciones Lo Valle, Veta Negra y Lo Prado y cuerpos intrusivos del Cretácico.

- Unidad II. Grava. Sedimentos de grano grueso, predominantemente gravas arenosas de densidad media a alta componen principalmente esta unidad. En la Cuenca de Santiago, la componen principalmente depósitos jóvenes de los ríos Maipo, Mapocho y Clarillo.

- Unidad IIIa. Depósitos matriz soportado, con clastos tamaño bloque y grava subangulares en matriz arenosa-arcillosa, intercalado por arena, limo y arcilla. En el área de estudio, corresponden a pequeños abanicos aluviales ubicados en el pie de la ladera de los cerros principales que rodean la Cuenca de Santiago.

- Unidad IIIb. Depósitos de gravas y bloques en matriz areno-arcillosa, relacionados a antiguos abanicos aluviales provenientes del río Mapocho, al noreste de la cuenca. Forman un relieve de altura media como Cerro Apoquindo y Calan.

- Unidad IV. Depósitos matriz soportado. Gravas y bloques en una matriz arcillosa-arenosa. Corresponden a viejos depósitos de deslizamientos de tierra en las partes noreste y este de la cuenca.

- Unidad Va. Depósitos de grava en matriz arcillo-arenosa con abundantes intercalaciones de arena, limo y arcilla, así como de suelos limosos arcillosos gruesos. Corresponden a depósitos de abanico aluvial de Colina y Arrayán arroyos.

- Unidad Vb. Depósitos de arena de grano fino a grueso intercalada con capas variables de limo y arcilla.

- Unidad VI. Depósitos con espesor mayor a 20 m, compuestos de ceniza volcánica con líticos y fragmentos pumiceos, asignados a la unidad llamada Ignimbrita Pudahuel, con intercalaciones de arena, limo y grava. Los depósitos forman un relieve de lome suave en las zonas occidental y noroeste de la cuenca de Santiago, y adicionalmente se encuentran adosados a cerros en Puente Alto y San Bernardo.

- Unidad VII. Depósitos de limo y arcilla con intercalaciones de grava, arena y cenizas, ubicados principalmente en la norte área de la cuenca de Santiago.
- Unidad VIII. Depósitos fluviales recientes de granulometría variable, desde grava hasta limo.

SOLO USO ACADÉMICO

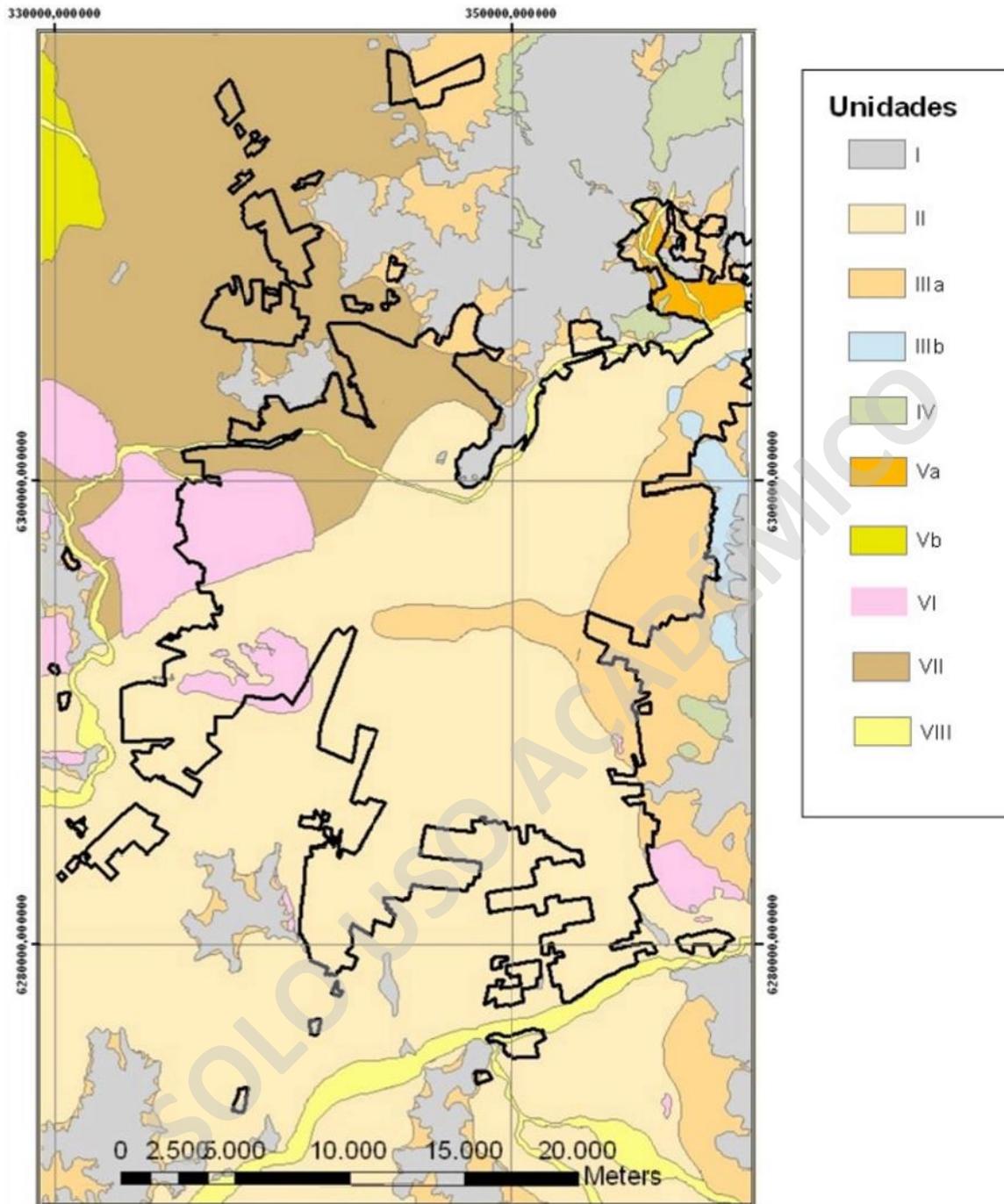


Imagen 6. Mapa con la geología superficial de la Cuenca de Santiago. La línea negra representa áreas urbanas. (Leyton et al 2010)

II. Geología Estructural

Las características geotectónicas de la zona centro de Chile (32° - 35° S) se deben a la subducción de corteza oceánica bajo corteza continental, registrada desde el Jurásico Inferior hasta el Presente, lo que a condicionando procesos geológicos como: el magmatismo, ubicación del arco con respecto a la fosa,

desarrollo de cuencas, orogenia y tectonismo, generando estructuras que se disponen principalmente en franjas de orientación norte – sur. (Coira et al., 1982; Mpodozis y Ramos, 1989; Fock, 2005).

La Falla de San Ramón, ubicada en el margen occidental de los Andes, en el límite entre la Depresión Central y la Cordillera Principal de la ciudad de Santiago (33.5 ° S), se ha definido principalmente siguiendo los escarpes topográficos observados a lo largo del piedemonte andino al este de Santiago (Rauld, 2011). La mayoría de los estudios han descrito movimientos inversos de la falla de San Ramon durante el Neógeno, basados tanto en marcadores locales (Rauld, 2011; Vargas et al., 2014) como en interpretación de una falla maestra ligada a la deformación observada en la faja plegada y corrida (Armijo et al., 2010; Fock et al., 2005; Riesner et al., 2017). Yañez et al. (2020) indican que con base en un estudio paleosismológico realizado por Vargas et al. (2014) en la zanja que corta el escarpe de la falla, interpretaron desplazamientos de la falla de hasta 5 m aproximadamente durante los últimos veinte mil años, lo que sugiere que la falla está activa y puede generar terremotos de magnitud M_w 7,5 aproximadamente.

Por otro lado, la sismicidad registrada al sureste de Santiago (C1, Imagen 7), apunta a un posible despegue rocoso en el Moho debajo de la Cuenca de Santiago (Leyton et al., 2009). La explicación más simple para esta observación es la presencia de fuertes asperezas rodeadas por un contacto progresivo mucho mayor entre la corteza y el manto. Sin embargo, es necesario encontrar más evidencia para esta afirmación (Yañez et al., 2020).

En resumen, existe dos zonas de debilidad en el basamento de la cuenca, una reconocida y otra inferida, que pueden aumentar la capacidad de infiltración del suelo en profundidad: la Falla San Ramón al este de Santiago, y el posible despegue rocoso o “*décollement*” (C1, Imagen 7) (Yañez et al., 2020).

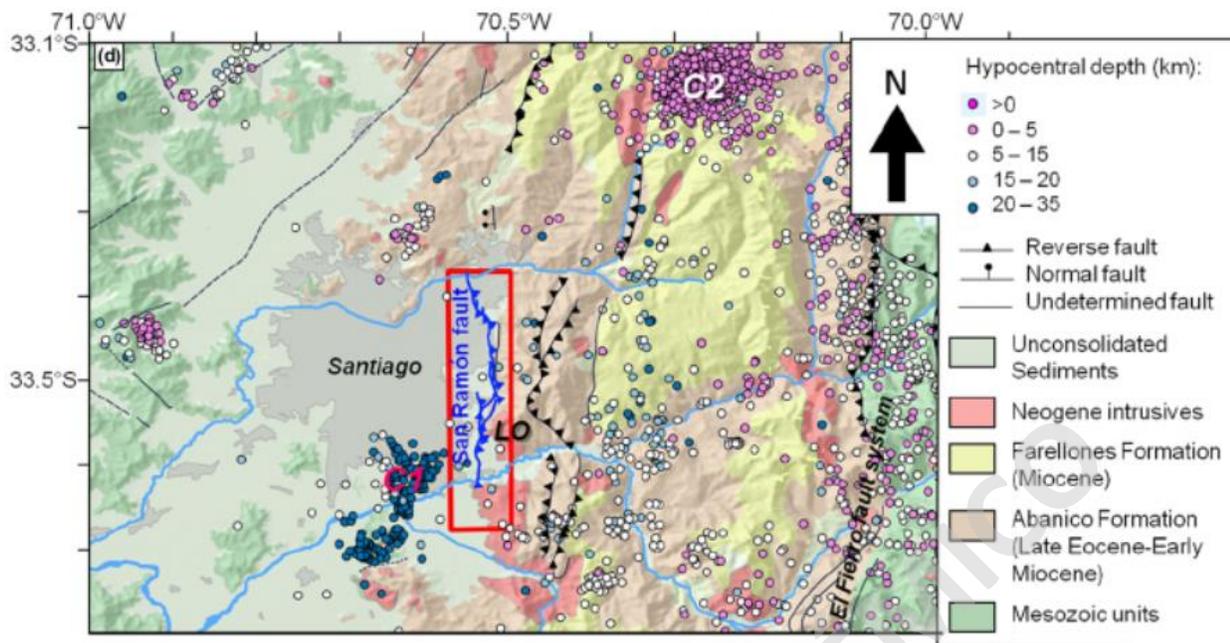


Imagen 7. Mapa geológico simplificado del área de Santiago. Extraído de Yañez et al., 2020. Los círculos muestran la sismicidad registrada por las redes locales. Las líneas azules indican el rastro de la Falla de San Ramón. LO = Plutón La Obra. C1 = cúmulo de sismicidad que se ha interpretado como resultado de movimientos a lo largo de una falla de despegue ubicada más cerca de la discontinuidad continental de Mohorovičić (Fariás et al., 2010; Leyton et al., 2009). C2 = Clúster de sismicidad relacionado con la actividad minera en la mina Disputada (Leyton et al., 2009).

III. Topografía

La cuenca de Santiago corresponde a un graben limitado por fallas normales al Este y Oeste (Brüggen, 1950; Thiele, 1980). Fariás et al. (2006) postula que la Depresión Intermedia no puede ser atribuida solamente a procesos tectónicos, sino que gran parte fue generada por el desarrollo de un drenaje lateral. Fallas secundarias habrían originado varias rinconadas al interior de la cuenca principal, tales como La Dehesa, Conchalí, Lo Aguirre y otras (Araneda et al. 2019).

Para conocer como varía la topografía dentro de la cuenca, se realiza un análisis del modelo de elevación digital de la ciudad, con una escala de 30m (Imagen 8), donde se evidencia que existe un aumento de la altura de la cuenca hacia el extremo noreste de Santiago.

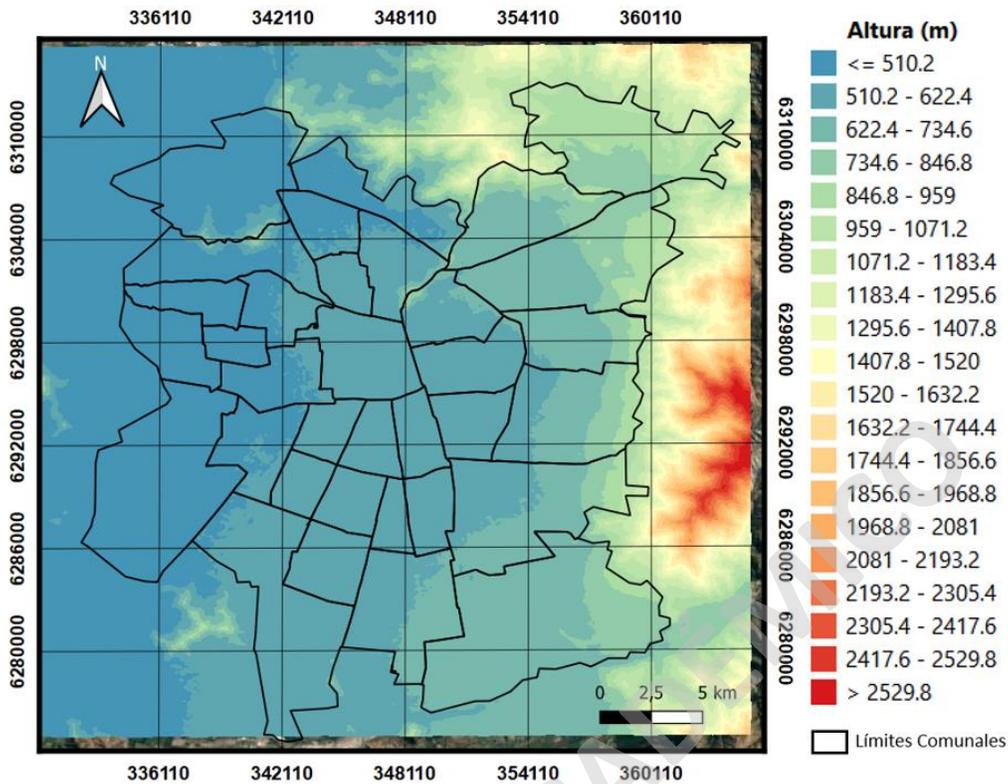


Imagen 8. Mapa de altura del Gran Santiago. Elaboración propia. Se utilizó un modelo de elevación digital con una resolución de 30 metros a través del programa Qgis 3.14.

5.4. Historial de inundaciones en el Gran Santiago

De acuerdo con diversos registros y crónicas realizadas por distintos historiadores, entre 1541 y 1599, cuando se iniciaban los asentamientos humanos, hubo al menos cuatro grandes inundaciones de la, en ese entonces, pequeña ciudad de Santiago (Departamento de Gestión del Riesgo en Emergencias y Desastres del Ministerio de Salud, 2022).

Entre junio y agosto de 1544 se producen lluvias que generan aluviones en varias zonas de las actuales regiones Metropolitana y O'Higgins, junto con el desborde de los ríos Mapocho y Maipo. Sobre este evento hidrometeorológico, el historiador Benjamín Vicuña Mackenna (1877) propone compararlo con las situaciones que posteriormente caracterizaron a las inundaciones ocurridas en 1783 y 1827 (Departamento de Gestión del Riesgo en Emergencias y Desastres del Ministerio de Salud, 2022)..

Intensas lluvias que se prolongan del 20 al 22 de julio de 1574, causan el desborde del río Maipo, cuyas aguas destruyen el puente dejando a Santiago incomunicado con el sur por algunos días, alterando el abastecimiento de la ciudad. Asimismo, se desborda el río Mapocho inundando gran parte de la ciudad, según textos del escribano del Cabildo de Santiago, Nicolás de Gárnica, quien relata un

fuerte nevazón durante ese mismo invierno, además de lluvias abundantes que se prolongaron hasta la primavera (Luc Ortlieb, 1994).

El siglo cerró con un invierno de 1597 «*extraordinariamente lluvioso*», que causa el desborde del río Mapocho, inundando calles, destruyendo muchas casas y solares y causando la muerte “*a un número considerable de personas* (Luc Ortlieb, 1994).

Actualmente, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) posee un registro dinámico de los principales desastres relacionados con Peligros Geológicos registrados desde 1980, con base en la documentación disponible en la Biblioteca del Sernageomin y en medios de comunicación (SERNAGEOMIN, 2017). Esto incluye información sobre pérdidas de vidas humanas y montos gastados por el fisco en reconstrucciones. En relación con peligros desencadenados en épocas de fuertes lluvias, cabe destacar los eventos ocurridos en las siguientes fechas:

- 21 y 22 de febrero de 1980: Flujo de detritos (aluvión) en el río San Francisco, afluente del río Mapocho, causaron la muerte de 3 personas, 4 desapariciones y 580 damnificados, así como pérdidas por US\$ 500.000.
- Marzo de 1980: Flujo de detrito en los ríos Mapocho, Maipo, Yeso y Colorado, cortes en camino y daños en diversas estructuras.
- 27 junio de 1982: Desborde del río Mapocho y del Zanjón de la Aguada, ocasionando inundaciones en el sector oriente de Santiago (Imagen 9A).
- 15 al 17 de junio de 1986: Desborde de los ríos Maipo y Mapocho, del canal San Carlos y el Zanjón de la Aguada, además de las quebradas San Ramón y Macul; 18 comunas de Santiago declaradas zonas de catástrofe a causa de las inundaciones (Imagen 9B).
- 14 de julio de 1987: Desborde de quebradas del sector oriente de Santiago, y especialmente del Zanjón de la Aguada, que ocasiona la inundación de las comunas del sector, especialmente Peñalolén.
- 29 de noviembre de 1987: Deslizamiento de rocas y flujo de detrito (aluvión) en el río Colorado, que arrasó con 4 campamentos del proyecto Central Hidroeléctrica Alfalfal, de Chilectra, dejando 41 muertos y/o desaparecidos y pérdidas materiales por US\$ 12.000.000, considerando la Central Maitenes, 18 puentes sobre el río Colorado y caminos de acceso al proyecto Alfalfal.
- 3 de mayo de 1993: Flujo de detrito y de barro (aluvión) en las quebradas Macul y San Ramón, debido a las intensas lluvias de verano, lo que provoca la muerte de 26 personas, 9 desaparecidos, 307 casas destruidas, 5.000 dañadas, y US\$ 5.000.000 en pérdidas materiales.
- 26 y 27 de agosto de 2005: Desborde de cauces e inundaciones en el sector oriente de la Región Metropolitana, en sectores bajos de las quebradas Lo Cañas, Macul y San Ramón, y curso medio del río Mapocho.



Imagen 9. A) Caída de un Austin Mini de color blanco al río (La tercera, 2020. Extraído de <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/las-torrenciales-lluvias-de-1982-el-ultimo-grandesborde-del-mapocho-podria-volver-a-ocurrir/WYY2KWUOCRAY7MKHSUVD3VL4D4/>). B) Consecuencias del desborde del río Mapocho en la zona precordillerana de Santiago. En la imagen se observa a un niño sobre los restos de su casa. Lo Barnechea / Población Quinchamalí 1986 (Memorias del siglo XXI, donada por Elisa Rocha Oyarce. Extraído de <https://www.memoriasdelsigloxx.cl/601/w3-article-530.html>). C) Desborde del canal Santa Marta, a la altura de 3 Poniente, en la comuna de Maipú (SERNAGEOMIN, 2017). D) Avenida Costanera Andrés Bello (Agencia Uno. Extraído de <https://www.24horas.cl/nacional/fotos-muestran-el-desborde-del-rio-mapocho-1989221>).

- 21 de enero y 8 de febrero de 2013: Flujo de detrito en el Cajón del río Maipo, que en 2 oportunidades por 2 días cada vez, bloquearon varios caminos y afectaron el suministro de agua potable al Gran Santiago, a causa del alto contenido de sedimentos.
- 6 de agosto de 2015: Desborde del canal Santa Marta, a la altura de 3 Poniente, en la comuna de Maipú. Anegamiento de viviendas (Imagen 9C).
- Abril del año 2016: Desborde del río Mapocho. Ingreso de agua a edificios cercanos e inundando calles aledañas, en las comunas de Providencia e incluso el centro de la capital (Imagen 9D).

6. PROCEDIMIENTOS METODOLOGICOS

Para llevar a cabo los objetivos de esta tesis, se requiere una serie de análisis preliminares que nos permitan conocer las características que presenta la zona de

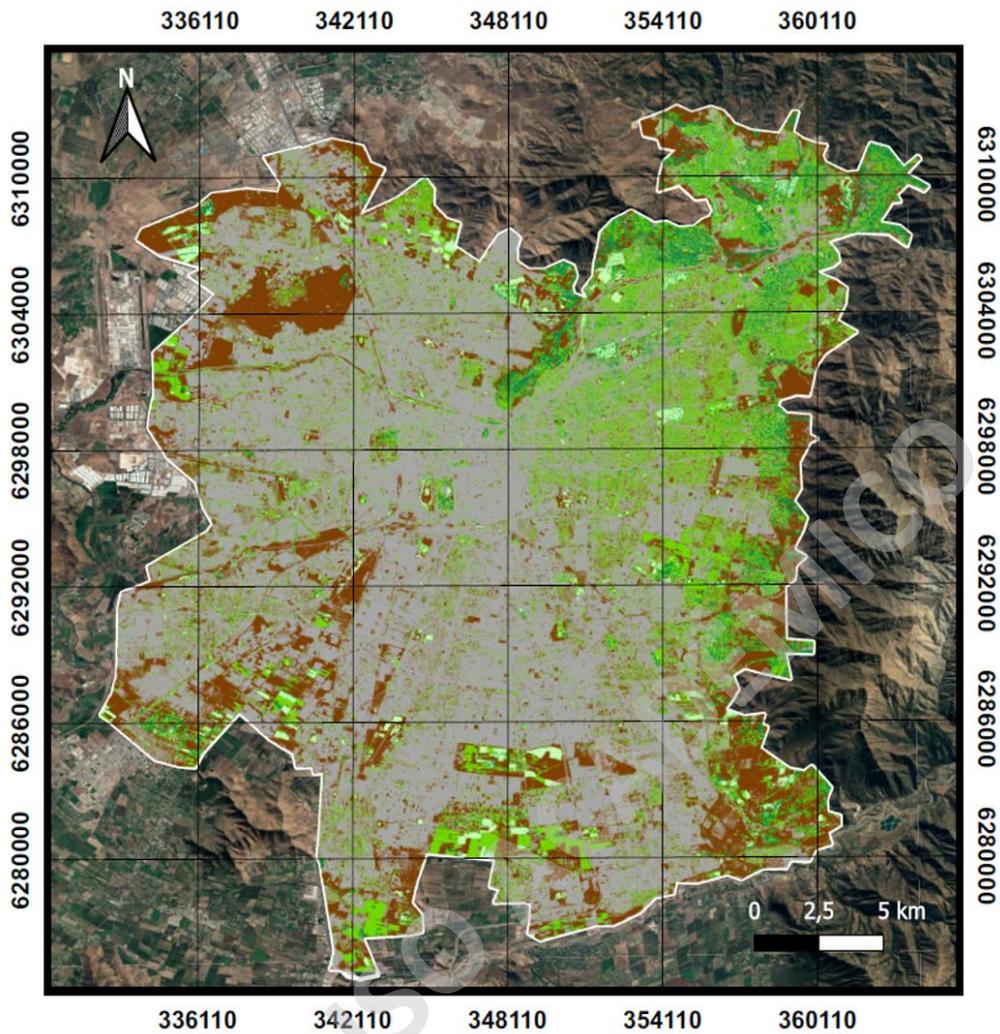
estudio, en específico sobre lo tipos de cobertura de suelos, su capacidad de infiltración y como esta se relaciona con la precipitación existente en el área.

6.1. Modelo cobertura de suelos

Con objetivo de generar la cobertura de suelos para la ciudad de Santiago, en la primera etapa, a través de análisis de imágenes satelitales Sentinel, y con apoyo de las imágenes disponibles en Google Earth, se identifican y clasifican los tipos de cobertura de suelos presentes en la ciudad de Santiago según cinco categorías:

1. Construido (elementos no naturales contruidos por el ser humano, como calles, edificios, etc)
2. Suelo desnudo
3. Pasto
4. Vegetación siempre verde (vegetación con follaje presente en invierno y verano)
5. Vegetación decidua (vegetación con follaje presente solo en verano)

Se seleccionan 100 puntos de cada uno, para luego generar modelos probabilísticos en MaxEnt® (Wenkai Li & Qinghua Guo, 2010) para cada tipo de suelo, con base en aproximaciones de la combinación de imágenes satelitales de invierno y verano. Para confirmar la precisión del modelo de cobertura, se analizaron 1000 puntos generados de manera aleatoria, y se revisó si su clasificación coincidía con lo observado en las imágenes satelitales. El modelo generado (Imagen 10) tiene una precisión general de 87.6%.



Clasificación Cobertura de Suelo

- Construido
- Suelo desnudo
- Pasto
- Vegetación siempre verde
- Vegetación decidua

Imagen 90. Clasificación de coberturas de suelo dentro del área urbana del Gran Santiago. Elaboración propia.

6.2. Modelo de precipitación

Se utilizaron los datos de precipitaciones disponibles en los portales de internet de la Dirección General de Agua (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Las estaciones seleccionadas (Imagen 11) para construir el modelo de distribución de la precipitación en Santiago son:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. Antupiren (DGA) | 8. Pudahuel (DMC) |
| 2. Cerro Calán (DGA) | 9. Quinta Normal (DMC) |
| 3. El Vergel (DGA) | 10. Río Mapocho En Los Almendros (DGA) |
| 4. Eulogio Sánchez Tobalaba (DMC) | 11. Río Molina Antes Junta San Francisco (DGA) |
| 5. Fondos Marruecos (DGA) | 12. Terraza Oficinas Centrales DGA (DGA) |
| 6. La Obra Recinto Emos (DGA) | |
| 7. Pirque (DGA) | |

Al momento de seleccionar las estaciones se consideraron aquellas que cumplieran con los siguientes criterios:

- i. Ubicación dentro Gran Santiago o en un área con una distancia máxima de 20 km desde los límites comunales hacia el exterior.
- ii. Registrar para todos los años entre 2010 y 2020 al menos una cifra de precipitaciones mensuales al año.

Para las estaciones de la DMC, a los registros sin precipitación se les asignó un valor de 0, y en aquellas estaciones de la DGA que no presentan datos mensuales, se le consideran como valores no aplicables (NA).

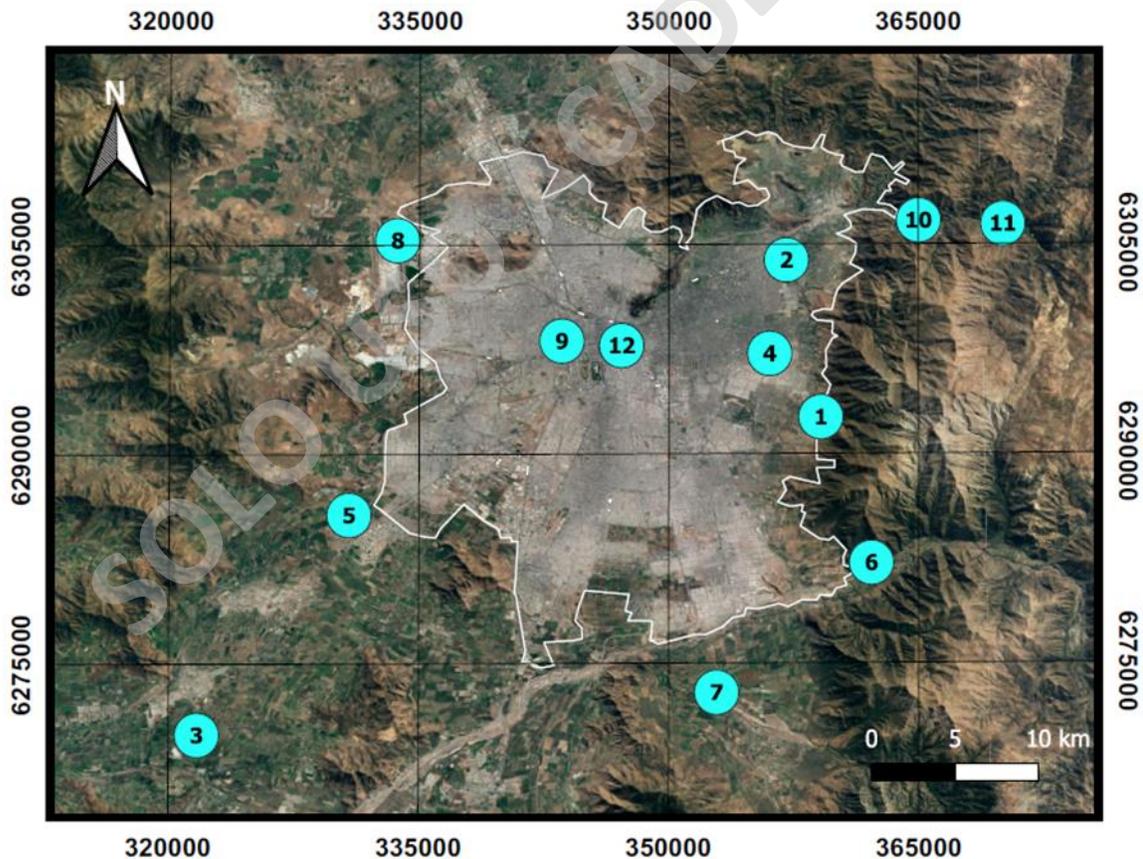


Imagen 11. Distribución de las estaciones meteorológicas. Elaboración propia.

Para estimar los patrones de distribución de la precipitación en el Gran Santiago es necesario interpolar los datos disponibles de las distintas estaciones

meteorológicas. Para ello es importante conocer cómo los parámetros geográficos pueden impactar en la distribución de las precipitaciones, de forma de obtener estimaciones de precipitación que sean lo más precisas posibles.

Para ello, primero se realiza un análisis estadístico univariado para evaluar si existe una relación espacial entre el nivel de precipitaciones de las estaciones meteorológicas, de manera de determinar si las precipitaciones de una estación pueden ser utilizadas para establecer los niveles de precipitación en su entorno. Para ello se procesan los datos usando el programa Geoda, con el objetivo de conocer el Índice de Moran's. Este índice es una medida estadística desarrollada por Alfred Pierce Moran (1950) que analiza de forma integral las variaciones de autocorrelación espacial entre valores vecinos más cercanos, el que consiste en la medición de la presencia o ausencia de autocorrelación espacial de una variable.

La autocorrelación espacial está indicada por medio de valores que oscilan entre +1 y -1, en donde +1 indica autocorrelación positiva perfecta, es decir los valores cercanos son similares, -1 expresa autocorrelación negativa perfecta, lo que significa que los valores cercanos son contrarios, y un valor 0 muestra la presencia de patrones completamente aleatorios en su distribución espacial (Yrigoyen, 2003).

En la presente investigación, se analizó la correlación espacial del promedio de los datos de precipitación mensual desde el 2010 al 2020. Para efectos prácticos, se consideró que existe una relación espacial si el índice de Moran's resulta mayor o igual a 0.25, considerando la distancia mínima al vecino más cercano existente dentro de los datos (18.191 metros) y como mínimo un vecino por cada punto como factores de peso. Se consideró este valor de Moran's por el comportamiento de los datos, ya que, al tener un número reducido de estaciones meteorológicas para realizar el presente estudio, existe una alta incertidumbre, por lo que se decidió utilizar un valor relativamente alto de Moran's para considerarlo como confiable. Con base en lo anterior, la tabla 2 indica los valores obtenidos del Índice de Moran's para cada mes y la existencia de relación espacial.

	Prom_ENE	Prom_FEB	Prom_MAR	Prom_ABR	Prom_MAY	Prom_JUN
Indice de Moran's	0.469	0.067	0.385	0.462	0.327	0.276
Relación Espacial	SI	NO	SI	SI	SI	SI

	Prom_JUL	Prom_AGO	Prom_SEP	Prom_OCT	Prom_NOV	Prom_DIC
Indice de Moran's	0.064	0.300	0.267	0.291	0.616	0.391
Relación Espacial	NO	SI	SI	SI	SI	SI

Tabla 2. Relación espacial en base a los valores del índice de Moran's obtenidos del programa Geoda. Elaboración propia.

Posteriormente, se analizó la relación de los datos de precipitación con la altura, mediante un análisis de correlación entre los datos obtenidos de cada estación meteorológica y la altura en la que ésta se encuentra ubicada. Se consideró

que existe una relación entre la variable espacio y altura si el valor de su correlación es mayor a 0,5 (Tabla 3). Esto se realizó, ya que la presencia de cordilleras alrededor de la cuenca de Santiago permite considerar la altitud como un parámetro geográfico con una fuerte influencia en la precipitación, además de la existencia de una relación, principalmente en los meses de menor precipitación (noviembre a marzo), donde se observa una mayor correlación en comparación a los meses con mayor probabilidad de lluvias (abril a agosto). Esto puede deberse a que los frentes de lluvia en Santiago son tan amplios que llueve por igual en toda la ciudad en época de invierno, y en cambio, en febrero, por ejemplo, ocurren lluvias esporádicas con una mayor intensidad en zonas precordilleranas que aquellas cercanas al centro de la ciudad.

	Prom_ENE	Prom_FEB	Prom_MAR	Prom_ABR	Prom_MAY	Prom_JUN
Indice Correlación	0.873	0.706	0.809	0.482	0.524	0.174
Relación Altura	SI	SI	SI	NO	SI	NO

	Prom_JUL	Prom_AGO	Prom_SEP	Prom_OCT	Prom_NOV	Prom_DIC
Indice Correlación	-0.047	0.418	0.731	0.661	0.839	0.722
Relación Altura	NO	NO	SI	SI	SI	SI

Tabla 3. Relación espacial en base a los valores de correlación entre la altura y los datos de precipitación promedio mensual del 2010 al 2020. Elaboración propia.

En base a estos resultados, finalmente se utilizaron 4 aproximaciones para estimar la precipitación promedio mensual entre el 2010 y el 2020 en zonas donde no hay información, esto mediante herramientas disponibles en QGIS:

1. Kriging, cuando existe una relación espacial entre los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas, y se divide en 2 tipos;
 - a) Regression kriging, que se utiliza cuando existe una relación de los datos con otra covariable además del espacio, en este caso con la altura.
 - b) Ordinary kriging, cuando solo existe relación de los datos con el espacio y no posee otra covariable que pueda explicar la distribución de las precipitaciones.
2. Regresión, cuando existe relación de los datos solamente con la variable de altura sin considerar la estructura espacial de estos, tomando los datos que tenemos para generar una ecuación y calcular a partir de esta, los valores de precipitación en áreas sin información.
3. Multilevel B-Spline, cuando no existe relación entre las precipitaciones y las alturas o espacio. Esta técnica utiliza una serie de curvas de interpolación, logrando generar un modelo que suaviza la variación de la precipitación sin generar cambios abruptos de los valores entre una estación y otra.

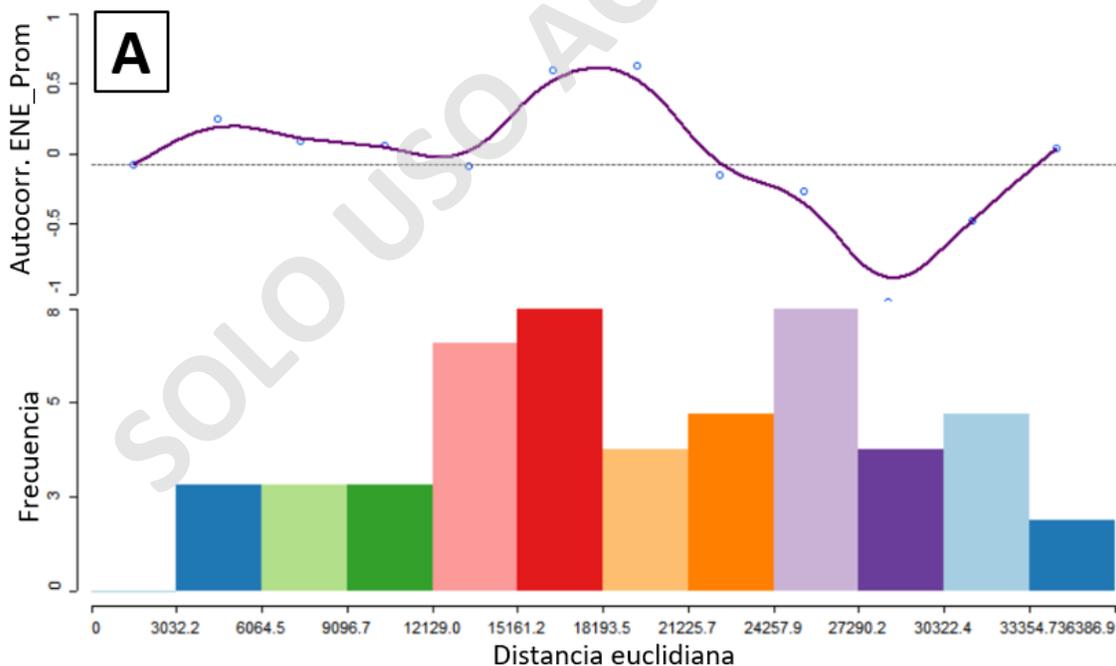
En la Tabla 4, se resume la existencia de relación espacial y de altura de los datos según el mes, especificando cual fue el método de aproximación utilizado.

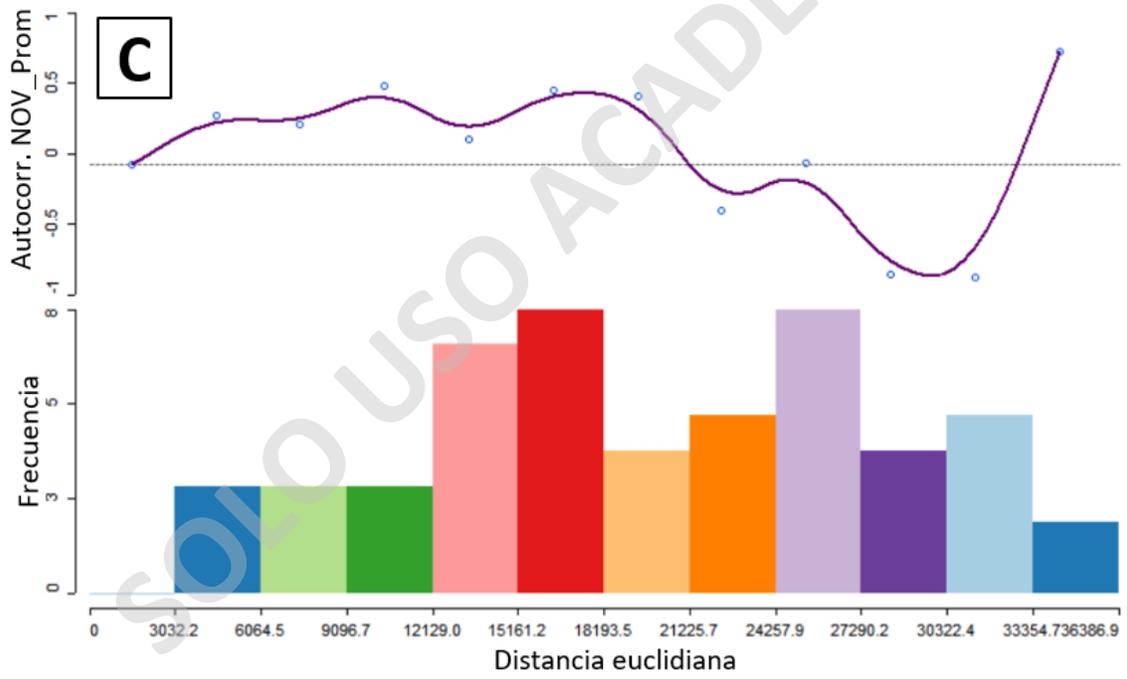
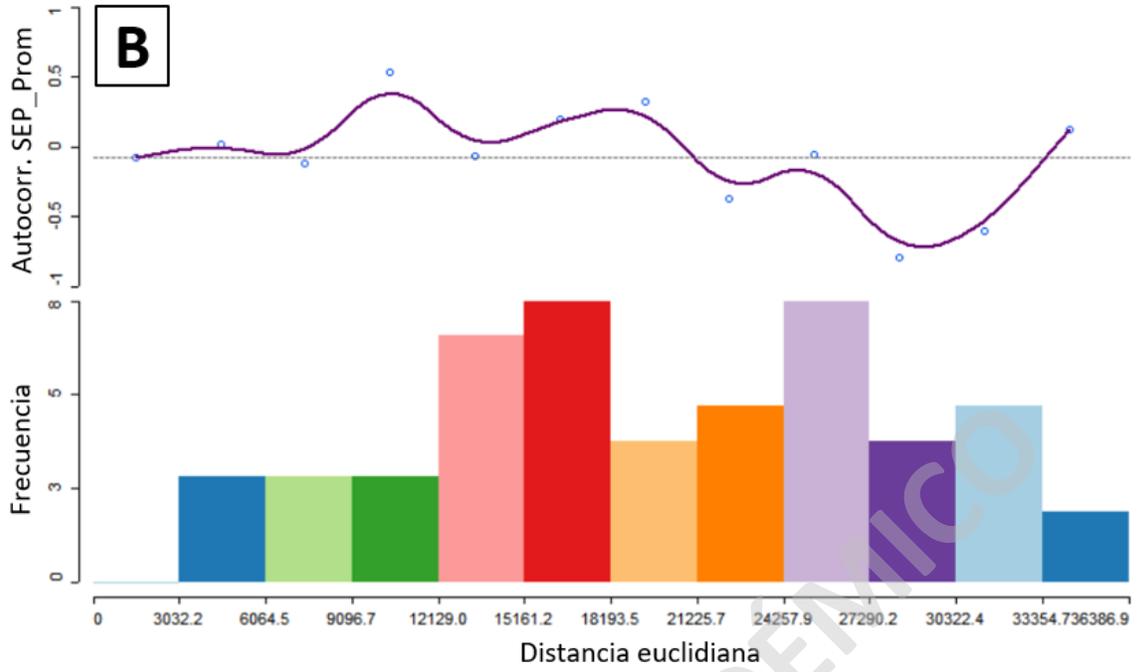
	Prom_ENE	Prom_FEB	Prom_MAR	Prom_ABR	Prom_MAY	Prom_JUN
Relación Espacial	SI	NO	SI	SI	SI	SI
Relación Altura	SI	SI	SI	NO	SI	NO
Modelo Regresión	Regeesion Kriging	Regresión	Regeesion Kriging	Ordinary Kriging	Regeesion Kriging	Ordinary Kriging

	Prom_JUL	Prom_AGO	Prom_SEP	Prom_OCT	Prom_NOV	Prom_DIC
Relación Espacial	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Relación Altura	NO	NO	SI	SI	SI	SI
Modelo Regresión	B-Spline	Ordinary Kriging	Regeesion Kriging	Regeesion Kriging	Regeesion Kriging	Regeesion Kriging

Tabla 4. Herramientas de análisis probabilístico de QGis a utilizar para cada mes en base a las relaciones con el espacio y altura. Elaboración propia.

Para los casos donde es necesario utilizar el método de Kriging, se determinó que el modelo más adecuado de variograma es el de raíz cuadrada (sqrt), ya que los datos a mayor distancia, aunque poca, si presentan relación. Esto se concluye en base a los correlogramas espaciales obtenidos al utilizar el programa Geoda (Imagen 12), y la comparación del modelo de raíz cuadrada vs el modelo logarítmico (Imagen 13).





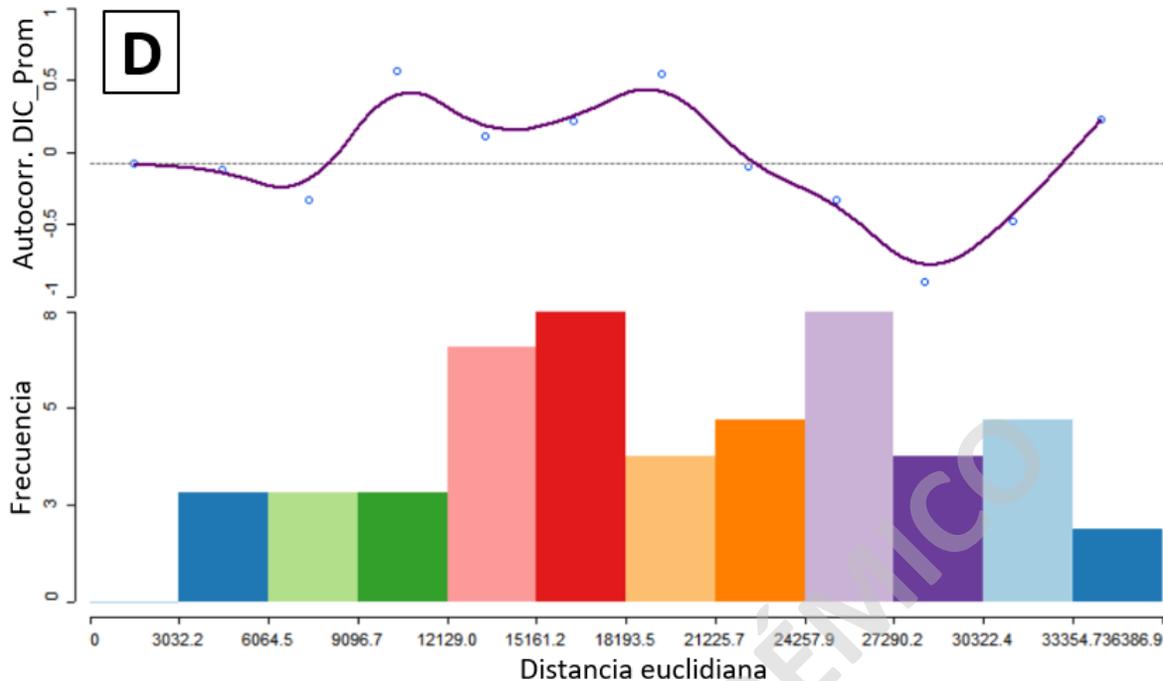


Imagen 102. Correlogramas espaciales obtenidos al utilizar el programa Geoda, correspondientes a los meses de enero (A), septiembre (B), noviembre (C) y diciembre (D). Elaboración propia.

En la parte inferior se muestra un gráfico de barra, cuyo eje “x” es equivalente a la distancia entre estaciones meteorológicas, mientras el eje “y” equivale al número de estaciones vecinas dentro de esa distancia. Sobre este, se observa el gráfico de autocorrelación que muestra la relación de datos de precipitación y las estaciones vecinas presentes a x distancia. En todos los ejemplos presentes en la Imagen 12 (A, B, C y D), es posible observar que en general, existe una clara autocorrelación positiva con aquellos vecinos que se encuentran hasta una distancia de 20.000 metros aproximadamente (zona intermedia del gráfico), al igual que los datos ubicados a mayor distancia (extremo derecho de la curva de autocorrelación).

La Imagen 13, grafica el comportamiento de los modelos *sqrt* y *ln*. El modelo de *sqrt* presenta una menor tendencia a llegar a una asíntota en comparación con el modelo *ln*. Si esto lo llevamos a los ejemplos mencionados anteriormente, considerando x e y como los datos de espacio y precipitación respectivamente, vemos que es más adecuado utilizar el modelo de *sqrt* dado que no se observa un comportamiento asintótico en la estructura espacial de los datos de precipitación, es decir, que sigue existiendo una correlación entre los datos aun a mayores distancias.

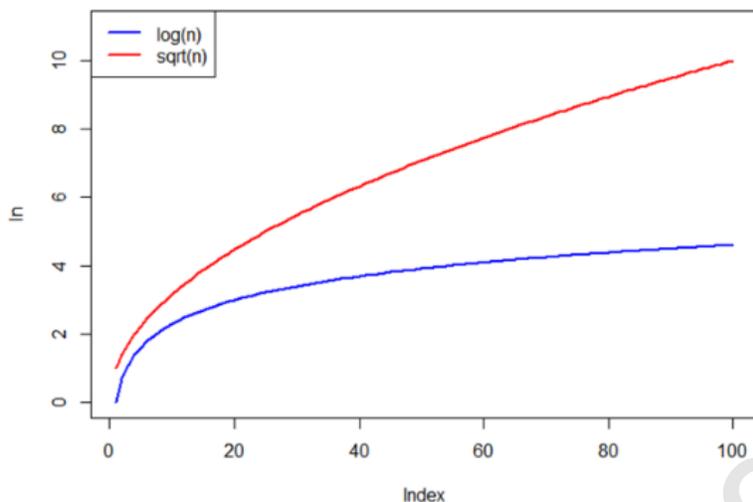


Imagen 13. Comparación del modelo de raíz cuadrada (línea roja) vs el modelo logarítmico (línea azul). Extraído de <https://stackoverflow.com/questions/42038294/is-complexity-ologn-equivalent-to-osqrtn/42038398>

Con esto resuelto, a través del programa QGIS, se utiliza la calculadora ráster para promediar todos los modelos creados (Tabla 4) y se genera el modelo de precipitación del Gran Santiago para los años entre 2010 y 2020 (Imagen 14).

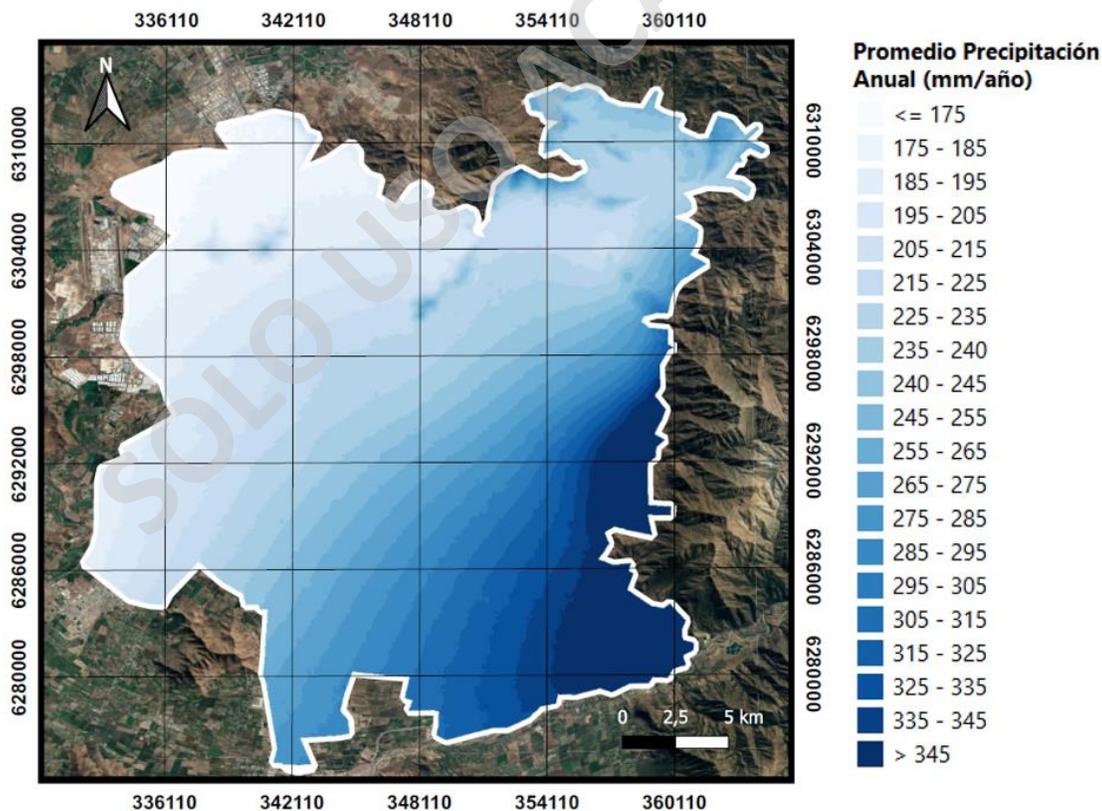


Imagen 14. Modelo de precipitación anual del Gran Santiago. Refleja el promedio de lluvias en una escala de milímetros por año, en el Gran Santiago, a partir de los datos de precipitación desde el 2010 hasta el 2020. Elaboración propia.

6.3. Toma de datos en Terreno

En conjunto con la generación de los modelos de distribución de precipitaciones, se realizó una campaña de terreno para estimar la capacidad de infiltración de dos tipos de suelos en Santiago; suelo desnudo y suelo cubierto por pasto. Para la toma de datos en terreno, se dividió el área de estudio en una malla de muestreo compuesta por 9 cuadrantes, cada uno con una dimensión de 7.5 km² aproximadamente (Imagen 15), seguido de la selección aleatoria de los puntos de muestreos, con base en los siguientes criterios:

- Plazas dentro de la zona urbana de Santiago que tuvieran sectores con pasto y suelo desnudo.
- Estar ubicado dentro de los 9 cuadrantes de la malla.
- Estar distribuidos de manera equitativa dentro de los 9 cuadrantes, para disminuir el error de sesgo por una acumulación de datos en ubicaciones específicas.

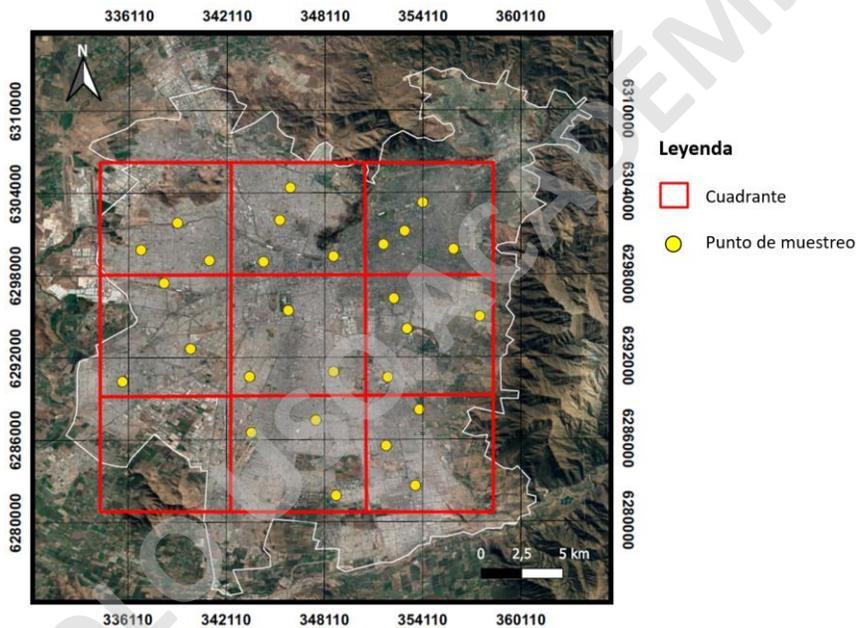


Imagen 15. Malla de muestreo y puntos seleccionados para realizar las mediciones de infiltración. Elaboración propia.

Se midió la velocidad de infiltración *in situ* en 27 puntos de muestreo mediante el método de Müntz, también conocido como infiltrómetro de doble anillo (Custodio & Llamas, 1976), el cual asegura que se evalúe únicamente el flujo vertical del agua, puesto que, al llenarse ambos anillos de forma simultánea, la velocidad del flujo lateral es despreciable frente a la rapidez del agua descendente (Imagen 16A). No se midió en suelos cubiertos por superficies construidas, ya que se consideró que estas áreas no son capaces de infiltrar.

En todos los sitios de muestreo, se midieron tres réplicas en cada tipo de suelo. Para ello, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Al llegar al sitio de muestreo, se registró la ubicación (en coordenadas geográficas), fecha, hora y tipo de suelo en el cual se realiza el muestreo en la libreta de terreno.
2. Elección del área donde se llevará a cabo el muestreo, y extracción de la cubierta superficial para nivelar el terreno.
3. Se insertaron los tubos de 10 y 5 cm de diámetros, 5 a 10 cm en el suelo como mínimo, con ayuda de los guantes y martillo.
4. Se llenó de agua el tubo exterior, y posteriormente el tubo interior, con la mayor rapidez posible, sin alterar la estructura natural de la superficie del suelo, protegiéndolo del impacto del agua de ser necesario.
5. Se colocó la regla con flotador dentro del tubo interior (Imagen 16B).

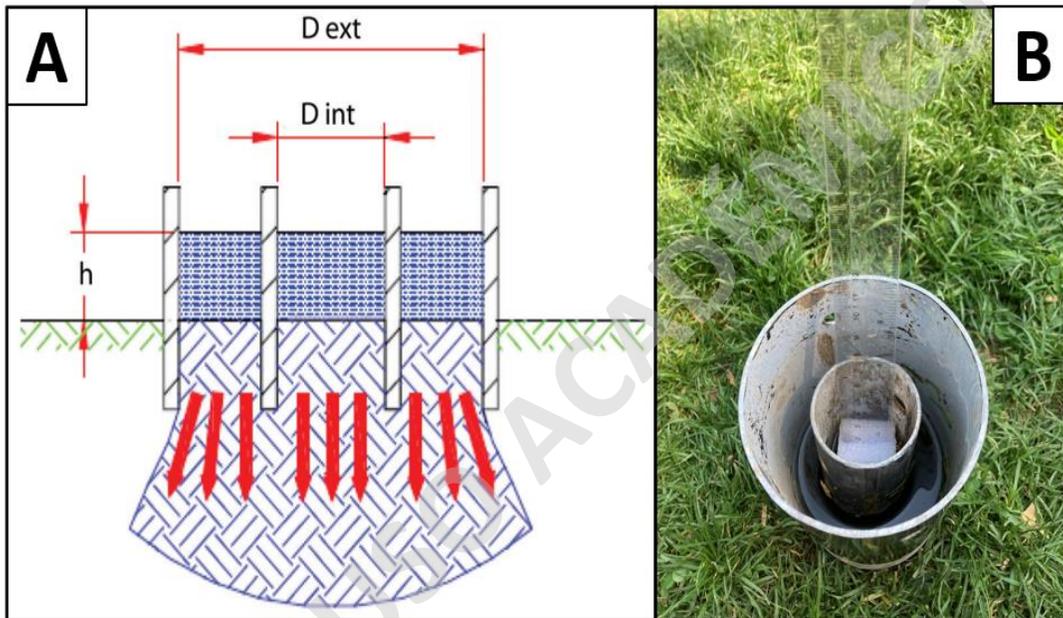


Imagen 16. A) Esquema método del doble anillo (Alvarado & Barahona, 2017). B) Fotografía del infiltrómetro de doble anillo utilizado en terreno. Elaboración propia.

6. Inmediatamente después, se puso en marcha el cronómetro anotando el nivel del agua en ese instante.
7. Se midió la columna de agua de en 3 intervalos de tiempo, primero cada 30 segundos hasta alcanzar los 2 minutos, posteriormente cada 2 minutos, y finalmente, al llegar a la lectura 25, se anotaban los datos cada 4 minutos.
8. A medida que avanzaba el tiempo, se registraron los datos en la planilla de terreno (Tabla 5).
9. Finalmente, el muestreo se daba por terminado al llegar a la lectura 30, si no había suficiente agua para terminar el muestreo, cuando pasaban 5 minutos y no se observa ninguna disminución del agua contenida en los tubos, o cuando la infiltración se vuelve constante.

Lectura	Tiempo (min)	Nivel agua (cm)	Nivel Relleno (cm)	Nivel de agua Infiltrado (cm)	Intervalo de Tiempo (min)	Tasa Infiltración (cm/min)
1						
2						
3						
4						
5						

Tabla 5. Modelo de planilla utilizada para medir la infiltración in situ. Elaboración propia.

Para el cálculo de la tasa de infiltración, se consideró lo siguiente:

- I. En la columna tiempo, se anotaron en minutos los tiempos correspondientes a cada lectura.
- II. El nivel de agua corresponde a la medida del agua en el anillo interior.
- III. El nivel de agua infiltrada se obtuvo de la resta entre dos datos de altura consecutivos.
- IV. El nivel de relleno corresponde al valor del nivel que tiene el agua al rellenar el tubo. Se toma el nivel del agua y en la misma fila se anota el valor de relleno.
- V. El intervalo de tiempo es equivalente a los minutos transcurridos entre dos lecturas consecutivas.
- VI. La tasa o velocidad de infiltración es la relación entre la cantidad de agua que se infiltra y el intervalo de tiempo en que ocurrió.

Para la investigación se tuvo en consideración que, si en intervalos de tiempo iguales el nivel de agua infiltrada es la misma, se habrá alcanzado la velocidad o tasa de infiltración correspondiente al suelo saturado, por lo que la infiltración seguirá permaneciendo constante hasta que el agua alcance un horizonte subyacente de características hidráulicas diferentes al horizonte superior.

6.4. Relación entre modelo precipitación y modelo de coberturas de suelo

Para conocer que zonas pueden presentar mayor vulnerabilidad frente a inundaciones, necesitamos conocer cuanta precipitación es capaz de infiltrar o interceptar la superficie. A partir del modelo de cobertura de suelos creado (Imagen 10), se reconocen 5 tipos de cobertura de suelos en el área de estudio: construido, suelo desnudo, pasto, vegetación decidua y vegetación siempre verde

Para poder vincular esta información con el modelo de precipitación, es necesario asignarle un porcentaje a cada uno de ellos, que se relacione con su capacidad de infiltración, considerando valores de 0 a 1, de la siguiente manera:

I. Construido

Dado que el hormigón, asfalto, fierro y otros elementos utilizados para la construcción de infraestructura urbana son principalmente impermeables, su

capacidad de infiltración es casi nula, por lo que a esta cobertura de suelo se le asigna un valor de cero (0).

II. Suelo desnudo y pasto

Es importante recalcar que la infiltración de ambos tipos de cobertura de suelo se midió en parques y plazas de Santiago, donde no fue posible realizar un análisis en profundidad de la estratigrafía o características de los suelos residuales bajo ambas coberturas

Al traspasar los resultados obtenidos en terreno a una base de datos, se observa que, en todos los casos, la tasa de infiltración se vuelve constante luego de los primeros 10 minutos de medición. Dado lo anterior, se calcula el promedio de la tasa de infiltración pasados diez minutos del inicio del muestreo, para todas las réplicas tanto en pasto como en suelo desnudo, con el objetivo de obtener el valor de la capacidad de infiltración en condiciones de saturación.

Los resultados indican que para pasto la velocidad de infiltración es de 1.27 mm/min, y para suelo desnudo es de 1.34 mm/min (Tabla 6). Considerando que el muestreo se midió en un cilindro de 5 cm de diámetro, y que junio del 2020 fue el más lluvioso desde el 2005 acumulando 110.1 mm de precipitaciones (es decir 110 L/m² al mes) (Dirección General De Aeronáutica Civil & Dirección Meteorológica De Chile, 2021), ambos suelos tienen la capacidad de absorber el 100% de las precipitaciones en Santiago. Dado lo anterior, a ambos tipos de coberturas de suelos se les asigna un valor de 1.

SUELO DESNUDO			PASTO		
ID	Plaza	Promedio	ID	Plaza	Promedio
1	Plaza Los Aromos	0.093	1	Plaza Los Aromos	0.063
2	Plaza Elvira Matte	0.138	2	Plaza Elvira Matte	0.097
3	Parque Calistenia Kenguru	0.068	3	Parque Calistenia Kenguru	0.029
4	Parque Ignacio Carrera Pinto	0.103	4	Parque Ignacio Carrera Pinto	0.035
5	Plaza O'Higgins	0.293	5	Plaza O'Higgins	0.197
6	Plaza Halley	0.083	6	Plaza Halley	0.115
7	Plaza Judas Tadeo	0.250	7	Plaza Judas Tadeo	0.294
8	Parque Juan Pablo II	0.103	8	Parque Juan Pablo II	0.006
9	Plaza República de Paraguay	0.017	9	Plaza República de Paraguay	0.007
10	Parque Juan XXII	0.112	10	Parque Juan XXII	0.010
11	Parque Padre Hurtado	0.043	11	Parque Padre Hurtado	0.004
12	Plaza Loreto Cousiño	0.322	12	Plaza Loreto Cousiño	0.070
13	Parque Balmaceda	0.223	13	Parque Balmaceda	0.443
14	Plaza Yungay	0.020	14	Plaza Yungay	0.013
15	Plaza Lo Besa (Zumba Darlyn Letelier)	0.071	15	Plaza Lo Besa (Zumba Darlyn Letelier)	0.011
16	Parque Mapuhue	0.049	16	Parque Mapuhue	0.028
17	Parque La Bandera	0.177	17	Parque La Bandera	0.105
18	Parque La Castrina	0.318	18	Parque La Castrina	0.320
19	Parque Pablo Neruda	0.128	19	Parque Pablo Neruda	0.136
20	Parque O'Higgins	0.031	20	Parque O'Higgins	0.006
21	Parque Santa Monica	0.095	21	Parque Santa Monica	0.077
22	Plaza Fidel Muñoz Derecha	0.084	22	Plaza Fidel Muñoz Derecha	0.112
23	Plaza Corona Sueca	0.187	23	Plaza Corona Sueca	0.139
24	Plaza Las Reinas	0.043	24	Plaza Las Reinas	0.066
25	Plaza Huelen	0.107	25	Plaza Huelen	0.595
26	Parque Lo Varas	0.106	26	Parque Lo Varas	0.258
27	Parque Violeta Parra	0.360	27	Parque Violeta Parra	0.193
		0.134			0.127

Tabla 6. Promedio de infiltración calculado a partir de los datos obtenidos en terreno. Al final de la tabla en celeste, se destaca el promedio total de infiltración para las coberturas de pasto y suelo desnudo en centímetros por minuto. Elaboración propia.

III. Vegetación decidua y vegetación siempre verde

Con base en el estudio realizado por Zabret & Sraj (2019), en que cual se mide el porcentaje de precipitación que interceptan especies de vegetación siempre verde y decidua en zonas urbanas, se asume que los árboles siempre verdes son capaces de captar un 47% del total de precipitaciones, mientras que los árboles deciduos captan un 23%. Con base en lo anterior, a este tipo de cobertura de suelos, se les asigno un valor de 0.47 y 0.23 respectivamente.

Finalmente, luego de asignarle el valor a cada tipo de cobertura de suelo modelada (Imagen 10), se utiliza la calculadora ráster en QGIS para multiplicarlo por el modelo de precipitación (Imagen 14), obteniendo así el modelo de precipitación remanente (Imagen 17).

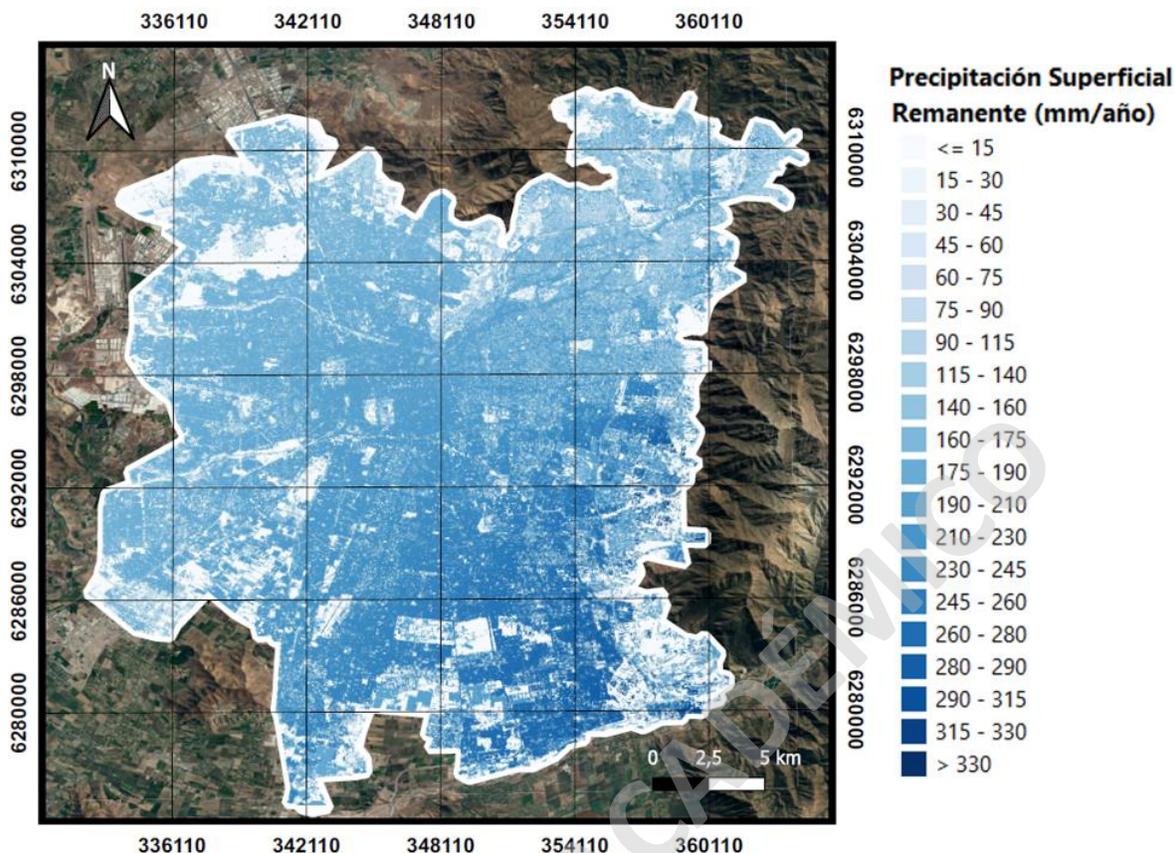


Imagen 117. Modelo de precipitación remanente. Los tonos más oscuros representan aquellas zonas con mayor probabilidad de acumular agua en la superficie. Elaboración propia.

6.5. Nivel socioeconómico (NSE)

Para medir el nivel socioeconómico (NSE) de la ciudad de Santiago, se utilizaron los datos de NSE calculados por Fernández y Wu (2018), a partir de la Base de Datos del Censo Oficial de Chile desarrollada por Norel *et al.* en 2013, con el objetivo de reflejar la vulnerabilidad de las personas, ya que no fue posible acceder a la base del Censo del 2017 a nivel de manzanas por restricciones legales. La base de datos de 2013 clasifica el NSE en cinco categorías basadas en el nivel educacional del miembro del hogar que sea designado como cabeza de familia y una lista de propiedades que posee el hogar. A este índice se le asignan valores numéricos continuos del 1 al 5, cuyos valores más altos correspondientes a un NSE más alto (Imagen 18). Los datos de NSE reflejan los recursos educativos y económicos que las personas tienen para hacer frente a diversas situaciones, entre ellas, problemas de índole ambiental.

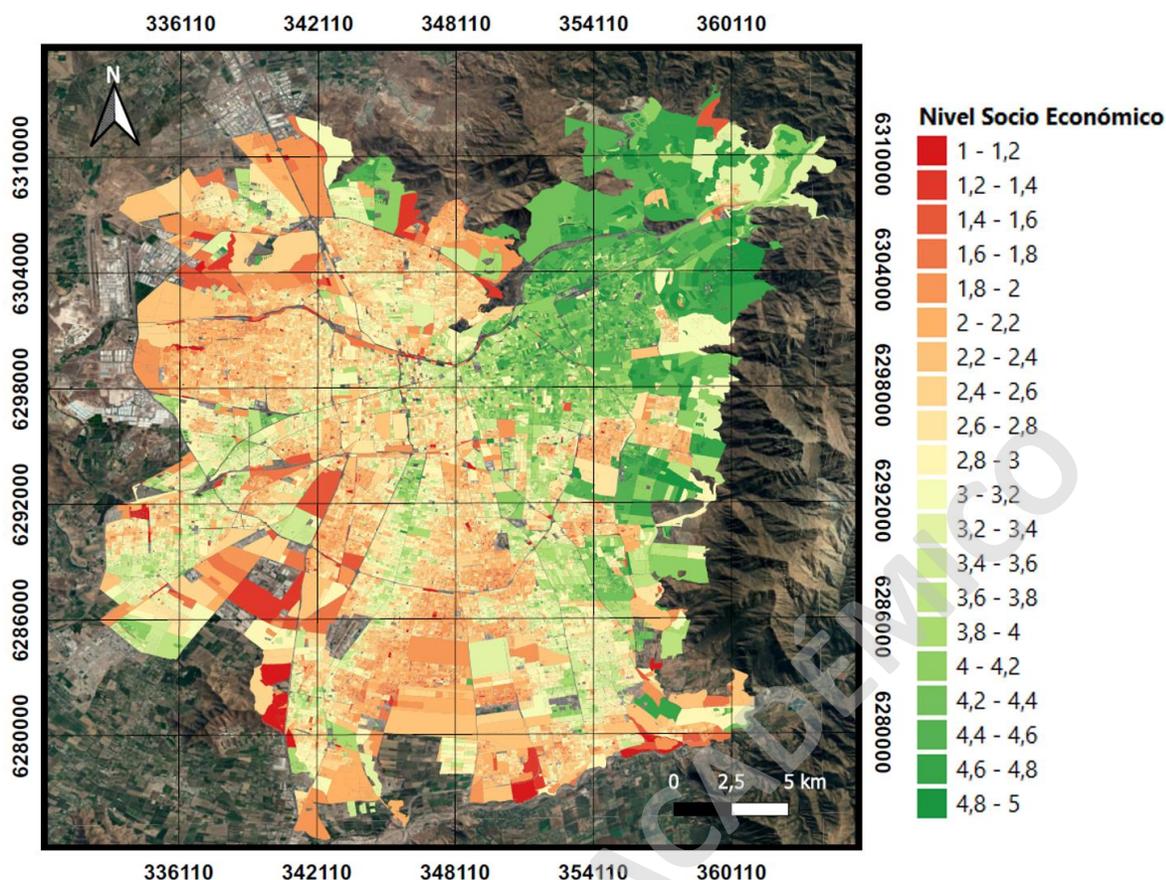


Imagen 18. Nivel socioeconómico del Gran Santiago a nivel de manzana. Elaboración propia a partir de la base de datos desarrollada por Norel et al. (2013).

7. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

7.1. Modelo de Precipitación

Con base en el modelo de precipitación creado (Imagen 14), es posible observar que las probabilidades de lluvias más altas se encuentran en el sector sureste de la ciudad, en comunas como La Florida y Puente Alto. Este resultado es contrario a la creencia de que llueve más en comunas como Lo Barnechea, Las Condes y Vitacura, dado que son las zonas de mayor altura (Imagen 8) y abundancia de vegetación (Imagen 10). Esto sugiere que, en Santiago, la cantidad de precipitaciones no sólo está influenciada por la altura o la vegetación, sino también por otros factores orográficos, como la topografía y su efecto sobre los vientos preponderantes.

7.2. Índice Relativo de Riesgo de Inundación (IRRI)

Para calcular cuál es el índice de inundación de la ciudad, es necesario integrar la información de las capas de índice topográfico con la de precipitación remanente. Para relacionar ambos archivos ráster, estos deben estandarizarse con valores de 0 a 1. Para lograrlo, se crean los siguientes índices:

I. Índice De Amenaza

Es la probabilidad de precipitación remanente (Imagen 17), es decir, equivale al porcentaje de lluvias que no es absorbida o interceptada, por lo que es agua que va directamente a formar escorrentía superficial. Para calcular este índice, es necesario transformar los valores a porcentaje mediante la siguiente fórmula:

$$IA = \left(\frac{PR - PR_{min}}{PR_{max} - PR_{min}} \right)$$

Donde:

IA= índice de amenaza

PR= Valor a transformar del modelo de precipitación remanente

PR_{min}= Valor mínimo del modelo de precipitación remanente

PR_{max}= Valor máximo del modelo de precipitación remanente

Una vez aplicada la ecuación a los datos del modelo de precipitación remanente, se obtiene el índice de amenaza de inundación (Imagen 19), cuyos valores van de 0 a 1. Los colores más oscuros equivalen a aquellas zonas que tienen una mayor probabilidad de que la lluvia forme parte de la escorrentía superficial.

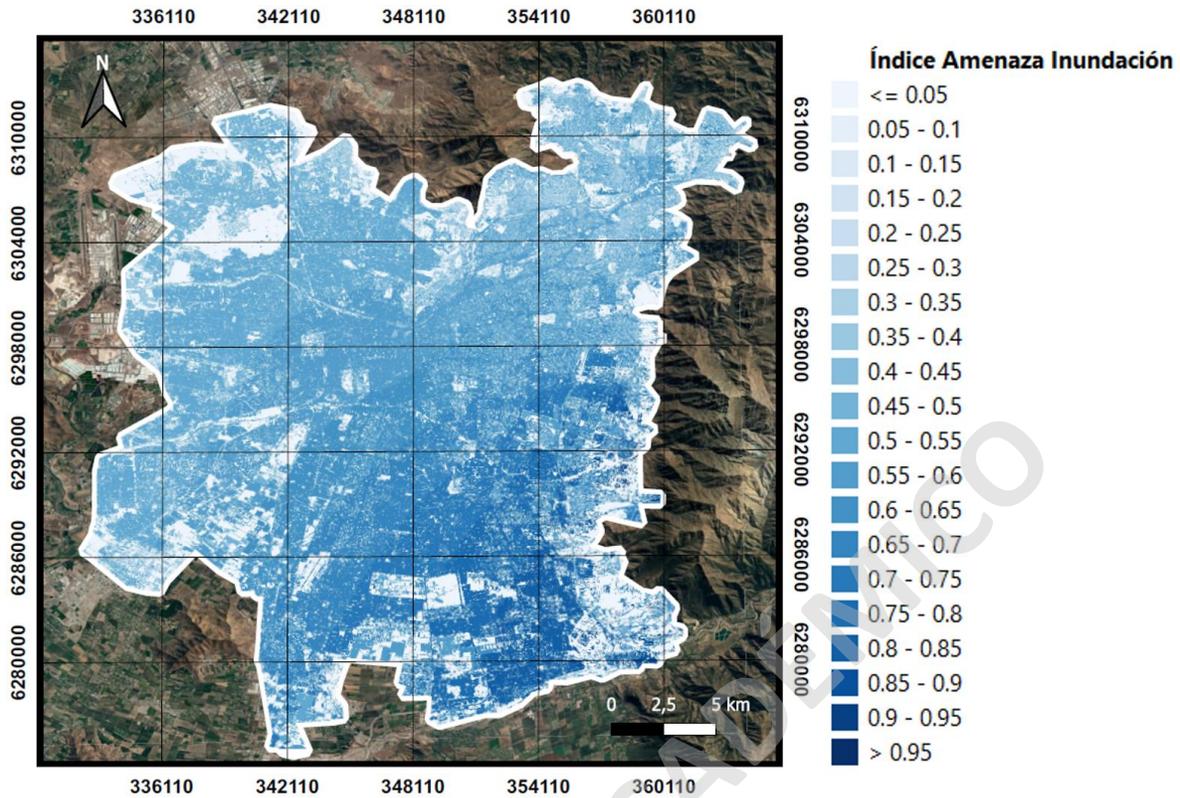


Imagen 12. Índice de amenaza. Los tonos más oscuros representan aquellas zonas con mayor probabilidad de acumular agua en la superficie. Elaboración propia.

II. Índice De Vulnerabilidad

Para obtener el índice de vulnerabilidad a inundaciones del área de estudio, se genera el índice de posición topográfica (IPT) usando la herramienta en QGis con el mismo nombre a partir del modelo digital de elevación. El IPT genera una capa con valores positivos y negativos, los que representan altos y bajos topográficos respectivamente. Para calcular el índice de vulnerabilidad, se aplica la siguiente ecuación:

$$IV = -1 - \left(\frac{IPT - [IPT_{min}]}{[IPT_{min}]} \right)$$

Donde:

IV= índice de vulnerabilidad

IPT= Valor a transformar del índice de posición topográfica

IPT_{min} = Valor mínimo del índice de posición topográfica

IPT_{max} = Valor máximo del índice de posición topográfica

En este índice, se consideran solo los valores negativos, ya que en los bajos topográficos es donde existe una mayor vulnerabilidad ante inundaciones. En la Imagen 20, vemos en colores más oscuros las zonas que representan bajos topográficos, las que en general están asociadas al pie de cerros.

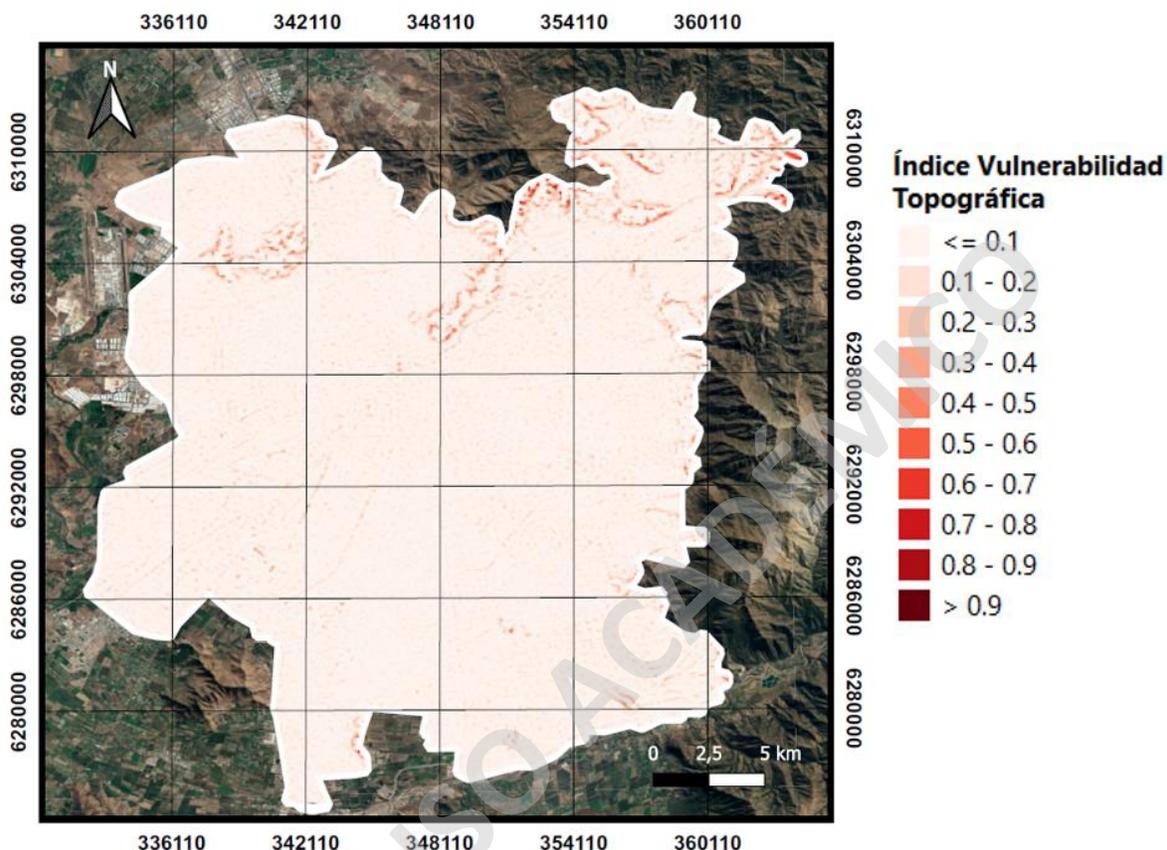


Imagen 13. Índice de vulnerabilidad. Las zonas más oscuras representan aquellos bajos topográficos con mayor probabilidad de acumular aguas lluvias. Elaboración propia.

Finalmente, se calcula la media geométrica entre ambos índices con el propósito de maximizar los valores de zonas con mayor amenaza y vulnerabilidad, para obtener el índice relativo de riesgo de inundación o IRRI (Imagen 21) que muestra aquellas zonas con mayor o menor probabilidad de riesgo a ser inundadas. El IRRI asume que al existir un bajo topográfico (superficie cóncava), existe una mayor vulnerabilidad a que se acumule agua remanente de las precipitaciones que ocurren en el entorno cercano. El análisis se llevó a cabo con una escala de 100 metros por pixel.

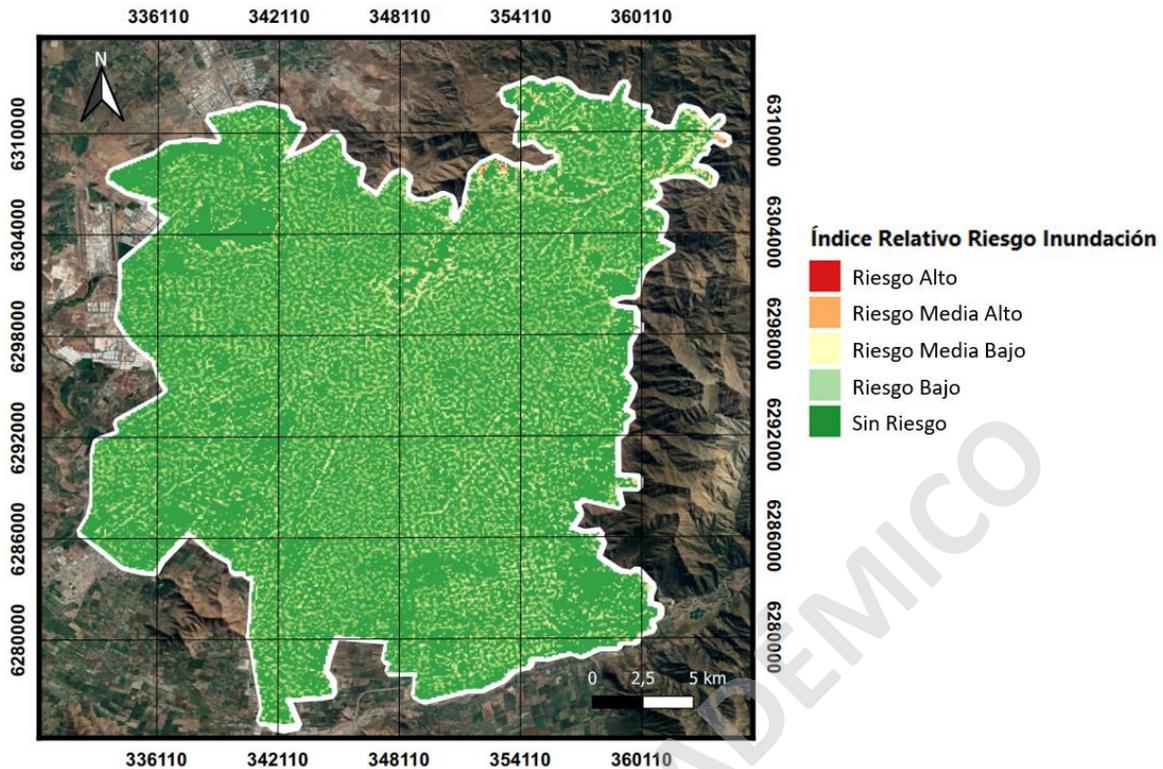


Imagen 14. Índice relativo de riesgo de inundación (IRRI). Elaboración propia.

7.3. Relación IRRI con el Nivel Socioeconómico

Para relacionar el índice de riesgo de inundación con el nivel socioeconómico de la ciudad, se genera una nueva columna en la capa con la base de datos del nivel socioeconómico calculada por Fernández y Wu (2018), utilizando la herramienta “estadística de zona” en QGis, y se calculó el valor promedio del IRRI en cada polígono de esta. Luego se eliminan todos los datos sin valores de IRRI y NSE de la base. Posteriormente, se utiliza el programa Geoda para evaluar la relación entre IRRI y NSE. La Imagen 22 muestra la correlación entre el IRRI (eje y) y el NSE (eje x). Con base en el gráfico de correlación, no es posible afirmar que existe una relación entre el riesgo de inundación IRRI y el nivel socioeconómico NSE de los habitantes de Santiago, ya que no existe una tendencia clara en el comportamiento de los datos, y estos se encuentran dispersos de manera homogénea. Esto se respalda con el bajo valor de R^2 , y el valor sobre 0.5 del p-value, que indican que no existe una tendencia clara en el comportamiento de los datos.

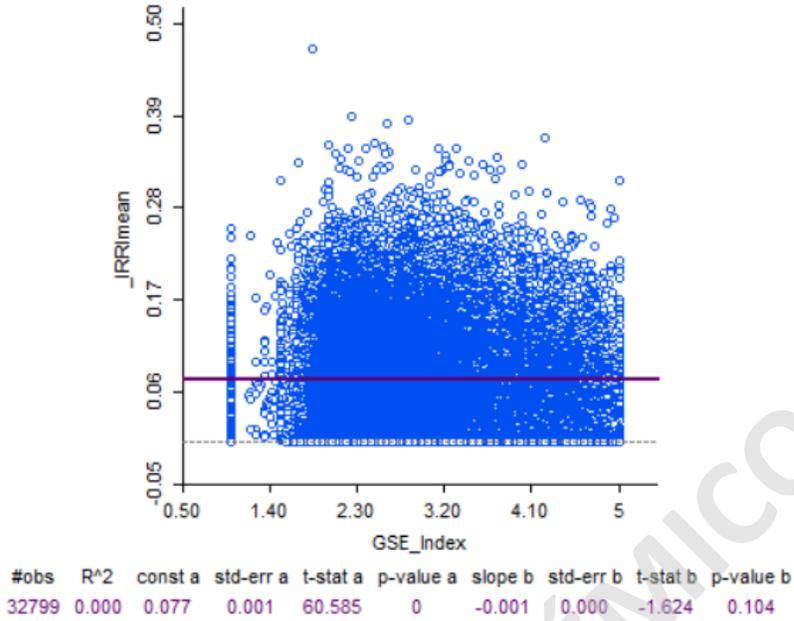


Imagen 15. Correlación IRRi vs NSE en el Gran Santiago. Elaboración propia.

Se realizó un análisis a menor escala, en el cual se sugiere que a nivel comunal si pudiese existir una relación. En la Imagen 23 se observa la comparación del gráfico de correlación entre el IRRi y NSE para los datos correspondientes a las comunas de San Bernardo (1537 observaciones) y Puente Alto (3004 observaciones). Los gráficos muestran comportamientos contrarios en ambas comunas, habiendo una relación directamente proporcional para el caso de San Bernardo (es decir, a medida que aumenta el IRRi también lo hace el nivel socioeconómico) e inversamente proporcional para Puente Alto (medida que aumenta el IRRi, el nivel socioeconómico es menor). En ambos casos, si bien los valores de la pendiente y R² son bajos, son estadísticamente significativos.

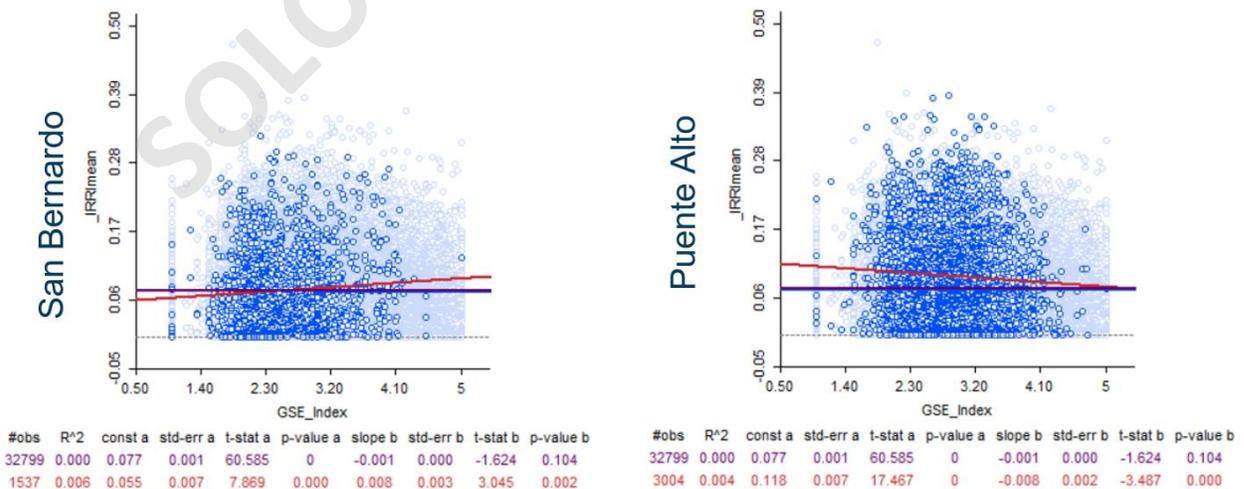


Imagen 16. Correlación IRRi vs NSE en San Bernardo y Puente Alto. Elaboración propia.

8. DISCUSIÓN

8.1. Influencia de las variables geológicas en el proceso de infiltración

Existe una relación entre el IRRI (Imagen 21) y la topografía de la ciudad (Imagen 8), ya que esta variable se relaciona directamente con el índice de vulnerabilidad (Imagen 20) que considera cavidades cóncavas como zonas vulnerables a inundarse, y estas se concentran en la falda de los cerros debido al cambio de pendiente abrupto. Por otra parte, utilizando la herramienta de proceso en Qgis “r.covar”, se comprobó que, aunque la topografía efectivamente condiciona el índice relativo de riesgo de inundación, la pendiente de la ciudad no posee una correlación con el IRRI, por lo que no es posible comprobar que al aumentar la pendiente la capacidad de infiltración es menor, según lo indicado en la Tabla 1.

En cuanto a la litología y la geología estructural del Gran Santiago, no se observa una relación entre estos factores con el IRRI a escala de ciudad, dado que las variables de infiltración del agua son en su mayoría de características mucho más superficiales del suelo. Tampoco durante el muestreo de terreno, ya que no se contaba con las herramientas ni permisos necesarios para realizar perforaciones a mayor profundidad que permitiera comprobar si efectivamente existe una similitud de la capacidad de infiltración de los suelos a nivel de roca madre.

8.2. Comparación de la capacidad de infiltración en coberturas tipo pasto y suelo desnudo

Sobre la base de los datos obtenidos del muestreo en terreno (Tabla 6), fue posible calcular el promedio de velocidad de infiltración en pasto y suelo desnudo en plazas y parques, no observándose mayores diferencias de velocidad de infiltración entre ambos tipos de cobertura.

Para respaldar este hecho, se realizó una prueba de T pareado en Excel, el cual se usa para analizar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos muestras diferentes. Como resultado, el valor de p para esta prueba fue de 0.79, respaldando que no hay una diferencia significativa entre el promedio de infiltración de ambas coberturas de suelos.

Lo señalado en los párrafos anteriores, se contradice con lo conocido teóricamente en cuanto a que la presencia de vegetación favorece la capacidad de infiltración en los suelos (Tabla 1). Esta anomalía puede explicarse dado los métodos de construcción de áreas verdes en Santiago. En el Manual Técnico de Construcción y Requisitos Mínimo para Parques, Plazas, Áreas Verdes y Áreas Deportivas desarrollado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2017), se indica que, dentro de las posibles actividades preliminares a la plantación de vegetación, tanto para árboles como pasto, están la excavación y nivelación del terreno. Ambas actividades es probable que reestructuren el suelo y generan partículas libres, que, al ser interceptadas por un flujo de agua, se mueven y reacomodan, obstruyendo posibles canales de infiltración naturales preexistentes (Angelone et al. 2006). Por

lo tanto, en la mayoría de los parques y plazas de Santiago habrá suelos transportados, limitando las características naturales que pueden presentar los suelos residuales. Junto con ello, el movimiento de maquinaria en la construcción de los parques y plazas puede generar una compactación del suelo, disminuyendo su capacidad de infiltración natural, pero siendo de todas maneras lo suficientemente apropiada para infiltrar casi en su totalidad las precipitaciones existentes dado el clima de la ciudad.

Otra explicación es que, dado que las áreas con vegetación son regadas constantemente para su mantención, el contenido de humedad en el suelo aumenta, deformándose y compactándose con menores presiones recibidas, y al ser puntos de recreación y reunión social, están frecuentemente expuesto a un alto tránsito de personas, lo que aumentaría su nivel de compactación. Este argumento explica porque en plazas el pasto tiene la misma capacidad de infiltración que la cobertura de suelo desnudo. Sin embargo, es importante recalcar que, a pesar de esto, ambos tipos de cobertura poseen la capacidad de absorber el agua que precipita en Santiago casi en su totalidad. Esto es posible evidenciarlo en épocas de lluvias intensas, ya que se observa en plazas o parques cómo se acumula el agua en forma de pozas de baja profundidad, tanto en pasto como en suelo desnudo, pero no se ha observado que se genere escorrentía en las mismas, solo en sectores pavimentados.

8.3. Relación del nivel socioeconómico con el índice relativo de riesgo de inundación

En el gráfico de correlación (Figura 22), los datos nos indican que no existe una relación entre ambos factores, por lo que no se puede explicar la inundación sencillamente con base en el nivel socioeconómico, si no que el problema es más complejo.

Esto podría estar relacionado con la forma en que está construida la ciudad, ya que, en el caso de San Bernardo, que es una comuna de menor nivel socioeconómico ubicada en zonas periféricas de la ciudad, existe mayor porcentaje de suelo desnudo, factor que en el presente estudio es considerado bueno para disminuir el riesgo de inundación solo considerando su capacidad de infiltración. Mientras que, en Puente Alto, las zonas precordilleranas que es donde habita gran parte de la población con mayor nivel socioeconómico de la comuna, también presentan un alto porcentaje de cobertura tipo pasto y suelo desnudo. Por lo tanto, a nivel de ciudad, no es posible respaldar la hipótesis de que existe una relación inversa entre el riesgo de inundación y el nivel socioeconómico.

Se observa que el comportamiento de la correlación entre IRRI y el NSE es variable entre las comunas, surge entonces la pregunta ¿por qué zonas más vulnerables suelen verse más afectadas?

8.4. Desigualdad Ambiental relacionada con la topografía

En el mapa de nivel socioeconómico (Imagen 18), se observa que en general las comunas menos vulnerables, corresponden a Las Condes, Vitacura y Providencia, mientras que aquellas comunas que presentan una vulnerabilidad media baja a alta son Lo Prado, Estación Central, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, Lo Espejo, La Cisterna, San Ramón, El Bosque, San Bernardo, Maipú.

De acuerdo con Roldan et al., (2020), existen 13 comunas en el área de estudio identificadas con mayores impactos, entre ellas: Lo Prado, Estación Central, Santiago, Cerrillos, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, Lo Espejo, La Cisterna, San Ramón, El Bosque, San Bernardo, La Florida y Maipú. A excepción de La Florida, todas estas comunas poseen en su mayoría una vulnerabilidad media a alta (según el mapa de clasificación por Nivel socioeconómico (Imagen 18)) y están ubicadas en el sector oeste de la ciudad, donde existe una mayor disminución de la topografía en la cuenca del Gran Santiago (Imagen 8). Con base en lo anterior, y respaldado por la propia autora, estas zonas tienden a tener una mayor concentración de aguas lluvias por la profundidad del sector oeste, pero, además, algunas presentan deficiencias puntuales en el Plan Maestro de Aguas Lluvias, relacionadas con la mantención, limpieza, distribución, estructura y el diseño de la Planificación urbana actual.

Con relación a ello, es importante mencionar que los resultados del IRRI no muestran una acumulación de riesgo de inundación por precipitaciones en estas comunas, por lo que es probable que parte importante de las inundaciones que ocurren en Santiago no se deban a problemas de infiltración, sino más bien a una inadecuada planificación urbana e incorrecto manejo de la infraestructura de aguas lluvias a nivel de la ciudad, lo que es respaldado por lo expuesto en el estudio de Roldan et al., (2020). En este estudio se evidencia que, dado el desnivel existente en la cuenca, las aguas que forman parte de la escorrentía superficial, migran y se acumulan en el sector oeste, donde se encuentran las comunas más vulnerables, y que en general, destinan menores recursos a temas de planificación y por lo mismo no presentan las infraestructuras necesarias para drenar el agua que queda en superficie.

Referente al párrafo anterior, en esta investigación podemos verificar que más allá de las características de los suelos del área urbana de Santiago, el factor que más afecta e influye en las inundaciones es la deficiente planificación territorial de la ciudad.

Una de las mayores dificultades al momento de realizar el presente proyecto, fue la falta de información sobre las características de los suelos de Santiago, en los registros de precipitación y la geología a escala de ciudad, por lo que es necesario realizar investigaciones que indaguen en estos temas para comprender de forma más profunda la dinámica de infiltración de nuestra ciudad y conocer cuáles son las ventajas naturales con las que contamos para hacer frente y disminuir

los posibles riesgos a los que la población está expuesta por distintos factores o peligros ambientales propios de nuestro entorno.

9. CONCLUSIÓN

I. No existe una diferencia significativa en la capacidad de infiltración en los suelos desnudos o con pasto, y los valores obtenidos en terreno nos indican que su capacidad de infiltración rara vez se verá superada por el aporte de agua de las precipitaciones dado el clima del Gran Santiago, por lo que las inundaciones están relacionadas principalmente con un diseño deficiente de la ciudad que causa que el flujo de escorrentía superficial no se infiltre localmente, sino que por el contrario, migre y se acumule en algunas zonas bajas de la ciudad.

II. Existe una desigualdad ambiental relacionada con la topografía, la cual genera un mayor riesgo de inundación en zonas de menores alturas, y se observa que estos sectores en su mayoría se componen por comunas de un menor nivel socioeconómico. A pesar de esto, la deficiente planificación urbana es un factor mucho más relevante y que aumenta significativamente el peligro de inundación en estas zonas, siendo este factor antrópico el que rige si ocurren inundaciones, más allá de las características naturales del área.

III. A escala del gran Santiago, no se observa una relación entre el riesgo de inundación y el nivel socioeconómico de la ciudad, pero si es posible identificar una relación cuando el análisis se realiza a nivel comunal, como el caso de San Bernardo y Puente Alto. Es necesario un estudio de mayor profundidad a nivel comunal, para conocer y entender con mayor detalle el comportamiento del riesgo de inundación en la ciudad, con el objetivo de desarrollar planes adecuados de apoyo según las necesidades de la población.

IV. Una forma de disminuir el riesgo de inundación urbana, es la incorporación en las normativas de construcción, sobre todos en los puntos más de arquitectura verde, tales como pavimentos permeables, techos verdes, jardines de lluvia, zanjas de infiltración, ciénagas cubiertas de hierba y *landscape water body*. Esto además podría ayudar a disminuir la desigualdad de áreas verdes en la ciudad.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, I. A., Chavez, J. A., Cuestas, I. E., Mejía, C. J., Landaverde, M., & Campos, S. (2020). Study on infiltration and its relationship with the geology of the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. *Revista Geológica de América Central*, (63), 40-57.

Alvarado Batres, César, & Barahona-Palomo, Marco. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23-33. Recuperado el 11 de Julio del 2021 desde

http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-42662017000100023&lng=en&tlng=es.

Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé, M. (2006). Geología y geotecnia: permeabilidad de suelos. Rosario: Universidad Nacional de Rosario. [http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad% 20en% 20Suelos. pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf).

Araneda C., M., Avendaño R., M. S., & Díaz Del Río, G. (2019). Modelo estructural de la cuenca de Santiago, Chile y su relación con la hidrogeología. *Revista Geofísica*, (62), 29-48. Recuperado a partir de <https://revistasipgh.org/index.php/regeofi/article/view/541>

Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The west Andean thrust, the San Ramón fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29, Ttect21371007. <https://doi.org/10.1029/2008TC002427>

Brüggen, J., 1950 Fundamentos de la geología de Chile, Instituto Geográfico Militar, 365 pp., Santiago.

Cabrera, Yesica. (2020). Identificación de fuentes de recarga al agua subterránea de los acuíferos de las subcuencas Arizpe, Río Bacanuchi y Banámichi, Sonora, México, con aplicación de isótopos estables (^{18}O y ^2H). 10.13140/RG.2.2.23100.18560

Carmona Jiménez, Javiera, & Jaimes Manosalva, Melisa. (2015). Desigualdad ambiental y desigualdad comunicacional: Las portadas de El Mercurio de Valparaíso sobre el derrame de petróleo en la bahía de Quintero. *Cuadernos.info*, (36), 71-87. <https://dx.doi.org/10.7764/cdi.36.734>

Charrier, R.; Baeza, O.; Elgueta, S.; Flynn, J.J.; Gans, P.; Kay, S.M.; Muñoz, N.; Wyss, A.R.; Zurita, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33-36° S). *Journal of South American Earth Sciences* 15 (1): 117-139.

Charrier, R.; Bustamante, M.; Comte, D.; Elgueta, S.; Flynn, J.J.; Iturra, N.; Muñoz, N.; Pardo, M.; Thiele, R.; Wyss, A.R. 2005. The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie Abhandlungen* 236 (1-2): 43-78.

Chavez, J. A., Landaverde, J., Lopez, R., y Tejnecký, V. (2016). Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. *SpringerPlus*, 5(1), 1-24. doi: 10.1186/s40064-016-2149-x

Chow T., Maidment D., Mays L., 1988. Libro: Applied Hydrologic. Singapur. McGraw-Hill Book Company

Clark I., Fritz P. 1954. Libro: Environmental Isotopes in Hydrogeology. Estados Unidos de América: CRC Press.

Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., Ramos, V., 1982. Tectonic and Magmatic Evolution of the Andes of Northern Argentina and Chile. *Earth-Science Reviews*, N° 18, p. 303-332.

Custodio, E. , Llamas, M. R. (Eds.), (1976). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega

Departamento de Gestión del Riesgo en Emergencias y Desastres del Ministerio de Salud (2022) Siglo XVI en Santiago: Años de intensas lluvias e inundaciones. Chile. <https://degreyd.minsal.cl/siglo-xvi-en-santiago-los-primeros-anos-de-intensas-lluvias-e-inundaciones/>

Dirección General De Aeronáutica Civil & Dirección Meteorológica De Chile. (2021). Reporte Anual De La Evolución Del Clima En Chile. p 24.

Fariás, M.; Charrier, R.; Carretier, S.; Martinod, J.; Comte, D., 2006 “Erosión versus tectónica en el origen de la Depresión Central de Chile Central”, XI Congreso Geológico Chileno, Acta I, pp. 205-208.

Fariás, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., & David, C. (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics*, 29, TC3006. <https://doi.org/10.1029/2009TC002480>

Fernández, I. C., & Wu, J. (2018). A GIS-based framework to identify priority areas for urban environmental inequity mitigation and its application in Santiago de Chile. *Applied geography*, 94, 213-222.

Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 3rd ed. New Jersey, USA: Macmillan College Publishing Comp.

Fock, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Doctorado (Unpublished), Departamento de Geología, Universidad de Chile: 235 p.

Fock, A., Charrier, R., Fariás, M., Makshev, V., Fanning, M., & Álvarez, P. (2005). Exhumation and uplift of the western Main Cordillera between 33° and 34°S. *Proceedings of International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG)*, 6, 273–276.

Fock, A.; Charrier, R.; Fariás, M.; Muñoz, M. 2006. Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°-34°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial* 6: 48-55.

Freeze A., Cherry J., 1979, Libro: Groundwater. New Jersey, Estados Unidos de América. Prentice-Hall, Inc.

Gana, P.; Wall, R.; Gutiérrez, A. 1996. Mapa geológico del área Valparaíso-Curacaví, Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 1: 20 p., 1 mapa 1:100.000. Santiago.

Gurovich, L. 1985. Fundamentos y diseño de sistema de riego. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (CIIA). Primera Edición, San José, Costa Rica. Capítulo 6. p. 143-168.

Horton R., 1933, The role of infiltration in the hydrologic cycle: Transactions, American Geophysical Union, 446-460

Jara, P.; Likerman, J.; Cristallini, E.; Ghiglione, M.; Pinto, L.; Charrier, R.; Jara, C. 2012. Analogue models of basins affected by differential deformation in extensional and compressional regimes. In Congreso Geológico Chileno, No. 13, Actas: 302-304. Antofagasta.

Jara, P.; Charrier, R. 2014. Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean Geology* 41 (1): 174-209. doi: 10.5027/andgeoV41n1-a07.

Kessler, J., & Oosterbaan, R. J. (1994). Determining Hydraulic Conductivity of Soils. *Drainages Principles and Applications*, v. 3. Publ. 16, International Institute for Land Reclamation and Improvement P. O. Box 45, Wageningen, The Netherlands, pp. 253-296.

Kim, S. (2011). Time series modeling of the spatial distribution of soil moisture in a mountainous hillslope headwater. *Geosciences Journal*, 15(4), 423-431. doi 10.1007/s12303-011-0034-8

Leyton, F., Pérez, A., Campos, J., Rauld, R., & Kausel, E. (2009). Anomalous seismicity in the lower crust of the Santiago Basin, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175(1-2), 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.03.016>

Leyton, Felipe & Sepúlveda, Sergio & Astroza, Maximiliano & Rebolledo, Sofia & González, L. & Ruiz, Sergio. (2010). Zonificación sísmica de la Cuenca de Santiago, Chile. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. 22-27.

Luc Ortlieb. 1994. Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. Santiago de Chile.

Mazaheri, M. R., & Mahmoodabadi, M. (2012). Study on infiltration rate based on primary particle size distribution data in arid and semiarid region soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(5), 1039-1046.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2017. Manual Técnico de Construcción y Requisitos Mínimo para Parques, Plazas, Áreas Verdes y Áreas Deportivas. Santiago de Chile.

Morán, P., "Notes on continuous stochastic phenomena", *Biometrika*, 37: 17-23, 1950

Mpodozis, C.; Ramos, V.A., 1989. The Andes of Chile and Argentina, In: Eriksen, G.E., Cañas, M.T. and Reintmund, J.A. (Editors). *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and energy resources; Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources, Earth Sciences Series, Houston, Texas, Vol. 11, pp 59-90.*

Norel, N., Truffello, R., Olivares, P., & Garretón, M. (2013). Estimación de número de hogares según gse en las principales ciudades de Chile y de la población flotante en el Gran Santiago. Santiago, Chile.

Peñaloza X., 2009, Determinación de los parámetros del modelo de infiltración de Horton a partir de una equivalencia funcional con el modelo de Green y AMPT. Morelos, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría, 150 p

Qi W, Ma C, Xu H et al (2021) A review on applications of urban food models in food mitigation strategies. Springer, Netherlands.

Rauld, R. 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile central (33° S). Ph.D. Thesis (Unpublished), Universidad de Chile: 265 p.

Riesner, M., Lacassin, R., Simoes, M., Armijo, R., Rauld, R., & Vargas, G. (2017). Kinematics of the active west Andean fold-and-thrust belt (Central Chile): Structure and long-term shortening rate. *Tectonics*, 36, 287–303. <https://doi.org/10.1002/2016TC004269>

Roldán, F., Gironás, J., Saldias, J., Ávalos, L., 2020. Mapa de Daño – Análisis Evento Hidrometeorológico del 29 de junio y 4 de julio 2020, Región Metropolitana, Chile. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile. Disponible en URL: <https://www.cigiden.cl/wp-content/uploads/2021/04/Panel-Roldan-Francisca-Evento-Hidromet-2020-01.png>

Sellés, D.; Gana, P. 2001. Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica 74: 30 p., escala 1:100.000. Santiago.

Servicio Nacional de Geología y Minería- SERNAGEOMIN, 2017. Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile. Segunda actualización. Disponible en URL: <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-NacionalDesastres-Naturales.pdf>

Sistema Integrado de Información Territorial, 2021. Clima y Vegetación Región Metropolitana de Santiago. Bcn.Cl. Recuperado 26 de mayo de 2022, de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>

Stern, C.R.; Amini, H.; Charrier, R.; Godoy, E.; Hervé, F.; Varela, J. 1984. Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastics flows which occur along the drainage valleys of the Río Maipo and Río Cachapoal (Chile) and the Río Yaucha and Río Papagayos (Argentina). *Revista Geológica de Chile* 23: 39-52. doi: 10.5027/andgeoV11n3-a03.

Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. (2017) Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.

Suárez Díaz, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Thiele, R., 1980 Carta geológica de Chile, Hoja Santiago, Instituto de Investigaciones Geológicas, núm. 39, 51 pp.

Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S., et al. (2014). Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, 42(12), 1083–1086. <https://doi.org/10.1130/G35741.1>

Vicuña Mackenna. 1877. Ensayo histórico sobre el clima de Chile. Santiago, Chile.

Wall, R.; Gana, P.; Gutiérrez, A. 1996. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 2: 20 p., 1 mapa 1:100.000. Santiago

Wall, R.; Sellés, D.; Gana, P. 1999. Area Tiltil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 11, 1 mapa 1:100.000, 1 anexo. Santiago.

Wenkai Li & Qinghua Guo (2010) A maximum entropy approach to one-class classification of remote sensing imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 31:8, 2227-2235. <https://doi.org/10.1080/01431161003702245>

Yáñez, G., Muñoz, M., Flores, V., Bosch, A. 2014. Depth to basement, solid geology and soil characterization in Santiago Basin, Chile: implications for hydrogeology, low enthalpy geothermal, geotechnical and geo-hazards. *Sometida a Andean Geology*, Julio 2014.

Yáñez, G., Perez-Estay, N., Araya-Vargas, J., Sanhueza, J., Imagenueoa, R., & Maringue, J., et al. (2020). Shallow anatomy of the San Ramón Fault (Chile) constrained by geophysical methods: Implications for its Role in the Andean

deformation. *Tectonics*, 39, e2020TC006294. <https://doi-org.bibliotecadigital.umayor.cl:2443/10.1029/2020TC006294>

Yrigoyen, C. C. (2003). Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales. In *Anales de economía aplicada 2003* (p. 204). Asociación Española de Economía Aplicada, ASEPELT.

Zabret, K., & Šraj, M. (2019). Rainfall interception by urban trees and their impact on potential surface runoff. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 47(8), 1800327.

SOLO USO ACADÉMICO