

Riesgo de origen hidrometeorológico en la ciudad de Santiago

Autores: Jorge Gironás^{5,2,3,4} y Jorge Sandoval¹
Revisor y Editor: Gonzalo Bacigalupe^{2,6}

1. Introducción

Las cuencas son complejos sistemas ambientales en que se desarrollan procesos geomorfológicos, hidrológicos, climáticos y ecológicos, que son impactados por la urbanización (Romero & Vásquez, 2005). A su vez, las ciudades al estar inmersas dentro de la cuenca, se ven afectadas por los procesos dinámicos que ocurren en ella existiendo una influencia recíproca entre ambas. De esta forma, las ciudades se ven expuestas a eventos hidrometeorológicos extremos que ocurren cada cierto tiempo en la cuenca producto de procesos naturales. Sumado a esto, nos encontramos con que muchas veces las ciudades no poseen un diseño adecuado para convivir con la ocurrencia de estos eventos, por lo que en muchas ocasiones el acaecimiento de un evento hidrometeorológico extremo genera resultados catastróficos en ellas.

Los efectos catastróficos que se pueden originar a partir de esta condición de riesgo hidrometeorológico son variados, sin embargo, debido a ciertas características definitorias primordiales y para efectos de análisis, hemos decidido clasificarlos en tres tipos: crecidas fluviales, aluviones y deslizamientos; crecidas pluviales e inundaciones urbanas; y finalmente, escasez hídrica y problemas de abastecimiento. Cabe destacar que en el caso de los dos primeros, su ocurrencia muchas veces se presenta de forma simultánea, puesto que se originan a partir de eventos de precipitación de magnitud inusual.

Por último, es muy importante mencionar que debido al cambio climático, las condiciones hidrometeorológicas normales, así como la ocurrencia de eventos extremos están sufriendo cambios importantes. Esto plantea un enorme desafío en el entendimiento de las características de estos eventos, así como en la planificación de ciudades cada vez mejor adaptadas a este nuevo escenario climático.

2. Crecidas fluviales, aluviones y deslizamientos

2.1. Introducción

Los ríos son un elemento fundamental en la estructura y dinámica de una cuenca hidrográfica. La geomorfología de su cauce y de las áreas aportantes está determinada por una serie de factores de diversos orígenes: geológicos, hidrológicos, climáticos y desde hace bastante tiempo, factores humanos.

⁵ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile

² Centro de Investigación de Desastres Naturales (CIGIDEN)

³ Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS)

⁴ Centro Interdisciplinario de Cambio Global

⁶ Universidad de Massachusetts Boston

Un cauce posee un nivel de agua con el que escurre la mayor parte del tiempo, sin embargo, cada cierto tiempo se producen eventos de crecidas que aumentan considerablemente el caudal transportado y la altura de agua del escurrimiento, lo cual provoca inundaciones fluviales. Estas crecidas aumentan el poder erosivo y la capacidad de arrastre del flujo, produciendo en muchos casos aluviones y remociones en masa de taludes. Esto genera enormes perjuicios en las ciudades y comunidades humanas ubicadas en cercanías de los cauces (Contreras, 2016).

En el caso de la ciudad de Santiago, ésta se encuentra en una zona semi-cerrada entre los ríos Mapocho y Maipo (Romero & Vásquez, 2005). Al oriente limita con la Cordillera de Los Andes, cordón montañoso de gran altura. La interacción entre ésta y el valle se produce a través del pie de monte mediante un conjunto de cauces fluviales, quebradas y conos sedimentarios. A través de estos cauces descienden los sedimentos provenientes de la cordillera y que naturalmente se depositan a lo largo del valle. La impermeabilización producida por la expansión urbana afecta directamente a la dinámica fluvial del río, convirtiéndose en una fuente de riesgo natural para las zonas cercanas a los cauces (Romero & Vásquez, 2005).

2.2. Pie de monte metropolitano

En la región metropolitana, el pie de monte corresponde a los faldeos precordilleranos adyacentes a la ciudad de Santiago comprendidos entre los ríos Maipo y Mapocho (Álvarez, 2008). Administrativamente se extiende a través de las comunas de Lo Barnechea, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto, ubicándose en su mayoría en la provincia de Santiago y en menor medida en la Provincia de Cordillera. Una representación de la distribución administrativa, así como de las principales quebradas del pie de monte metropolitano se puede apreciar en la Figura 1. Como se observa en la figura, las principales quebradas del pie de monte metropolitano son la Quebrada de Ramón y la Quebrada de Macul. Emplazadas en estas dos quebradas existen dos parques naturales administrados por la Asociación Parque Cordillera: El parque Aguas de Ramón, ubicado en el límite entre La Reina y las Condes y el Parque Quebrada de Macul, ubicado en la comuna de Peñalolén.



Figura 1: Imagen satelital de la zona precordillerana de Santiago. Las líneas naranjas señalan los límites de las comunas de la Región Metropolitana cercanas a la zona. (Google Earth, 2016).

A lo largo de su extensión, el pie de monte metropolitano presenta una topografía mayoritariamente compuesta por cerros, quebradas y cauces con altas pendientes (Álvarez, 2008) con elevaciones de entre 800 y 1500 m (Romero & Vásquez, 2005). Sin embargo, estas quebradas y cauces pueden recibir contribuciones desde elevaciones que superan los 3000 m. A través del pie de monte se produce un rápido descenso de la pendiente para conectar con el Valle Central, el cual es una zona de pendientes predominantemente bajas (Ebert et al, 2009)

Por su parte, la red hidrográfica en esta zona se caracteriza por poseer ríos y esteros de pendientes pronunciadas y con una alta carga de sedimentos provenientes de la cordillera. Estos sedimentos se depositan en distintas zonas del valle central aguas abajo debido a la disminución de la pendiente en esta zona y los distintos procesos fluviales a lo largo de los cauces (Ebert et al, 2009).

La urbanización en el pie de monte está regulada por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS). Este permite que la cota máxima de urbanización alcance los 1000 m de elevación para las comunas de Lo Barnechea y Las Condes y 900 m para las comunas de La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto (Álvarez, 2008). La distribución de la cubierta vegetal para la zona no urbanizada del pie de monte está compuesta mayoritariamente por matorrales (51%), estepa altoandina (23%) y matorral arborescente (21%). Por su parte, las zonas ocupadas por bosques alcanzan apenas un 1% y solo se presentan en zonas con

condiciones ambientales más propicias, como en fondos de quebradas o laderas bajas de exposición sur (Álvarez, 2008).

2.3. Antecedentes históricos

2.3.1. Evolución urbana

Santiago ha presentado un aumento sostenido de su superficie urbana en sus últimas décadas. Esta expansión se ha producido prácticamente en todas las direcciones, siendo particularmente importante el enorme aumento en la superficie destinada a áreas residenciales en el sector oriente de la capital. Otras zonas de la ciudad también han experimentado expansión urbana con otros propósitos, como es el caso del sector oeste y noroeste de la ciudad, el cual ha sido paulatinamente ocupado por zonas industriales (Ebert et al. 2009). En la Figura 2 se puede apreciar el proceso de expansión urbana de la ciudad de Santiago desde su fundación.

Las causas de la expansión urbana en Santiago son diversas, pero principalmente se deben a razones sociodemográficas, políticas y económicas (de Mattos et al. 2014; Ferrando, 2008). Un punto de inflexión en la historia de la planificación urbana en la capital lo marca la declaración de la Política Nacional de Desarrollo Urbano en 1979. En este documento, el suelo urbano fue declarado como un bien “no escaso”, por lo que se podía transar libremente a través de los mecanismos que el libre mercado ofrecía. Esto trajo como resultado una acelerada expansión de la ciudad sobre zonas rurales. Esta medida fue revocada por el propio gobierno en 1984, retomando la línea de la planificación urbana (Ferrando, 2008).

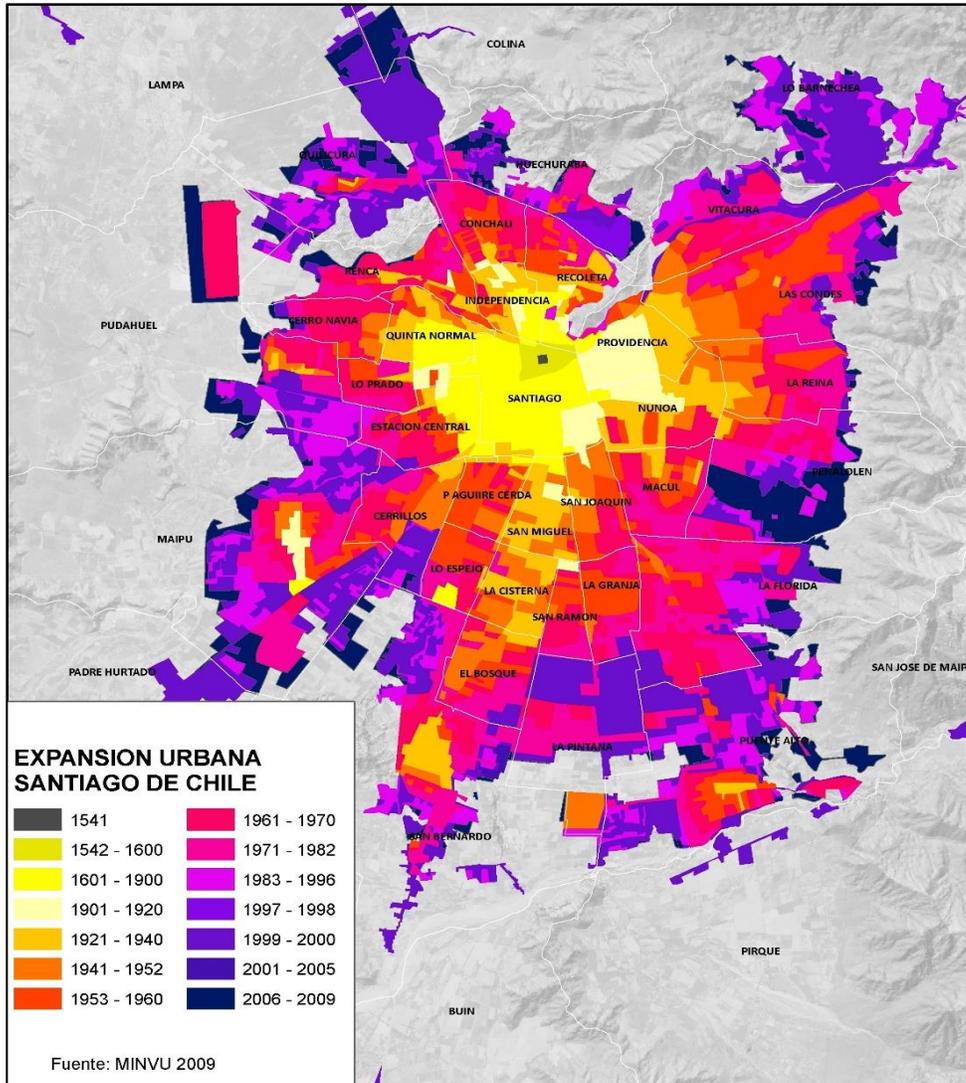


Figura 2: Expansión urbana en la ciudad de Santiago. Se observa como en las últimas décadas el sector precordillerano a recibido una creciente expansión urbana. Fuente: MINVU, 2009

Actualmente, la ciudad se sigue expandiendo hacia el sector oriente. El alcalde de Lo Barnechea, Felipe Guevara, señala en entrevista a La Segunda: “En Lo Barnechea hoy viven 106 mil personas y con las 1.100 hectáreas que aún tenemos disponibles en la comuna para construir viviendas, podemos llegar a 150 mil. La Reina y Vitacura ya no tienen terrenos precordilleranos y en Las Condes quedan sólo 80 hectáreas en la zona para construir” (La Segunda, 2016). Fenómenos muy similares están experimentando actualmente otras comunas donde el piedemonte es importante (Peñalolén, La Florida y Puente Alto). Así es como tanto actores políticos, sociales y académicos se encuentran involucrados en la discusión sobre el devenir de la expansión urbana en la capital.

2.3.2. Eventos importantes

Durante los últimos años, en Chile se han registrado eventos importantes y catástrofes causadas por aluviones y crecidas rápidas de ríos de la precordillera Andina. En particular, en Santiago este tipo de eventos también toma lugar cada cierto tiempo, destacando aquellos ocurridos en 1983, 1986, 1993, 2005, 2008 y 2016. Sin duda, dentro de estos eventos destaca el aluvión que tuvo lugar el 3 de mayo de 1993, ocasión en que un corto pero intenso temporal bajo condiciones especialmente cálidas, influenciadas por los efectos del Fenómeno del Niño, provocó el escurrimiento de grandes volúmenes de agua y barro principalmente en las cuencas de la Quebrada de Macul y Quebrada de Ramón. El evento, que dejó 23 víctimas fatales y 437 mil UF en pérdidas económicas (AC Ingenieros Consultores Ltda, 1996), motivó una serie de estudios (e.g. DICTUC, 1995; ONEMI, 1995; Garreaud & Ruttant, 1996; Naranjo & Varela, 1996; Vargas & Lara, 1997; Sepúlveda et al., 2006), y significó una alerta en lo referido al riesgo del sector oriente y de piedemonte de Santiago frente a este tipo de fenómenos.

El primer desborde registrado en Quebrada de Ramón en épocas recientes, a partir de 1980, fue en el 27 de junio de 1982, producto del efecto de El Niño (Desinventar, 2016). El segundo evento de inundaciones de calles e inmuebles se registró un año después, el 20 de junio de 1983 (Desinventar, 2016). Un tercer evento fue registrado el 15 de junio de 1986 (SERNAGEOMIN, 2015), periodo en el cual se registraron desbordes de los ríos Mapocho y Maipo, Canal San Carlos y de las Quebradas Macul y San Ramón; 18 comunas de Santiago fueron declaradas zonas de catástrofe por las inundaciones. El cuarto evento ocurrió el 3 de mayo de 1993 (SERNAGEOMIN, 2015), donde los registros muestran flujo de detritos aluvional desde las quebradas de Macul y San Ramón. El siguiente evento aluvional ocurrió el 27 de agosto de 2005, provocando flujo de detritos en las quebradas Lo Cañas, Macul y San Ramón e inundaciones en los cauces en la zona oriente de Santiago, y logrando gran cobertura mediática. El sexto evento fue una inundación ocurrida el día 22 de mayo de 2008, y fue cubierto por los medios de comunicación (EMOL, 2008). Un sistema frontal que afectó a gran parte de la zona central de Chile provocó inundaciones en calles y viviendas cercanas a las quebradas de la Precordillera el día 6 de septiembre de 2009 (División de Protección Civil, 2010). Finalmente, el día 17 de abril del año 2016 un fuerte sistema frontal trajo grandes lluvias a la zona central de Chile provocando el desborde y flujo de detritos en el Río Maipo. La canalización a la salida de la Quebrada San Ramón se observó totalmente llena y al límite del desborde.

2.4. Descripción de los riesgos: lugares vulnerables, niveles de exposición y efectos producidos por cambio climático

Debido a sus características topográficas, geomorfológicas y geológicas, así como a las condiciones hidrometeorológicas presentes en la zona, la precordillera de Santiago es un sector con una alta susceptibilidad a la ocurrencia de desastres naturales. A los riesgos expuestos en la descripción del pie de monte metropolitano y los eventos aluvionales y crecidas constatadas en la revisión de antecedentes históricos, se debe sumar el riesgo de desprendimientos en masa producto de eventos hidrometeorológicos y el hecho que en el

sector precordillerano se ubica la falla de San Ramón, la cual es una falla geológica activa (Rauld, 2002).

Esta condición de riesgo natural se ve exacerbada producto de: (1) el acelerado proceso de urbanización sin una planificación urbana adecuada, (2) el posible aumento de las denominadas lluvias cálidas con una elevada isoterma producto del cambio climático, (3) la todavía escasa red de monitoreo hidrometeorológico, así como un desconocimiento aún importante de los procesos meteorológicos y geomorfológicos en la compleja topografía de la precordillera y piedemonte andino. Estos aspectos, así como otros relacionados con la vulnerabilidad del territorio urbano frente a eventos de inundación y aluvión son abordados por una serie de estudios recientes (Hauser, 1985; Vargas, 1999; Jacoby, 2001; Calle, 2002; Rauld, 2002; Lara, 2007; AC Ingenieros Consultores Ltda, 2008; Sepúlveda & Padilla, 2008; Ebert. et al., 2010; Pérez, 2011; Rugiero & Wyndham, 2013).

Un aspecto particularmente importante a considerar es el efecto que tiene y seguirá teniendo el cambio climático en la hidrometeorología de la zona. Las proyecciones coinciden con las observaciones actuales: la disminución en los caudales y las precipitaciones y un aumento de las temperaturas anuales (Rubio-Álvarez & McPhee, 2010; Quintana & Aceituno, 2012; Fakvey & Garreaud, 2009, Bonelli et al., 2014). El alza de temperaturas puede tener efectos importantes en la ocurrencia de crecidas y aluviones, al tender a subir la cota de la isoterma 0°C. Esto significa un aumento del área aportante de la cuenca a la escorrentía pluvial en eventos de precipitación, particularmente en los meses de abril y mayo. Finalmente, otro de los efectos importantes del alza de temperatura se espera sea la mayor frecuencia en la ocurrencia de tormentas cálidas que, si bien no necesariamente generen inundaciones o aluviones con impacto directo en la ciudad, si pueden producir escurrimientos con altas concentraciones de sedimento. Esto se traduce en condiciones de alta turbidez en los cursos superficiales que son la fuente principal de agua potable, comprometiendo el abastecimiento de agua potable. Ejemplo de estos eventos son los que ocurrieron en febrero del 2013 y abril del 2016.

A continuación, se presenta una descripción más detallada de algunos sectores de la zona precordillerana que han sido estudiados debido a su alta vulnerabilidad y a la ocurrencia en el pasado de eventos extremos que han producido significativas pérdidas humanas y materiales. No se aborda las tormentas cálidas como eventos detonantes de problemas en el suministro de agua potable, tema se espera se aborde en un capítulo dedicado especialmente amenazas sobre el abastecimiento de agua potable urbano. Adicionalmente se recomienda el estudio de Bravo et al. (2014) dedicado a la determinación de posibles impactos del cambio climático en la gestión del abastecimiento de agua potable en la región metropolitana.

1. Quebrada de Ramón

La Quebrada de Ramón es una cuenca hidrográfica ubicada entre las comunas de Las Condes y La Reina en el sector oriente de Santiago. Esta quebrada es de especial interés debido a su cercanía con la ciudad y por encontrarse emplazada en un sector que ha presentado una acelerada expansión urbana. Recientemente la Dirección de Obras Hidráulica

del MOP ha estado trabajando en el diseño de obras de control aluvional y de crecidas en la Quebrada de Ramón, las que debiesen implementarse a un mediano plazo.

La Quebrada de Ramón se origina en el cordón del cerro San Ramón (Lara, 2007). Su área es de 38.5 km² y posee elevaciones entre los 800 y 3400 m (Sepúlveda et al. 2006). En su zona alta sobre los 2000 m hay pendientes fuertes del orden de los 20° a 30°. En su zona media, las elevaciones van entre los 1450 y 1650 m, con una pendiente media de 10°. A una elevación de 1200 m y con una pendiente promedio de 20°, se produce la confluencia con el estero Los Quillayes. Aguas abajo, la quebrada desciende con una pendiente promedio entre 5° y 10°. El cauce principal de la quebrada es conducido aguas abajo por un canal de concreto cuya sección más crítica está diseñada para llevar un caudal de aproximadamente 20 m³/s (Contreras, 2016). La Figura 3a muestra la cuenca hidrográfica en cuestión, mientras que en la Figura 3b se observa el detalle del sector a la salida de la cuenca, destacándose el Parque Aguas de Ramón, recinto administrado por la Asociación Parque Cordillera.

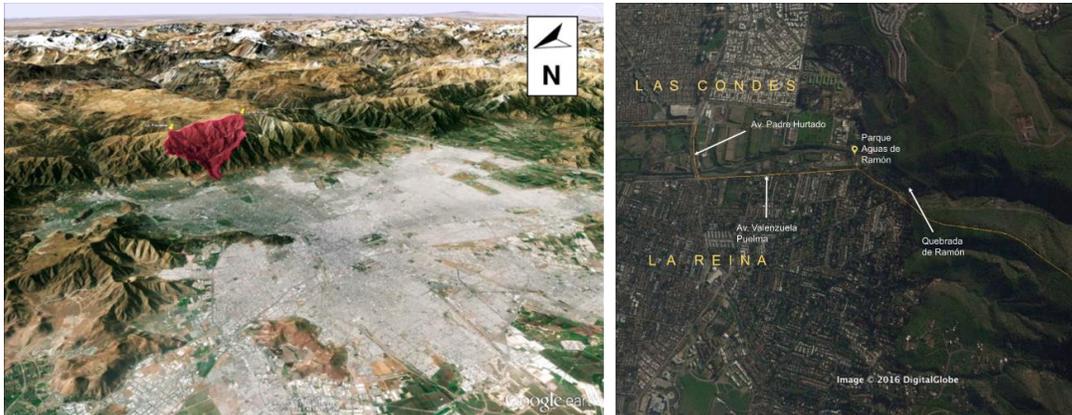


Figura 3:a) Imagen satelital de la zona precordillerana de Santiago. En rojo aparece destacada la cuenca de la Quebrada de Ramón (Contreras, 2016). Sector a la salida de la Quebrada de Ramón (Fuente: Google Earth).

El tamaño de la cuenca, combinado con su cobertura de suelo y las altas pendientes que presentan sus cauces, genera flujos hiperconcentrados de altas velocidades durante las crecidas. La concentración de sedimentos es determinante en el área inundada por la crecida, aumentando su magnitud con una mayor carga sedimentaria del flujo. Simulaciones numéricas desarrolladas por Contreras (2016) muestran esta situación, reportando diferencias en la profundidad del flujo de hasta 24.1% en el caso más crítico, comparando un flujo con un 20% de concentración de sedimentos versus un flujo sin sedimentos. También determinó que sobre el 20% las diferencias en la profundidad alcanzada por el flujo iban disminuyendo presentándose escenarios de inundación relativamente similares (Figura 4).

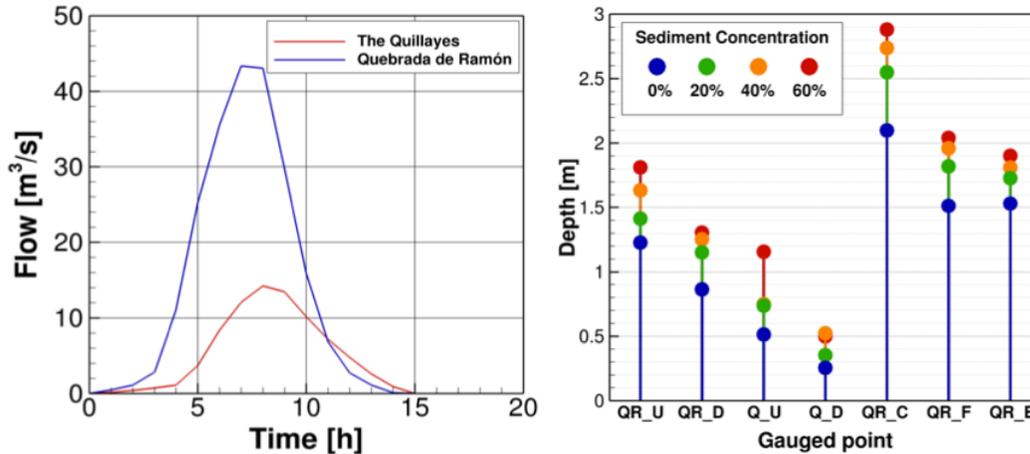


Figura 4: a) Hidrogramas de entrada para la simulación desarrollada. b) Profundidades en distintos puntos de control a lo largo de la Quebrada de Ramón, para distintos escenarios de concentración de sedimentos. (Contreras, 2016)

La ocurrencia de crecidas aluvionales es particularmente sensible a la elevación de la isoterma cero, en donde pequeñas variaciones en su posición producen cambios importantes en el área aportante durante un evento de precipitación. Su elevación oscila normalmente entre los 1500 y los 2000 m (Contreras, 2016).

Simulaciones con un modelo de lluvia-escorrentía realizadas por Ríos (2015), muestran que los caudales extremos para esta cuenca (i.e. mayores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ que significan el desborde del cauce principal), se producen generalmente con precipitaciones diarias mayores a 70 mm en presencia de una temperatura mínima entre 5°C y 10°C , y mayores a 60 mm si esta temperatura supera los 10°C . La posibilidad de una crecida extrema también es muy alta si llueven más de 120 mm en 3 días a la vez que la temperatura mínima supere los 5°C . Finalmente, una precipitación de más de 200 mm en 7 días también produciría las condiciones para que se genere una crecida extrema, aunque esta condición es muy poco frecuente (Ríos, 2015). Adicionalmente estas mismas simulaciones permiten estimar lo extremo de las condiciones de precipitación y temperatura mínima diaria para que se desborde el cauce principal. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 5, donde se identifica para cada caudal simulado la probabilidad de no excedencia de la temperatura mínima del día y la precipitación del día, y la acumulada de los 3 y 7 días anterior. Estas probabilidades tienen en cuenta el mes en que ocurre la crecida, de modo de reconocer por ejemplo que 30 mm de lluvia en verano es una magnitud menos probable y más extrema que si cayese en invierno. En general, las crecidas mayores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ son producidas por precipitaciones diarias muy extremas (i.e. mayores al percentil 0.95) y temperaturas mínimas mayores al percentil 0.60 del mes (Figura 5a). Situación similar ocurre si se considera la precipitación acumulada los días anteriores (Figura 5b y Figura 5c), aunque el percentil de precipitación es menos restringido, disminuyendo a 0.9 y a 0.8 con 3 y 7 días de precipitación acumulada, respectivamente. También se observa una reducción en el número de crecidas significativas asociadas a precipitaciones extremas con percentil mayor a 0.95 (i.e. 50, 45, 29 cuando se considera la precipitación del 1, 3 y 7 días, respectivamente). Por tanto, cuanto más dure la precipitación, menos extremo es el total precipitado necesario para generar una crecida peligrosa.

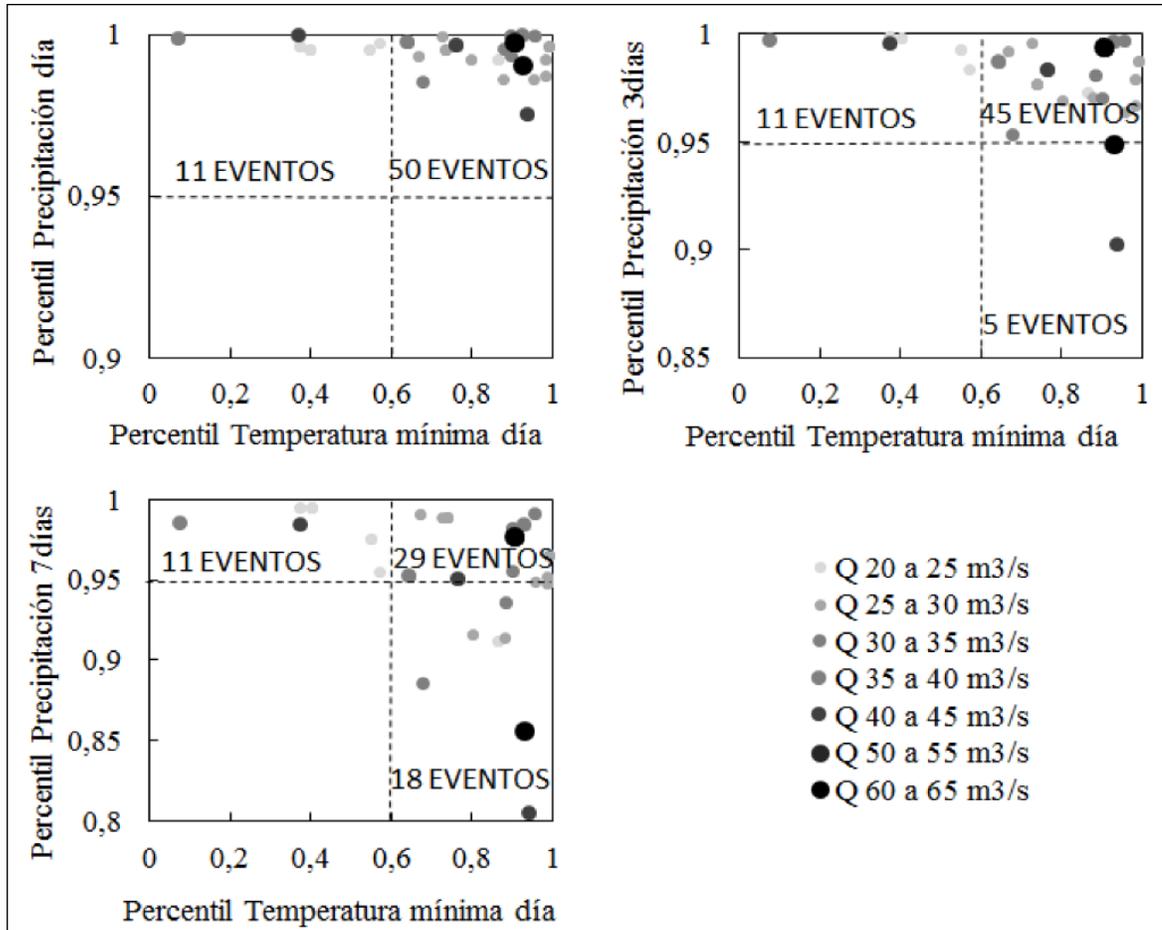


Figura 5: Caracterización de las crecidas mayores a 20 m³/s en función de los percentiles de precipitación y T_{min} del día definidos según el mes en que ocurre el evento. (Ríos, 2015)

2. Quebrada de Macul

La Quebrada de Macul se encuentra ubicada entre las comunas de Peñalolén y la Florida, constituyendo el límite entre ambas comunas. Estas comunas han presentado una acelerada expansión urbana en las cercanías del sector durante las últimas décadas. Su cuenca posee un área aproximada de 25 km² (Ministerio de Obras Públicas, 2004) y una elevación promedio de la isoterma 0°C de 2000 m, concentrándose un 50% de su área aportante bajo esta cota (Vargas, 1999). Además, como se muestra en la Figura 6, esta cuenca posee pronunciadas pendientes en su zona alta, con valores que varían entre los 25° y 30°, lo cual representa un riesgo para el sector ubicado a la salida de la quebrada ante eventos de precipitación importantes.

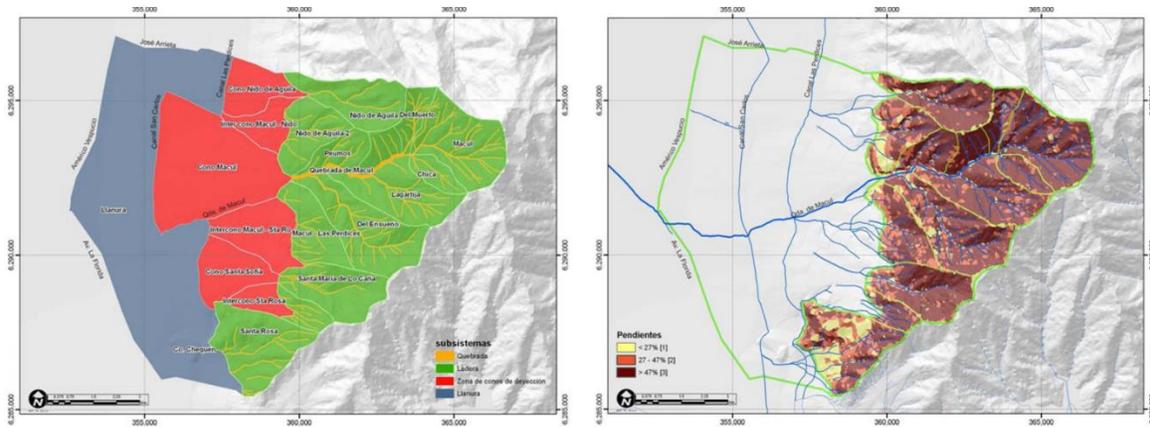


Figura 6: a) Ubicación de la Quebrada de Macul y otros elementos geográficos aledaños. b) Distribución de pendientes de la cuenca de la Quebrada de Macul y quebradas aledañas (Suárez, 2009)

Un evento particularmente catastrófico fue el registrado el 3 de mayo de 1993, cuando una intensa precipitación provocó un aluvión tanto en esta Quebrada como en la Quebrada de Ramón, el que dejó 26 personas fallecidas, 9 desaparecidos y 5000 damnificados (Garrido & Sepúlveda, 2012). Esta lluvia se produjo con una elevación de la isoterma 0° de 3000 m, lo que incrementó el área aportante a más del doble, alcanzándose un caudal que se estimó en aproximadamente 47.5 m³/s para la Quebrada de Macul (Vargas, 1999; Ministerio de Obras Públicas, 2004). Debido al gran impacto que generó este evento, en 1994 se construyeron 7 piscinas de decantación en la parte baja de la quebrada con el fin de contener posibles aluviones en caso de nuevos eventos de precipitación en el sector (Figura 7).



Figura 7: Piscinas decantadoras de la Quebrada de Macul. Fuente: www.emazed.com

3. Quebrada de Lo Cañas y quebradas de menor envergadura

La Quebrada Lo Caña se ubica en la comuna de La Florida, contigua por su lado sur a la Quebrada de Macul. Durante las últimas décadas ha sufrido 6 desbordes aluvionales de distinta magnitud. Luego del aluvión del 1993, se construyeron algunas piscinas de decantación pequeñas (Sepúlveda & Rebolledo, 2000).

En su zona alta, con elevaciones cercanas a los 1700 m, la pendiente media es de 36°, para disminuir a 20° promedio en su zona intermedia y finalizar en el valle con pendientes cercanas a los 5°. Su zona baja se encuentra contigua al Bosque el Panul, último bosque nativo de la ciudad de Santiago. El Panul ha estado en la contingencia noticiosa en los últimos años, debido a un proyecto inmobiliario que busca urbanizar parte del sector.

Otras quebradas importantes son la Quebrada Nido de Águilas en Peñalolén, Quebrada de Ñilhue en Lo Barnechea, entre otras. A pesar de que la ocurrencia de eventos catastróficos en éstas no ha alcanzado la magnitud de lo ocurrido en las quebradas de Ramón y Macul, estas zonas se están convirtiendo en lugares de riesgo debido a la expansión urbana y los cambios hidrometeorológicos producto del cambio climático.

2.5. Sistema de monitoreo y alerta temprana: el caso de la Quebrada de Ramón

En función de los antecedentes previamente descritos, y para abordar la nula experiencia con sistemas de alerta temprana de crecidas, CIGIDEN (Centro de Investigación de Desastres Naturales) inició el 2014, a escala piloto, la instalación de estaciones meteorológicas en la cuenca de la Quebrada de Ramón. Paralelamente se han desarrollado investigaciones conducentes a la construcción de un modelo hidrológico (Ríos, 2015) e hidráulico (Contreras, 2016) para la simulación continua y por eventos para la caracterización y pronóstico de crecidas, junto con un modelo de estabilidad de laderas (Cortés, 2016). A partir del 2016 este impulso inicial se ha fortalecido con un trabajo en conjunto con el Instituto Nacional de Hidráulica y el DICTUC de la Pontificia Universidad Católica, cuyo objetivo es implementar un sistema en línea de alerta temprana y seguimiento de crecidas. Este sistema conjugará los pronósticos meteorológicos, el modelamiento de procesos físicos y la información hidrometeorológica en tiempo real, para pronosticar al corto y mediano plazo las condiciones de escurrimiento y ocurrencia de inundaciones. Este proyecto ha significado la implementación de 3 estaciones fluviométricas en la Quebrada y casi una veintena de estaciones meteorológicas orientadas a caracterizar la distribución espaciotemporal de la precipitación, y la dinámica de la isoterma cero. Los resultados se encontrarán disponible durante la segunda mitad del 2017.

3. Crecidas pluviales e inundaciones urbanas

3.1. Introducción

Junto con los problemas de aluviones e inundaciones fluviales, la ciudad experimenta periódicamente otro tipo de situaciones conocidas como inundaciones pluviales. En este caso, no es un curso de agua cuya capacidad se sobrepasa el que produce los problemas a partir de un desborde, sino que más bien se inundan zonas bajas altamente impermeabilizadas con una escasa o nula cobertura de sistema de drenaje. Ejemplos de este tipo de situaciones son los anegamientos y la inundación de pasos bajo nivel.

En el caso de los problemas de carácter pluvial previamente descritos, claramente el origen de estos radica no sólo en la carencia de la infraestructura de drenaje, sino sobre todo en la mala planificación y gestión de la ciudad, así como en la preponderancia de un paradigma “sanitario” en la gestión de las aguas lluvias. Según éste, las aguas lluvias urbanas deben ser evacuadas rápidamente mediante colectores subterráneos, sin importar mucho lo que hay aguas abajo y el hecho que esta infraestructura se vuelve obsoleta al recibir cada vez más descargas no consideradas inicialmente. En este sentido es importante destacar el reciente Manual de Drenaje Urbano (Ministerio de Obras Públicas, 2013) documento técnico que propone una serie de políticas, diseños conceptuales y obras más sustentables para el control de escorrentía urbana, donde participaron algunos expertos que hoy forman parte de CIGIDEN.

3.2. Antecedentes históricos: paradigmas de drenaje urbano y planes maestros

El drenaje urbano data de inicios del siglo XX al ser necesario solucionar el problema sanitario de las aguas servidas escurriendo por acequias abiertas. De esa época destaca el sistema de alcantarillado y de recolección de aguas lluvias del centro de Santiago (Bertrand, 1908) construido en 1906. Posteriormente, y hasta la década del sesenta, se construyen en las distintas ciudades del país redes de colectores unitarios, calculados para evacuar conjuntamente las aguas servidas y escorrentía urbana de período de retorno importante. En las décadas de 1970, y particularmente 1980, las aguas lluvias son un problema secundario al de las aguas potable y servidas, asignándosele a las municipalidades en 1992 la gestión de éstas dada la falta de legislación al respecto.

La Ley N° 19,525 de Aguas Lluvias de 1997 declara al Estado responsable de la existencia de sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias en centros poblados. Cada uno de estos sistemas se separa en una red primaria y otra secundaria, gestionadas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) respectivamente. La Ley crea la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), encargada de elaborar Planes Maestros (PMs) de drenaje urbano y revisar las conexiones de la red secundaria a la primaria. Posteriormente en el 2000 se crea la Subdirección de Aguas Lluvias (actual División de Cauces y Drenaje Urbano) con objeto de asesorar en la confección de PMs, diseño, construcción, explotación y conservación de obras de drenaje de aguas lluvias, y la coordinación entre el MOP y el MINVU.

Los Planes Maestros ya elaborados, y otros en etapas de desarrollo, cubren ciudades de todo el territorio que albergan a casi el 90% de la población. Ellos se han transformado en una guía para la gestión de las aguas lluvias, principalmente desde la óptica de la red primaria. El Plan Maestro define las redes primaria y secundaria, y contiene estudios básicos de hidrología e hidráulica, y el análisis técnico y económico de distintas alternativas de gestión para la red primaria. Por su parte, el MINVU, a través de los Servicios de Vivienda y Urbanismo regionales, ha definido una serie de normativas para las redes secundarias, las que típicamente están asociadas a urbanizaciones. En particular, el MINVU ha propuesto guías de diseño para orientar a urbanizadores y constructores en el desarrollo y aplicación de obras de drenaje urbano (MINVU, 1996, MINVU, 2008)

Sin embargo, tanto los PMs en particular, como la gestión en general del drenaje urbano presentan ciertas falencias muy vinculadas a la generalizada inacción en el tema previo a la ley N°19,525 y al antiguo paradigma que consideran la escorrentía urbana como una molestia, residuo e incluso amenaza, y no como un potencial recurso a proteger. Algunas de estas falencias son: (1) una falta de visión integral donde la cuenca, y no la unidad administrativa, es la unidad territorial relevante, (2) la carencia de objetivos ambientales (i.e. preservación de cauces, control de la calidad del agua de cuerpos receptores), que dependen de la realidad de cada cuenca, (3) la nula o baja integración de distintas escalas espaciales (desde la escala domiciliaria hasta la regional) en el desarrollo de alternativas de gestión de escorrentía, ya que el foco de los PMs es la red primaria, (4) el escaso uso de técnicas y obras basadas en infiltración y almacenamiento, por sobre conducción, (5) la nula o baja vinculación con los Instrumentos de Planificación Territorial (IPTs) y (6) la orientación más bien “estructural”, siendo las medidas no estructurales y la gestión de zonas de inundación sólo abordadas parcialmente.

3.3. Identificación de zonas de riesgo

La Intendencia de Santiago identifica periódicamente los puntos críticos donde estos fenómenos se producen, los que en gran medida se repiten año a año. Por ejemplo, el 2016 se identificaron 36 de estos puntos críticos, de los cuales 12 corresponden a pasos bajo nivel y otros 12 a puntos de anegamiento. El resto corresponde a zonas contiguas a las quebradas y cursos de aguas de la precordillera ya identificados previamente. En la Figura 8 se muestra una infografía preparada por la ONEMI con estos puntos críticos. El análisis de estos puntos de anegamiento nos demuestra como otros elementos y servicios urbanos tienen un impacto en la gestión de las aguas lluvias. En particular, la mala planificación y diseño de infraestructura vial en este caso significa la existencia de obstáculos que afectan la escorrentía urbana. Así entonces, se hace fundamental integrar de mejor manera el planeamiento, diseño, construcción y gestión de los distintos sistemas urbanos y sus componentes, lo que trae consigo el desafío de coordinar las labores de distintas organizaciones estatales, municipales y civiles.



Figura 8: Puntos críticos determinados en el denominado "Plan de Invierno 2016", desarrollado en conjunto por la ONEMI, el Ministerio de Desarrollo Social, el MOP y el MINVU. Fuente: <http://www.latercera.com/noticia/intendencia-metropolitana-da-inicio-a-plan-in>

4. Escasez hídrica y problemas de abastecimiento

4.1. Introducción

Por último, se ha querido abordar los problemas de escasez hídrica y abastecimiento a los cuales se ha visto enfrentado el país y que en el futuro se podrían agudizar debido al cambio climático. Finalmente es importante considerar que la sequía como fenómeno natural es una amenaza física de desarrollo lento, silencioso y con muchos impactos asociados, particularmente en lo relacionado a la actividad agrícola y a otras actividades productivas.

Como se mencionó anteriormente, los estudios muestran una tendencia a la disminución en las precipitaciones y los caudales anuales, y un aumento de las temperaturas para los próximos años. Esto vuelve especialmente vulnerables a aquellas cuencas de régimen nival donde una importante cantidad de la precipitación anual cae en forma de nieve, la que se derrite durante la primavera y verano. Lo anterior ocurre debido a que disminuye la precipitación sólida en invierno provocando una menor acumulación de nieve y luego el derretimiento es más prematuro al comienzo de la primavera, lo cual genera una disminución en el caudal de los ríos, particularmente en verano (Bonelli et al., 2014). Santiago se encuentra emplazado en una cuenca de régimen nival y se ha logrado constatar las tendencias descritas las que se esperan se traduzcan en una mayor probabilidad de eventos de escasez futura debido al cambio climático (Vicuña & Meza, 2013)

4.2. Cambios en la hidrología local y proyecciones futuras

Como consecuencia del cambio climático, se espera que las cuencas ubicadas entre los paralelos 30° y 42° S (zona que va aproximadamente desde la región de Coquimbo hasta la región de Los Lagos) experimenten una disminución de caudales disponibles, así como un cambio en la temporalidad de dichos caudales (Vicuña & Meza, 2013). En el caso particular de la región Metropolitana, una serie de estudios (Meza et al., 2012; Meza, 2013; Bonelli et al., 2014) muestran que la condición de estrés hídrico producidas por el cambio climático podrían afectar la cobertura del suministro urbano y la demanda agrícola. Este último sector es el principal afectado, pues es el mayor usuario de agua en la actualidad, empleando el 78% de los recursos hídricos a nivel nacional (Vicuña & Meza, 2013). De la misma forma, estas condiciones de escasez hídrica pueden afectar a otros sectores productivos que se desarrollan en la cuenca, como la generación hidroeléctrica, minería, industria, entre otros.

5. Recomendaciones para políticas públicas e investigación

La evidencia es incontestable, el escenario hidrometeorológico actual y futuro para la cuenca de Santiago, define una serie de aspectos en los cuales es necesario trabajar de manera de avanzar hacia una ciudad resiliente y mejor preparada para la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos significativos. Los aspectos que se deben desarrollar no solo son de carácter estructural, sino que también abarcan dimensiones sociales y culturales, que permitan a las comunidades convivir de mejor manera en la ciudad y con el entorno natural asociado.

En esta última sección, se presentan algunas conclusiones y recomendaciones que se visualizan con el fin de guiar la toma de decisiones en la dirección adecuada, de manera de avanzar en transformar a Santiago en una ciudad mucho mejor preparada para enfrentar las amenazas de índole hidrometeorológico.

5.1. Recomendaciones de corto, mediano y largo plazo

En base a los antecedentes presentados, es posible estructurar algunas líneas de acción sobre las cuales definir las medidas necesarias para enfrentar los riesgos de origen

hidrometeorológico. Estas medidas pueden ser clasificadas en distintas categorías. En primera instancia, se podría distinguir aquellas que buscan **mitigar los efectos de eventos altamente catastróficos** y en el que la situación de vulnerabilidad actual se presenta de forma muy latente. De esta manera, se puede hablar de **medidas de alta, mediana y baja prioridad**. Por otro lado, podríamos clasificar las medidas según el horizonte de tiempo que representa su implementación eventual, definiendo así, medidas de **corto, mediano y largo plazo**. Finalmente, las medidas se pueden clasificar según la envergadura técnico-administrativa que su implementación conlleva. De este modo se podrían distinguir medidas que correspondientes a la implementación de un proyecto dado una planificación o estrategia inicial, otras que significan el diseño de planes, y, finalmente, pueden existir medidas que signifiquen abordar nichos no cubiertos o incluso adoptar nuevos paradigmas.

Debido a la vulnerabilidad en la que se encuentra el sector precordillerano de Santiago, la primera medida que se visualiza como altamente prioritaria y de corto plazo, es la **zonificación única de las zonas de inundación de cauces y quebradas** mediante la utilización de metodologías y criterios comunes, con una fuerte base física y información cuantitativa de apoyo. En particular se recomienda la identificación de la zona de inundación para la crecida de 100 años de periodo de retorno, considerándose que los flujos que se establecerían podrían eventualmente tener una concentración de sedimentos muy alta. Complementariamente, se vuelve necesario como medida de mediano plazo, **mejorar la caracterización del desempeño hidrológico del pie de monte y las potenciales modificaciones de estas zonas de inundación en el contexto del cambio climático**. La determinación de la zona inundable permite contar con un antecedente fundamental para la implementación de medidas de prevención de desastres, y una hoja de ruta en la planificación urbana actual y futura para el sector. La caracterización de las zonas inundables se debe **integrar a la planificación territorial, particularmente del pie de monte andino**. La planificación territorial es clave no sólo para alcanzar una mayor resiliencia frente a eventos hidrometeorológicos extremos, sino también para lograr un uso sustentable del recurso hídrico.

Ligado a lo anterior, se vuelve necesaria la pronta **construcción de obras de control aluvional en las principales quebradas** del sector precordillerano. Esto debido a la baja o incluso nula infraestructura, en algunos casos, que existe actualmente y a lo catastrófico que pueden resultar los eventos aluvionales sobre la población. En particular, se recomienda coordinar esfuerzos con la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP, quienes han desarrollado estudios y diseños preliminares de este tipo de obras en la Quebrada de Ramón. Sin embargo es muy importante tomar conciencia de que en paralelo a la implementación de medidas estructurales, **es urgente adoptar una serie de medidas no estructurales que apunten no a modificar las causas de un desastre hidrometeorológico, pero sí sus consecuencias**. Ejemplos de estas medidas son la planificación y protección de las zonas inundables, la educación de la población, y la preservación de la capacidad de almacenamiento e infiltración del pie de monte andino.

Otra medida no estructural relevante es la **implementación de sistemas de monitoreo y uso de información en línea para la declaración de alertas y gestión de amenazas**. En particular hay una falta de experiencia en el desarrollo y operación de sistemas que integren

nuevas tecnologías de pronóstico meteorológico, monitoreo en línea y herramientas de modelación basado en nuevo conocimiento científico, para anticipar la ocurrencia de los eventos de crecidas. Un sistema de monitoreo robusto, junto con el correspondiente protocolo de acciones claramente definido, permitiría reducir enormemente los impactos de una crecida, y, particularmente, gestionar su control y las actividades de emergencia y evacuación. Evidentemente hay problemas más estructurales relacionados con la mala planificación y ocupación del territorio que no pueden solucionarse con un sistema de monitoreo, pero una situación como la vivida en abril del 2016 con el río Mapocho hubiese sido evitada, o al menos, mucho mejor manejada.

En relación al problema de gestión de aguas lluvias, se torna imprescindible **actualizar el actual Plan Maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias del Gran Santiago**, elaborado el 2001, de modo de incorporar los antecedentes, información e infraestructura que han aparecido en los últimos 15 años. Esta actualización permitiría mejorar la concepción de sistemas y obras para mitigar las inundaciones pluviales, particularmente en lo referido a la integración de técnicas de infiltración y almacenamiento, implementadas a distintas escalas espaciales. Además, es necesario abordar otros efectos negativos de la escorrentía urbana relacionada con la calidad del agua e integridad ecológica de los cursos receptores. Estas problemáticas no son conocidas por la población y tampoco han sido abordadas en el país, dado que el foco de la gestión de las aguas lluvias ha estado puesto en las inundaciones urbanas.

Por último, y como medida de largo plazo, se vuelve necesario **generar planes de restauración de cauces urbanos**, de manera de devolverles parte de sus características hidrogeomorfológicas y asegurar su auto-mantenimiento en el tiempo. De esta manera, se pueden incorporar los cauces de una forma mucho más integral a la ciudad y su entorno.

5.2. Necesidades de Investigación

La gestión integral del riesgo hidrometeorológico en la Región Metropolitana impone una serie de desafíos de investigación, los que deben ser abordados, en forma íntegra, por el mundo académico, público, privado y la sociedad civil. En general, la temática es compleja y significa un esfuerzo multidisciplinar, que abarca desde las ciencias básicas y de la tierra hasta las ciencias sociales. Esta integración multidisciplinaria es la que permitirá generar el conocimiento necesario para afectar positivamente nuestro entendimiento y actuar en las distintas etapas del ciclo del desastre, particularmente, en lo que se refiere a la mitigación y fortalecimiento de la resiliencia. Algunas de las necesidades de investigación que se vislumbran incluyen:

1. **Caracterización de los procesos físicos en el pie de monte andino:** Existe poca información detallada y resolución espaciotemporal fina para caracterizar los fenómenos físicos, e interacciones entre ellos, que se conjugan durante un evento hidrometeorológico importante. La información levantada permite la construcción y calibración de modelos, la construcción de sistemas de alerta temprana, etc.

2. **Desarrollo de métodos para la explotación y uso de datos:** Abordar la primera necesidad de investigación acá presentada significara el uso de metodologías de explotación de mucha información recopilada (i.e. data mining). Parte de la investigación tendrá que estar dirigida entonces a identificar usos de estos datos y desarrollar las correspondientes metodologías. Esto permitirá construir modelos de gestión y toma de decisión frente a eventos naturales más robustos y precisos. Para ello se deben considerar las necesidades de los distintos estamentos institucionales, comunidades y personas, especialmente aquellos localizados en la zona a pie de monte del Área Metropolitana, particularmente relevante será definir que tipo de información en tiempo real e histórico necesita estar disponible así como los mecanismos para hacerlo posible.
3. **Modelamiento y pronóstico meteorológico en cuencas cordilleranas y precordilleranas:** El desafío es avanzar en el estado de arte del modelamiento meteorológico en zonas de relieve complejo, donde tradicionalmente los modelos presentan problemas dada la relevancia de lo local y la variabilidad espacial del territorio. Las mejoras en este aspecto permitirán particularmente la construcción de sistemas de alerta temprana y gestión de desastres más robustos.
4. **Comprensión de los efectos del cambio climático y desarrollo de las correspondientes medidas de adaptación:** Existe un consenso bastante claro sobre los impactos del cambio climático en las temperaturas y precipitaciones medias (anuales) en Chile central. Sin embargo, los fenómenos de inundaciones, aludes y deslizamientos, así como los diseños para su control, tienen más que ver con escalas temporales mucho más finas (horarias, e incluso sub-horarias). No hay claridad en cómo será el comportamiento de la precipitación y temperatura a estas escalas, y por lo tanto, tampoco es evidente cómo incorporar el cambio climático en los diseños ingenieriles. Se hace necesario entonces investigación orientada a mejorar nuestras estimaciones del comportamiento futuro de las variables meteorológicas, y generar metodologías de diseño que se hagan cargo de condiciones de diseño muy inciertas.
5. **Metodologías de evaluación socioeconómicas y ambientales:**
Las decisiones de inversión están claramente ligadas a una evaluación socio-económica de los costos y beneficios asociados. Estas evaluaciones típicamente consideran los beneficios como el valor esperado del daño evitado, y por lo tanto, están orientadas a la valoración económica de estos daños en función de problemas ya existentes. Sin embargo, las decisiones de inversión futura orientadas a proveer mayor resiliencia tendrán que reconocer como beneficio la reducción de daños que podrían presentarse en el futuro, pero que son muy inciertos dada los cambios globales que se esperan (cambio climático, de usos de suelo, socioeconómicos). Por lo tanto surgen preguntas de difícil respuestas donde la investigación se hace esencial, como son: ¿Cómo y cuándo adaptarnos en un contexto futuro incierto? ¿Cuáles son las medidas o inversiones que se deben implementar dada esta incertidumbre sobre el futuro? ¿Qué está dispuesto a hacer la sociedad frente a esta incertidumbre, dada otras múltiples necesidades que está tiene (e.g., salud, educación, seguridad, etc.)? ¿Cuál es

la mejor estimación del retorno real de una medida no estructural para enfrentar problemas futuros en un contexto incierto?

Referencias

- AC Ingenieros Consultores Ltda. (1996). *Análisis de la vulnerabilidad del sector oriente de la ciudad de Santiago ante la ocurrencia de aluviones y crecidas Región Metropolitana*. Estudio de Ingeniería para el Ministerio de Obras Públicas.
- AC Ingenieros Consultores Ltda. (2008). Estudio de diagnóstico de cauces naturales, sector Pieandino Región Metropolitana. *Estudio de Ingeniería para el Ministerio de Obras Públicas*.
- Álvarez, S. (2008). Caracterización florística y proposición de una tipología de la vegetación para la pre-cordillera andina de Santiago. *Memoria de Título*. Santiago, Chile.
- Bonelli, S., Vicuña, S., Meza, F. J., Giroñas, J., & Barton, J. (2014). Incorporating climate change adaption strategies in urban water supply planning: the case of central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, 5(3), 357 - 375.
- Bravo, M., Flores, R., Galindo, R., Garreaud, R., Muñoz, E., Serey, A., & Viale, M. (2014). Análisis de los fenómenos meteorológicos y climáticos que afectan la cuenca del río Maipo. *Aquae Papers*, 5, 1-68.
- Calle, G. (2002). Modelo hidrológico espacialmente distribuido basado en sistemas de información geográfica. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, PUC*.
- Comisión Nacional para la Resiliencia frente a Desastres de origen Natural, CREDEN. (2016). *Hacia un Chile Resiliente frente a Desastres: una oportunidad. Estrategia Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación para un Chile resiliente frente a desastres de origen natural*.
- Contreras, M. T. (2016). Modeling of flash floods in the Andean foothills: reducing the uncertainty associated with the sediment concentration. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- CREDEN. (2016). *Hacia un Chile Resiliente frente a Desastres: una oportunidad*.
- de Mattos, C., Fuentes, L., & Link, F. (2014). ARTÍCULOS Tendencias recientes del crecimiento metropolitano en Santiago de Chile. ¿Hacia una nueva geografía urbana? . *Revista INVI*.
- De Mattos, C., Fuentes, L., & Link, F. (2014). Tendencias recientes del crecimiento metropolitano en Santiago de Chile. ¿Hacia una nueva geografía urbana?. *Revista INVI*, 298(81), 193-219.
- Desinventar. (2016). *Inventory system of the effects of disasters*. Recuperado el 20 de Junio de 2016, de <http://www.desinventar.org/>
- DICTUC. (1995). *Riesgo de fenómenos de remoción en masa en la Quebrada de Ramón*. Pontificia Universidad Católica de Chile. preparado para la Ilustre Municipalidad de Las Condes.

- División de Protección Civil. (2010). *Informe consolidado Sistema frontal de 6 de septiembre de 2009 Región Metropolitana*. Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI), Santiago de Chile.
- Ebert, A., Banzhaf, E., & McPhee, J. (2009). The influence of urban expansion on the flood hazard in Santiago de Chile: A modeling approach using remote sensing data. *Urban Remote Sensing Joint Event*. IEEE.
- Ebert, A., Welz, J., Heinrichs, D., Krellenberg, K., & Hansjürgens, B. (2010). Socio-Environmental change and flood risks: The case of Santiago de Chile. *Erdkunde*, 64(4), 303 - 313.
- El Mercurio Online (EMOL). (22 de Mayo de 2008). *Se desbordó el Canal San Ramón en La Reina*. Obtenido de <http://www.emol.com/>
- Fakvey, M., & Garreaud, R. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research*, 114.
- Ferrando, F. (2008). Santiago de Chile: antecedentes demográficos, expansión urbana y conflictos. *Revista de Urbanismo, N°18, Santiago de Chile, publicación electrónica editada por el Departamento de Urbanismo, F.A.U. de la Universidad de Chile*.
- Garreaud, R., & Rutllant, J. (1996). Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmósfera*, 9, 251 - 271.
- Garrido, N., & Sepúlveda, S. (2012). Peligro de flujos de detritos en Quebrada de Macul, Región Metropolitana y propuestas de medidas de mitigación. *SERNAGEOMIN*.
- Hauser, A. (1985). Flujos de Barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica de Chile*, 24, 75 -92.
- Jacoby, D. (2001). Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordos de la Quebrada San Ramón. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, FCFM, Universidad de Chile*.
- La Segunda. (2016). La Segunda online. *Santiago se come su cordillera: Se multiplican los condominios en las alturas* .
- La Tercera. (2011). La nueva urbanización de Santiago que fija el Plan Regulador Metropolitano.
- Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología, Universidad de Chile*. Santiago, Chile.
- Meza, F. (2013). Recent trends and ENSO influences on droughts in Northern Chile: An application of the Standard Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*, 1, 51 - 58.
- Meza, F., Wilks, D., Gurovich, L., & Bambach, N. (2012). Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo basin, Chile: Reliability of water rights and changes in the demand for irrigation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 421 - 430.
- Ministerio de Obras Públicas. (2004). Informe Consolidado de la Evaluación de Impacto Ambiental de la Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto "Obras para el Control de Aluviones y Arrastre de Sedimentos en Quebrada de Macul, Región Metropolitana".
- Ministerio de Obras Públicas. (2013). *Manual de Drenaje Urbano*.

- MINVU. (1996). *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de Diseño.*
- MINVU. (2008). *Guía de Diseño y Especificaciones de Elementos Urbanos de Infraestructura de Aguas Lluvias.*
- Naranjo, J., & Varela, J. (1996). *Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de Mayo de 1993.* Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47, 42p.
- ONEMI. (1995). *Serie de estudio de caso. Aluvión de La Florida ocurrido el 3 de Mayo de 1993.* Ministerio del Interior, Oficina Nacional de Emergencias.
- Pérez, J. (2011). Riesgo de inundación producto del cambio climático. Caso de estudio: Quebrada San Ramón. *Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.*
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30 - 43°S. *Atmósfera*, 25(1), 1-22.
- Rauld, R. A. (2002). Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul. *Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile.* Chile.
- Ríos, V. (2015). Uso de un modelo lluvia escorrentía para la caracterización de crecidas rápidas en la precordillera andina el caso de la Quebrada Ramón. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.*
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Revista Eure*, 31(94), 97-117.
- Rubio-Álvarez, E., & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resources Research*, 46, 5.
- Rugiero, V., & Wyndham, K. (2013). Identificación de capacidades para la reducción de riesgo de desastre: enfoque territorial de la participación ciudadana en la precordillera de la comuna de La Florida, Santiago de Chile. *Investigaciones Geográficas*, 46, 57.
- Sepúlveda, S., & Padilla, C. (2008). Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural Hazards*, 47(2), 201 - 215.
- Sepúlveda, S., & Rebolledo, S. (2000). Evaluación del peligro de flujos de detritos en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. *IX Congreso Geológico Chileno.*
- Sepúlveda, S., Rebolledo, S., & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*(158(1)), 83 -95.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2015). *Catastro de los principales desastres naturales por peligros geológicos en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados entre 1980 y 2015.* Ministerio de Minería, Gobierno de Chile.
- Suárez, M. (2009). Propuesta de Ordenamiento Territorial ambientalmente sustentable para la cuenca de Macul Santiago, Chile.
- Vargas, X. (1999). Corrientes de detritos en la Quebrada de Macul, Chile. Estudio de caudales máximos. *Ingeniería del Agua*, 6(4), 341 - 344.

- Vargas, X., & Lara, P. (1997). Debris flow events at mountainous creeks near Santiago, Chile: Hydrologic analysis. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Interns Assoc. Hydrological Sciences 239*, (págs. 279-284).
- Vicuña, S., & Meza, F. (2013). Cambio climático. En *Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático*.
(Cortés, 2016)