CAPÍTULO 3 / Sección 1

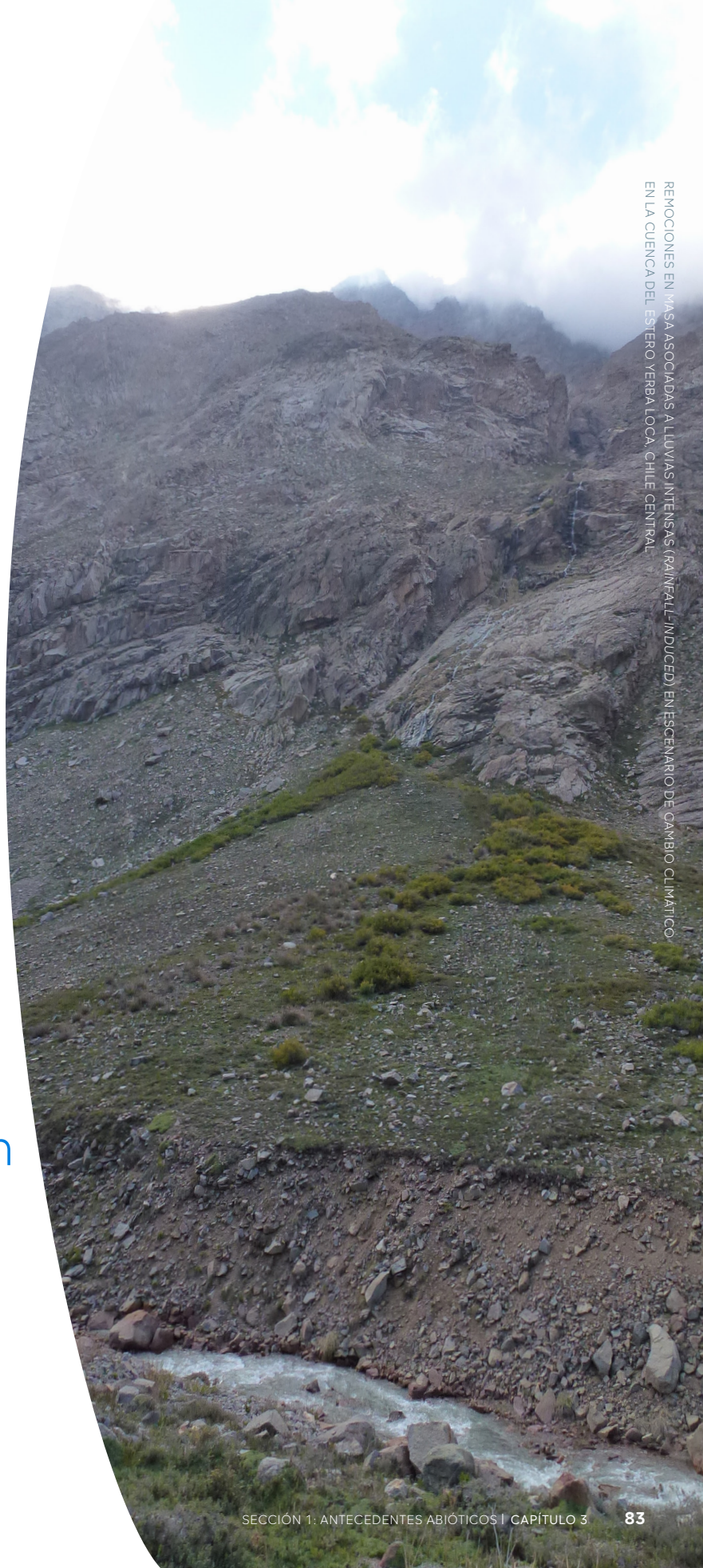
Remociones en masa asociadas a lluvias intensas (*rainfall-induced*) en escenarios de cambio climático en la cuenca del estero Yerba Loca, Chile central

Jorge Clavero[1,2], Bárbara Droguett[1], Nicolás Bambach[3], Waldo Pérez-Martínez[2], Igor Aguirre[4], Valentina Ramírez[1], Paulina Vidal-Páez[2], Idania Briceño-Urbaneja[2], Alejandro Tamayo[5]*

1. Amawta Geoconsultores Ltda. Almirante Pastene 185, Providencia, Santiago, Chile
2. Hemera, Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor. Camino La Pirámide 5750, Huechuraba, Santiago, Chile.
3. Department of Land, Air and Water Resources, University of California-Davis. One Shields Avenue, Davis, California, EEUU.
4. Subterránea SpA. Avda. Larraín 6642 oficina 307, Edificio Amado Nervo, La Reina, Santiago, Chile.
5. Gerencia de Control de Proyectos Ambientales, Anglo American Chile. Isidora Goyenechea 2800, Las Condes, Santiago, Chile.
** jclavero@amawta.cl*

RESUMEN

La cuenca del estero Yerba Loca, localizada en la precordillera y cordillera de Chile central, ha sido afectada de forma recurrente en el pasado geológico y en tiempos recientes por fenómenos de remoción en masa gatillados por eventos hidrometeorológicos. La frecuencia e intensidad de este tipo de eventos han ido en aumento a nivel global en los últimos años como efecto del Cambio Climático. Se utilizó el Modelo CESM para simular el clima histórico y futuro en la zona de estudio para el escenario de emisiones RCP 8.5. Los resultados de este modelo indicaron un aumento sostenido de las temperaturas en el área de hasta 3,8 °C hacia finales de siglo, acompañados de una disminución global de las precipitaciones anuales. Sin embargo, se proyecta una alta variabilidad interanual de las precipitaciones, con años muy secos y otros muy lluviosos, en los cuales las precipitaciones estarán concentradas en eventos de muy corta duración. Se proyecta que la frecuencia de estos eventos aumentará notablemente en el futuro, con eventos de hasta 260 mm de lluvia en 24 horas, sin precedentes en el registro histórico. Esto conlleva, además, a que habrá más y más frecuentes eventos de precipitación intensa con altas temperaturas, incluso en los meses de otoño, invierno y primavera. Los resultados de modelaciones de flujos y crecidas de detritos en la zona asociados a lluvias intensas, indican que los máximos proyectados tendrán volúmenes, alturas y velocidades extremadamente altos en comparación con el registro geológico, aunque sus alcances longitudinales serán solo ligeramente mayores. La mayor frecuencia proyectada para la ocurrencia de estos fenómenos, así como los volúmenes y velocidades modelados, urgen la necesidad de mejorar la planificación territorial de zonas precordilleranas y cordilleranas para enfrentar las consecuencias de los cambios climáticos y sus efectos en la generación de fenómenos geológicos peligrosos.



REMOCIONES EN MASA ASOCIADAS A LLUVIAS INTENSAS (RAINFALL-INDUCED) EN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL ESTERO YERBA LOCA, CHILE CENTRAL

3,8 °C

aumento sostenido de las temperaturas en el área

Alta variabilidad interanual de las precipitaciones

260 mm

de lluvia en 24 horas, sin precedentes en el registro histórico

1. INTRODUCCIÓN

Chile, como gran parte del mundo, ha experimentado en las últimas décadas y, en particular, en estos últimos 20 años notables cambios en sus patrones climáticos. Estos cambios, inducidos por el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico en la atmósfera, han alterado en las últimas décadas la magnitud y frecuencia de eventos de precipitación extrema y sus consiguientes efectos en remociones en masa, disminuido la acumulación de nieve durante la temporada de invierno y aumentado la incidencia de sequías e incendios en las regiones de clima mediterráneo (p.e. Adam et al., 2009; Trenberth, 2011; Moritz et al., 2012), dentro de las cuales se encuentra la zona central de Chile. Lo anterior ha generado enormes efectos a nivel de ecosistemas y paisajes locales y regionales, provocando la migración climática de especies y el aumento de las tasas de desertificación, entre otros (p.e. Tramblay et al., 2020; Doblas-Reyes et al., 2021). Las actuales proyecciones climáticas para Chile y el mundo son aún más dramáticas que a principios del siglo XXI (p.e. Araya-Osses et al., 2020; Poveda et al., 2020; Doblas-Reyes et al., 2021). Si bien los modelos climáticos han avanzado notablemente y son cada vez más complejos y tienen mejor resolución espacial, estos aún son variados y tienen distintos grados de incertidumbre. Esto último se debe, entre muchos factores, al gran número de variables que afectan el clima global, así como por la aún desconocida respuesta del medioambiente a las medidas de mitigación que, local y regionalmente, se están tomando para intentar ralentizar el aparentemente ya inexorable avance de estos cambios. No obstante, nuevas técnicas de modelación climática, así como los modelos de clima con resolución variable (VR por sus siglas en inglés), ofrecen una serie de ventajas en relación con otras técnicas de modelación del clima. En este estudio se utilizó una modelación de resolución variable implementada en el Modelo del Sistema Terrestre de la Comunidad (CESM por sus siglas en inglés). Esta modelación, de aquí en adelante referida como VR-Andes, ha demostrado tener un buen desempeño al momento de representar el clima regional de latitudes medias y la ocurrencia futura de eventos extremos (Bambach et al., 2021). En este estudio se utilizó una modelación de períodos histórico (1985-2014), futuro cercano RCP 8.5 (2030-2059), y futuro lejano RCP 8.5 (2070-2099). En particular, el escenario de trayectorias de concentraciones representativas RCP 8.5 asume escasos a limitados esfuerzos para reducir las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero), y representa una vía de emisiones y concentraciones relativamente altas (p.e. Moss et al., 2008). Sus principales supuestos incluyen alto crecimiento poblacional, relativamente bajo crecimiento del PIB con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética.

La precordillera y la cordillera de Chile central han sido afectadas en las últimas décadas por numerosas remociones en masa hídricas, gatilladas por eventos cortos de precipitación extrema (p.e. Hauser, 2000; Bozkurt et al., 2016), eventos que resultan cada vez más recurrentes y con efectos más devastadores a lo largo de los Andes (p.e. MAP-GAC, 2007; Garreaud et al., 2017; Poveda et al., 2020; Parodi et al., 2021). Cambios climáticos recientes, asociados a los sistemas hidrológico y criótico locales en la cuenca del estero Yerba Loca también han gatillado deslizamientos en esta zona precordillerana (SERNAGEOMIN, 2019; Sepúlveda et al., 2020), y los efectos a escala más global en los Andes sugieren que el riesgo asociado a estos fenómenos irá creciendo en el futuro (Moreiras et al., 2021). Flujos y crecidas de detritos como el ocurrido en marzo de 1993 en la quebrada de Macul (Naranjo y Varela, 1996) así como varios ocurridos en el Cajón del río Maipo y sectores precordilleranos de las regiones de Valparaíso y Metropolitana de Santiago en los veranos de 2017 y 2021 han tenido devastadores efectos no solo en pérdida de vidas humanas, sino también en enormes daños en viviendas, infraestructura vial y disponibilidad de agua potable, entre otros (p.e. Garreaud y Viale, 2014; Garreaud et al., 2017, 2021). Para comprender los efectos que pueden tener futuros eventos de flujos y crecidas de detritos gatillados por intensas lluvias, es necesario primero conocer los tipos y extensiones de algunos eventos asociados a lluvias de diversa intensidad en cortos períodos de tiempo ocurridos en el pasado. Posteriormente, sobre la base del registro geológico, modelar diversos flujos y crecidas de detritos desencadenados por eventos extremos de precipitación de acuerdo con las proyecciones climáticas para Chile central, lo que permitirá determinar los volúmenes, extensiones y velocidades que estos flujos podrían alcanzar. En este capítulo presentamos los resultados de este tipo de análisis en el valle del estero Yerba Loca, como parte de la cuenca alta del río Mapocho en la precordillera de la Región Metropolitana

de Santiago (Figura 1), el cual es parte de un estudio a escala regional orientado a cuantificar el peligro asociado a remociones en masa hídricas en escenarios de cambio climático en Chile central.

2. METODOLOGÍA

2.1. Modelo VR-Andes

El proyecto VR-Andes de modelación climática de alta resolución espacial ha sido desarrollado desde el año 2017 por el Lawrence Berkeley National Laboratory, el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el Massachusetts Institute of Technology (MIT),

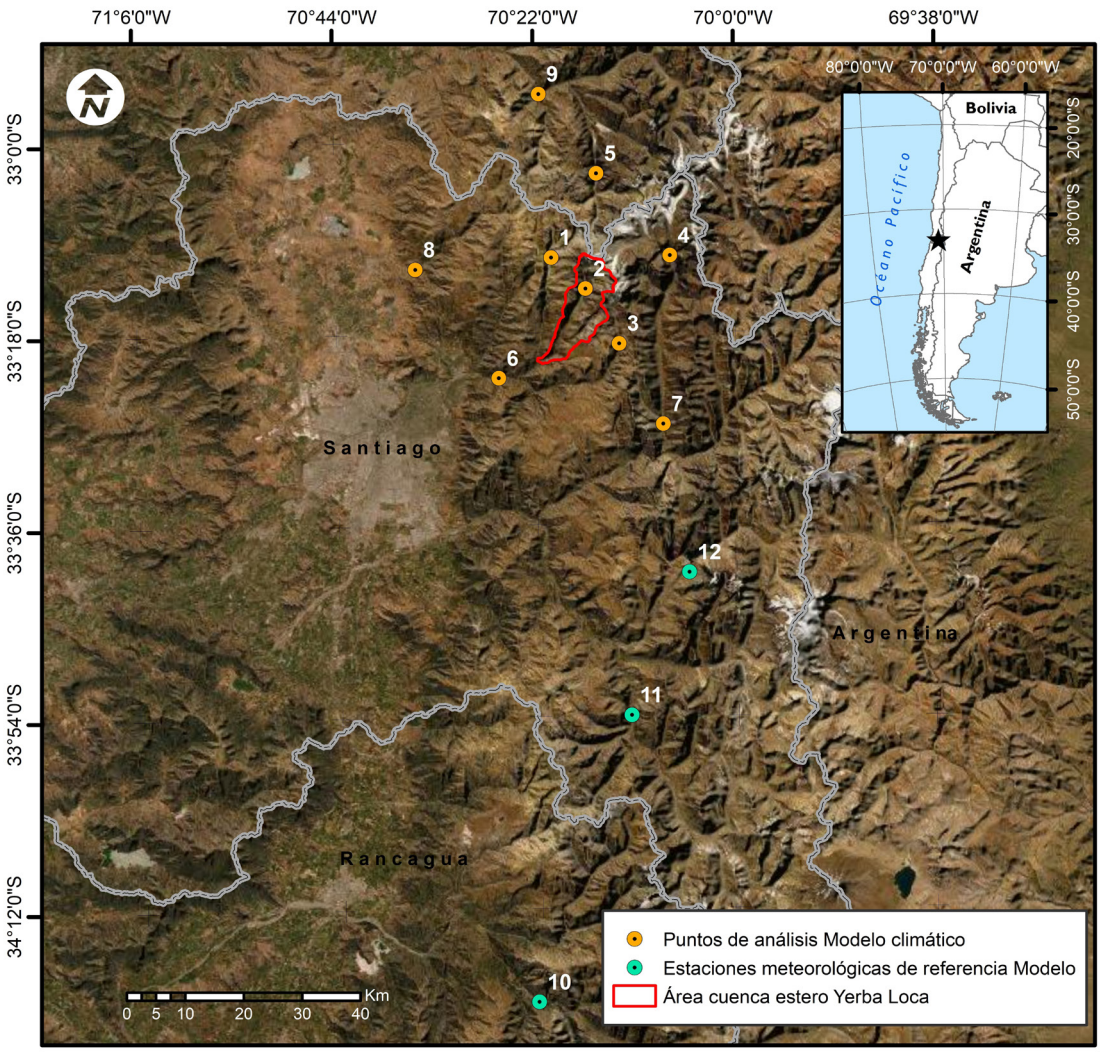


Figura 1. Ubicación del área de estudio en Chile central, de los puntos de análisis del modelo climático (naranjo) y estaciones meteorológicas de referencia cercanas utilizadas para su validación (verde).

y la Universidad de California Davis, todas instituciones científicas y académicas de EEUU. Dicho proyecto utiliza una metodología de modelos de clima de resolución variable e implementada en el Community Earth System Model (CESM) utilizando las últimas versiones del modelo atmosférico y de superficie desarrollados por NCAR. Esta técnica ha sido utilizada recientemente para modelar los impactos del cambio climático en regiones de topografía compleja como lo son la sierra Nevada, las Montañas Rocallosas y las Cascades en EEUU (p.e. Wu et al., 2017; Huang y Ullrich, 2017; Rhoades et al., 2018). La Cordillera de los Andes en la zona de Chile central presenta una alta variabilidad de alturas en cortas distancias, pasando desde el nivel del mar hasta montañas de más de 6.000 m de altura en menos de 200 km. Esta variabilidad de altura genera importantes complejidades topográficas y meteorológicas, por lo que el modelo (CESM) se implementó en su máxima resolución espacial (~14 km) en la región de los Andes Sudamericanos. El proyecto contempló una modelación del período histórico (1985-2014), futuro cercano RCP 8.5 (2030-2059) y futuro lejano hacia finales de siglo RCP 8.5 (2070-2099).

La Figura 2 muestra una comparación de los resultados del modelo VR-Andes en relación con los resultados de los productos de reanálisis CHIRPS, MERRA-2 y UDEL a lo largo de Chile diferenciado en cuatro macrozonas (Bambach et al., 2021). La macrozona centro norte (amarillo en la figura) incluye la zona de interés en el marco del presente estudio, donde es posible observar la magnitud del sesgo de precipitación y temperatura. En el caso de la precipitación el sesgo promedio para la zona es de aproximadamente un 45%. Dicho sesgo es resultado de diferencias significativas en las zonas de altura, especialmente al sur de la cuenca del río Maipo. En el caso de la temperatura, existe una diferencia considerable entre los dos productos de reanálisis. MERRA-2 presenta magnitudes medias de temperatura con características similares a la modelación VR-Andes, mientras que UDEL estima valores medios > 3 °C por debajo de los productos recién mencionados. Por lo anterior, para este estudio se realizó un análisis de sesgo de la modelación VR-Andes en relación con localidades cercanas al área donde se ubican estaciones meteorológicas (Figura 1). La comparación de productos grillados con respecto a los puntos de análisis permite comparar la magnitud y variabilidad de un modelo con los registros históricos del tiempo medio.

En este caso el análisis comparativo con estaciones meteorológicas se extendió a las zonas del valle para aumentar la robustez de los parámetros estadísticos utilizados en el proceso de corrección de sesgo. De acuerdo con los resultados obtenidos, se realizó una corrección de sesgo con objeto de proveer una serie de tiempo que se ajuste a la calibración y características de los modelos utilizados para evaluar los riesgos geológicos asociados a precipitaciones intensas. En promedio, la corrección de sesgo para la zona de estudio fue en torno a ~1,6 °C. Para la precipitación se identificó un sesgo moderado en altura, sin embargo, dada la escasez de registros de precipitación en altura se determinó no ajustar esta variable.

2.2. Análisis estadístico de la proyección climática

Para analizar las eventuales variaciones temporales de las temperaturas (mínima y máxima) y precipitaciones diarias, se efectuó un análisis estadístico mediante regresiones lineales y, además, se analizaron gráficos de dispersión para los tres períodos modelados (Histórico, Futuro cercano y Futuro lejano). Se efectuó, además, un análisis estadístico de la ocurrencia y frecuencia futura de eventos de precipitación extrema que consideren precipitaciones mayores a 20 mm en 24 horas. La información referida a la modelación del período histórico también se incluyó con el objetivo de compararlo con los escenarios futuros.

Los datos disponibles de modelación climática incorporan la siguiente información:

- **Datos Históricos:** Incluye datos diarios de precipitaciones y temperaturas mínimas y máximas modelados para el período comprendido entre el primero de enero de 1985 hasta el 31 de diciembre de 2014 (1985-2014, 30 años).
- **Datos Futuro 1** (FUT85_P1) o futuro cercano: Incluye datos diarios de precipitaciones y temperaturas mínimas y máximas modelados para el período comprendido entre el primero de enero del año 2030 hasta el 31 de diciembre de 2059 (2030-2059, 30 años).
- **Datos Futuro 2** (FUT85_P2) o futuro lejano: Incluye datos diarios de precipitaciones y temperaturas mínimas y máximas modelados para el período comprendido entre el primero de enero del año

2070 hasta el 30 de diciembre del año 2099 (2070-2099, 30 años).

2.3. Modelamiento flujos y crecidas de detritos

El modelamiento de remociones en masa hídricas (flujos y crecidas de detritos) se realizó mediante el Software RAMMS® (Rapid Mass Movements Simulation), módulo Debris Flow, desarrollado por el WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF de Suiza (Bartelt et al., 2013). Este programa genera una simulación numérica para calcular el movimiento geofísico de una remoción en masa desde su inicio hasta su posición final. Para modelar flujos y crecidas de detritos, el programa requiere la determinación de los siguientes parámetros: volumen del flujo, dirección del flujo, cohesión, densidad del flujo y los coeficientes de fricción en estado seco de tipo Coulomb (μ) y de turbulencia viscosa (ξ) (Bartelt et al., 2013).

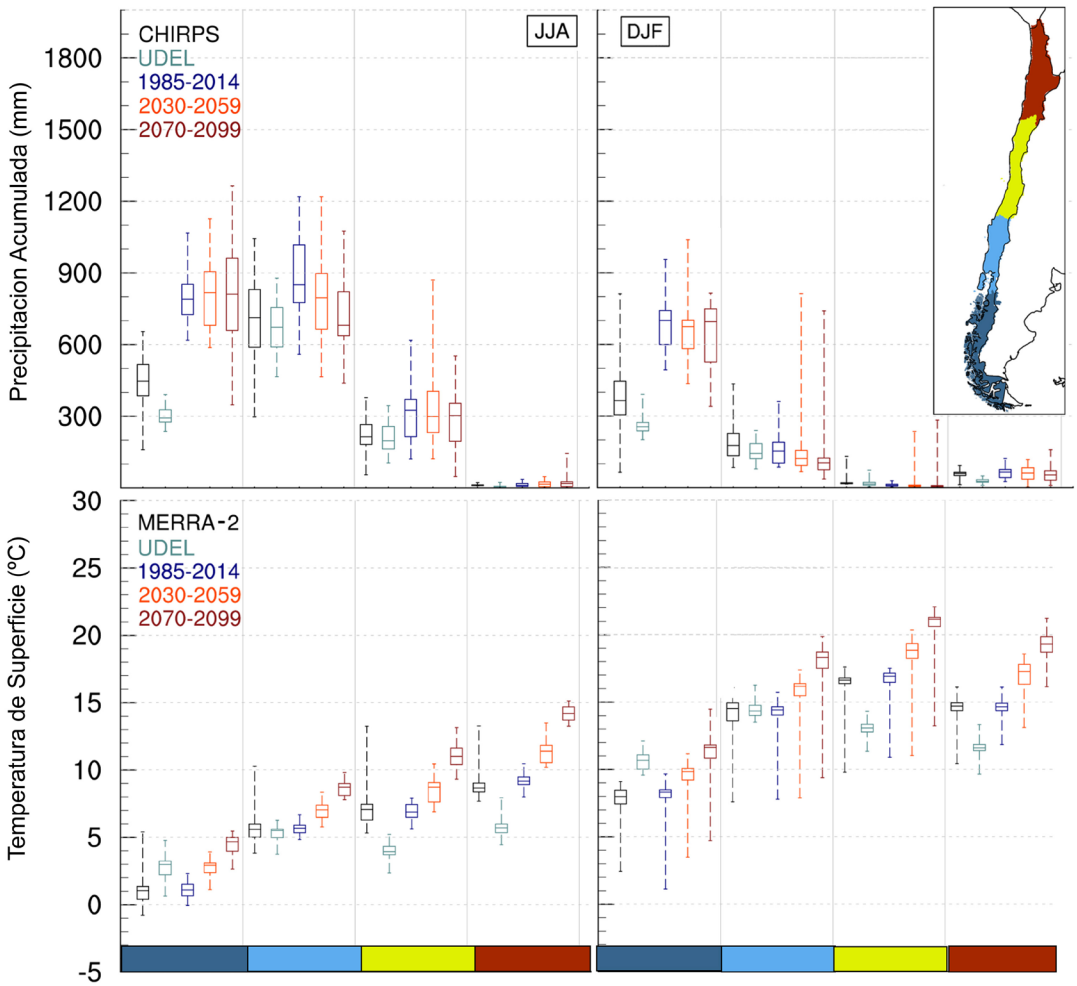


Figura 2. Diagramas de caja para la precipitación total y temperatura media de superficie para las cuatro macrozonas de Chile. Diagramas de caja en Invierno (JJA, Junio, Julio y Agosto por sus siglas en inglés) y Verano (DJF, Diciembre, Enero y Febrero por sus siglas en inglés) de VR-Andes, y los productos de reanálisis CHIRPS, MERRA-2 y UDEL. *Fuente: Bambach et al. (2021).*

Para modelar los flujos esperables en escenarios futuros de clima se consideraron los eventos máximos de precipitaciones proyectadas para la zona donde se localiza la cuenca de Yerba Loca. Como base para la determinación de los parámetros de los flujos se consideraron histogramas de tres puntos con un caudal inicial y final igual a cero y un caudal máximo calculado, a partir del volumen del flujo, según la fórmula de Rickenmann (1999). Con esto se realizaron modelos en los cuales el origen de los flujos ocurre de manera paulatina con un caudal que varía según cada histograma ingresado. Los volúmenes de los flujos se calcularon sobre la base de la precipitación máxima esperada de acuerdo con las proyecciones climáticas y las áreas de las microcuencas de captación, las que fueron determinadas en este sector por Clavero et al. (2019) y utilizadas también por Droguett et al. (en rev.). Como base para la determinación de los parámetros se utilizó la información recopilada en el inventario de remociones en masa del sector utilizado por Clavero et al. (2019) y actualizado por Droguett et al. (en rev.), en tanto que la posible concentración de partículas al momento del transporte, se estimó a partir de las estructuras y granulometría de esos mismos depósitos inventariados según la clasificación de comportamiento de O'Brien y Julien (1988). La definición de parámetros de cohesión, densidad del flujo y coeficientes de fricción en estado seco de tipo Coulomb (μ) y de turbulencia viscosa (ξ) se definieron y calibraron específicamente para los flujos de la zona de estudio considerando las características propias del sector, así como datos obtenidos de la literatura especializada (Bartelt et al., 2013). Esta calibración se realizó para dos grupos de flujos de detritos y para tres grupos de crecidas de detritos.

3. RESULTADOS

3.1. Proyecciones climáticas

Dada la complejidad de la topografía del territorio chileno, así como su larga extensión, el modelo VR-Andes caracterizó todo el territorio a la resolución más fina posible para este modelo, la que corresponde a una grilla de 14 x 14 km. De norte a sur, se caracterizaron climáticamente cuatro macrozonas con características relativamente similares (Figura 3 y Figura 4). Sin embargo, dada la complejidad fisiográfica del territorio, una significativa variabilidad en el gradiente longitudinal es esperable al interior de cada una de las cuatro zonas.

Los resultados de la modelación para el período histórico se compararon favorablemente con los productos de reanálisis para temperatura y precipitación; sin embargo, existen sesgos locales, especialmente en los datos de los meses de verano para las zonas de latitudes medias y altas. En los resultados de las simulaciones destacan patrones de calentamiento significativos (+ 3-6 °C hacia finales de siglo) y respuestas de precipitación heterogéneas en América del Sur, lo que concuerda con simulaciones continentales realizadas previamente en estos mismos sectores.

La Figura 3 muestra la tendencia de la temperatura a lo largo del territorio chileno para los dos períodos analizados, y su comparación con la tendencia histórica. Para la macrozona en que se ubica el área de estudio (amarillo en la Figura 3), se puede observar una consistente tendencia al incremento de la temperatura, tanto para los meses de verano como para los meses de invierno. Las tasas de aumento proyectadas son superiores al aumento ya ocurrido en el período histórico, especialmente para la proyección del período futuro cercano. Se observa, además, una alta variabilidad en la temperatura de superficie proyectada, especialmente para los meses invernales (Figura 3). En la Figura 4 se puede observar justamente este incremento en la temperatura máxima proyectada para los períodos analizados en todos los puntos del área de estudio (Figura 1).

La Figura 5 muestra, a su vez, la tendencia de las precipitaciones acumuladas anuales a lo largo de las mismas macrozonas para los períodos analizados y su comparación con la tendencia histórica. Para la macrozona central (amarillo en la Figura 5) se

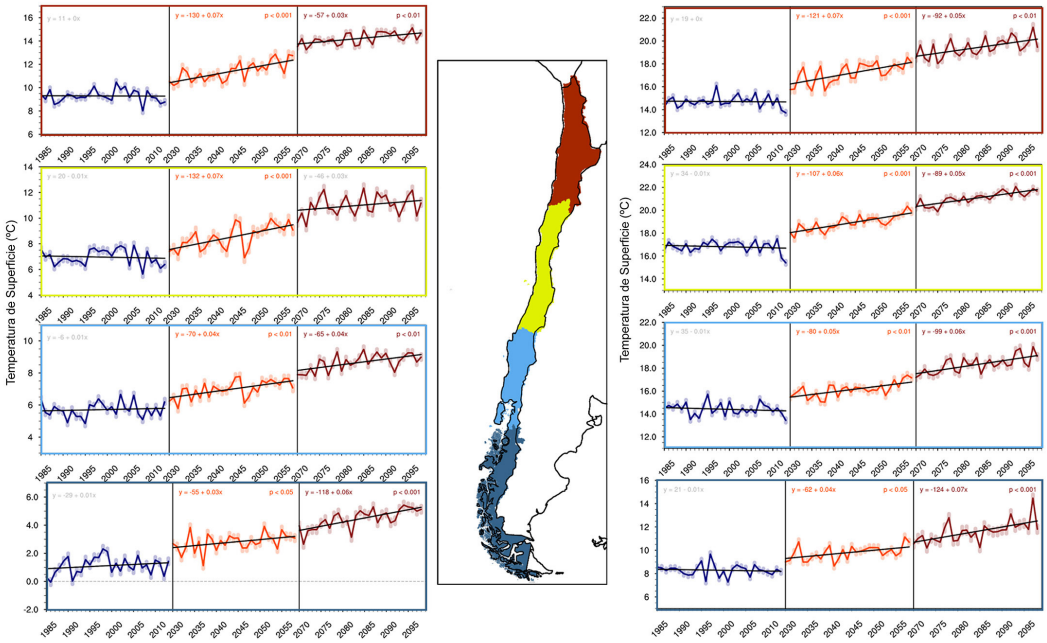


Figura 3. Resultados del modelo climático para la temperatura en las cuatro macrozonas de Chile. En amarillo la macrozona donde se encuentra el área de estudio (Fuente: Bambach et al., 2021). Los períodos analizados corresponden a Histórico (azul, izquierda); Futuro cercano (naranjo, centro) y Futuro lejano (rojo, derecha). Macrozonas: Norte (rojo), Central (amarillo), Sur (celeste), Austral (gris). Meses de invierno: gráficos a la izquierda del mapa. Meses de verano: gráficos a la derecha.

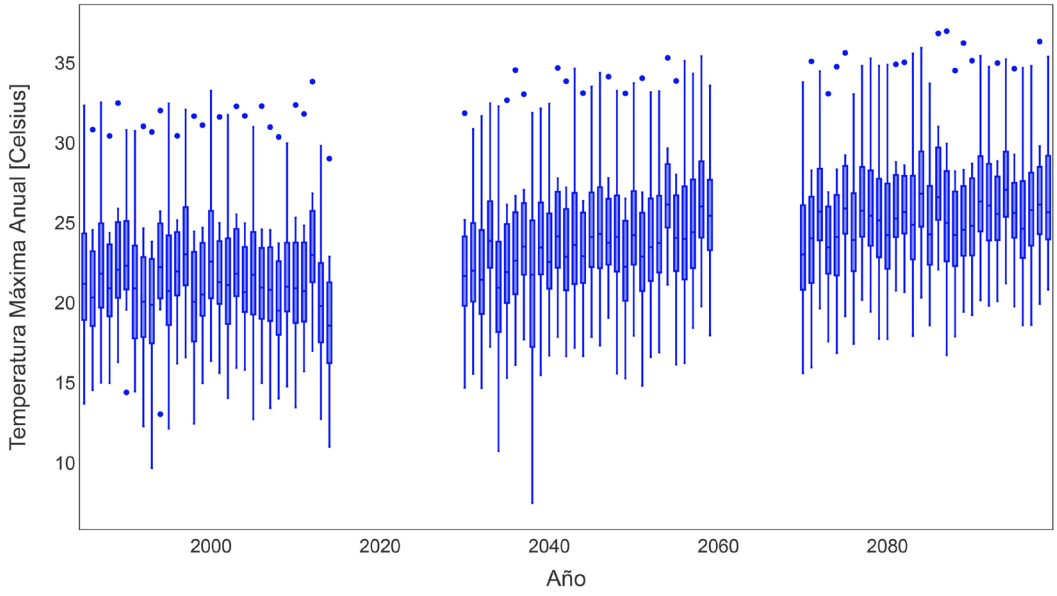


Figura 4. Diagrama de caja para la temperatura máxima anual (rango de variación) proyectada en el área de estudio.

puede observar una consistente disminución en las precipitaciones acumuladas en los meses de invierno para el período futuro cercano, similar a la tasa de disminución histórica, en tanto que para el período futuro lejano se proyecta para esta zona una estabilización de las precipitaciones acumuladas. Para los meses estivales, si bien el modelo tiende a mostrar una disminución, es muy pequeña y los datos de precipitación acumulada anual son muy similares a los que se dan en el período histórico. Sin embargo, al igual que para la temperatura, el modelo proyecta una muy alta variabilidad interanual para las precipitaciones acumuladas, especialmente para el período futuro cercano (Figura 5) en los meses invernales. En la Figura 6 se puede observar la proyección de la precipitación acumulada anual para todos los puntos del área (Figura 1) en los períodos analizados. En el futuro cercano, se estima un ligero aumento promedio de las precipitaciones anuales para la zona de estudio, mientras que hacia finales de siglo se observaría una disminución poco significativa de estas. Sin embargo, al igual que a nivel de macrozonas, se observa una muy alta variabilidad interanual, que incluye algunos años con precipitaciones totales anuales sin precedentes históricos (Figura 6). De manera más específica, en años lluviosos se estima una precipitación anual acumulada por sobre 4.000 mm por año en las partes más altas del área de estudio, mientras que las zonas más bajas y en los años más secos, la precipitación anual acumulada no sobrepasaría los 200 mm (Figura 6).

La Figura 7 muestra la relación entre la temperatura mínima proyectada para los días de máxima precipitación para cada uno de los tres períodos analizados. De esta figura se desprende principalmente que en los períodos futuros ocurrirán más eventos y mayor magnitud en la precipitación con temperaturas sobre 0 °C en la zona. Esto quiere decir que habrá más eventos de precipitación extrema en gran parte del área de estudio, donde caerá precipitación líquida y no sólida, o esta última será menor. Se observa que hacia finales de siglo ocurrirían los eventos de mayor

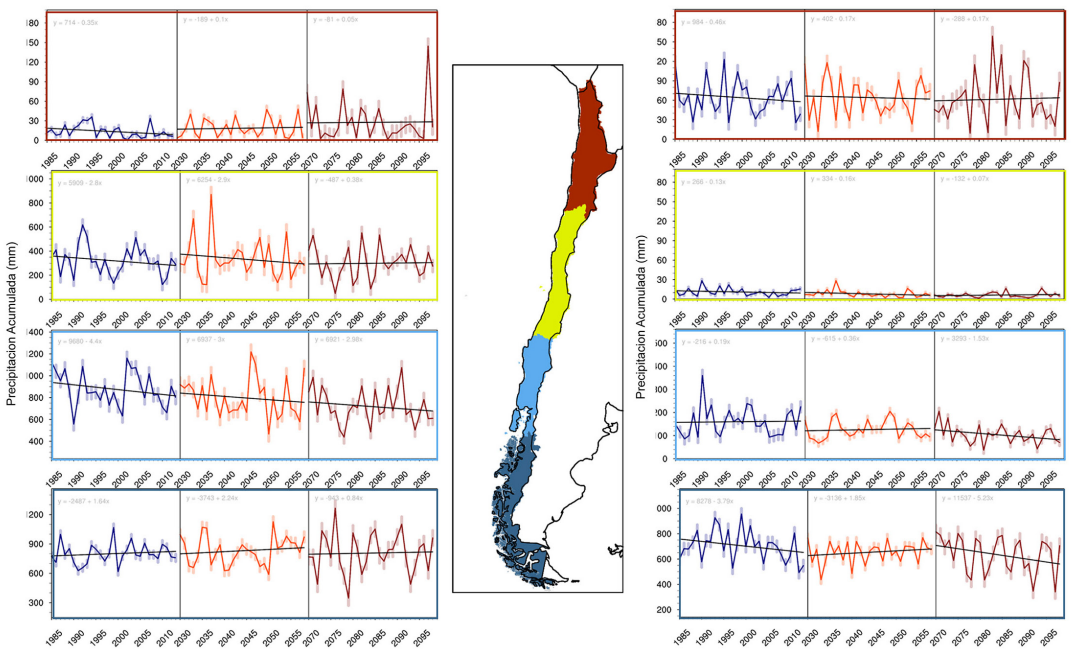


Figura 5. Resultados del modelo climático para la precipitación en las cuatro macrozonas de Chile. En amarillo la macrozona donde se encuentra el área de estudio. Períodos analizados: Histórico (azul, izquierda); Futuro cercano (naranjo, centro) y Futuro lejano (rojo, derecha). Macrozonas: Norte (rojo), Central (amarillo), Sur (celeste), Austral (gris). Meses de invierno: gráficos a la izquierda del mapa. Meses de verano: gráficos a la derecha.

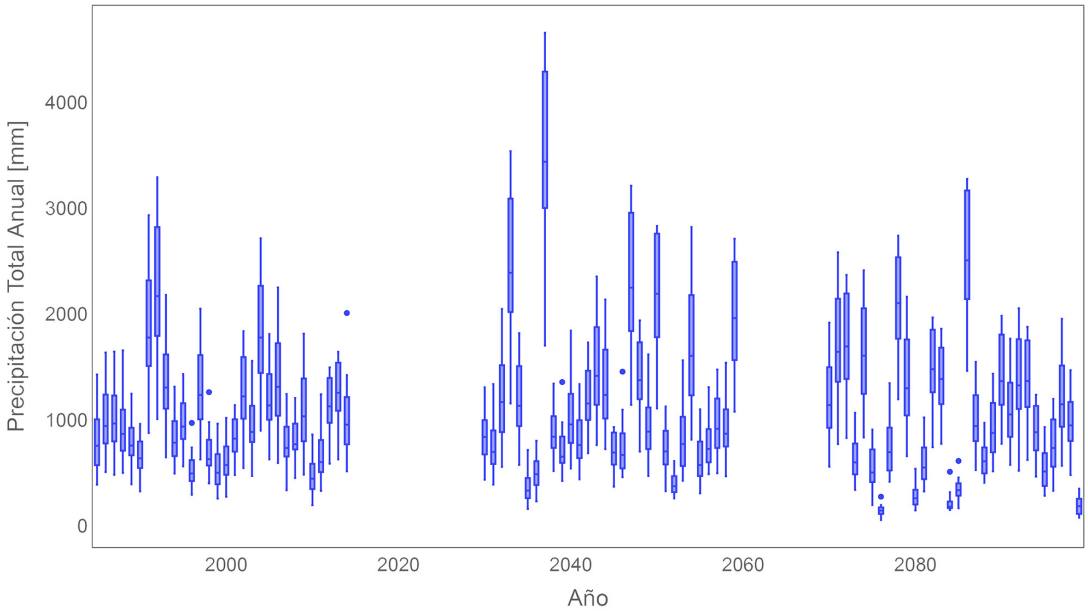


Figura 6. Diagrama de caja para la precipitación total anual (rangos de variación) proyectada en área de estudio.

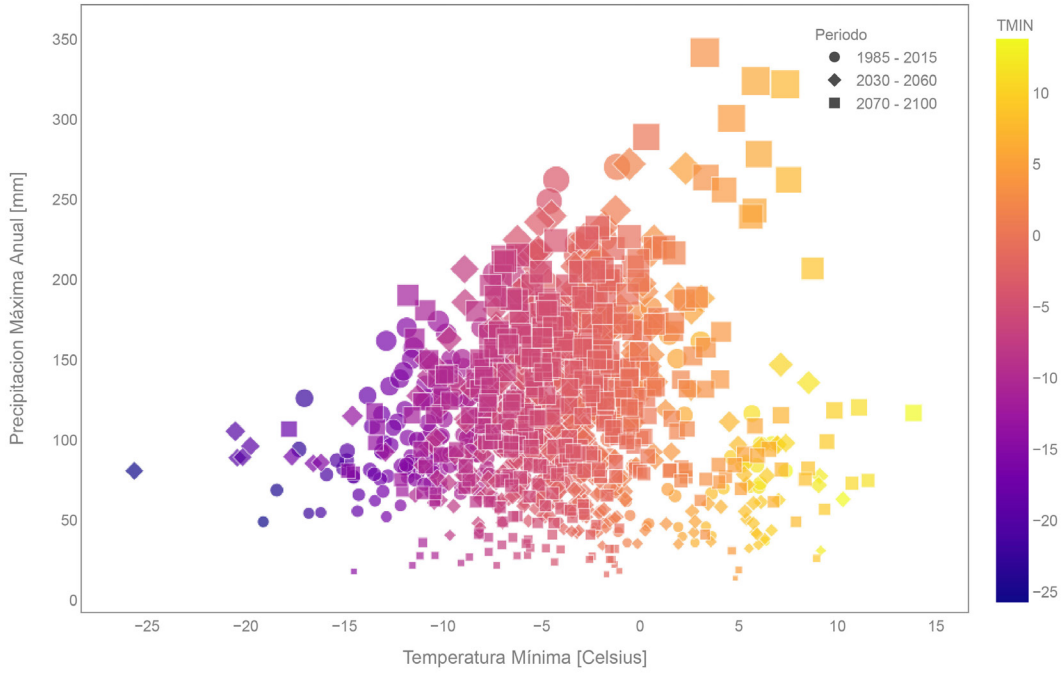


Figura 7. Relación de la temperatura mínima en el día de máxima precipitación para cada año del modelo (períodos Histórico, Futuro cercano y Futuro Lejano). Los símbolos indican el período de tiempo analizado, en tanto que el tamaño de los símbolos se relaciona con la magnitud de la precipitación y el color a la temperatura.

magnitud de precipitación y a mayor temperatura.

La Figura 8 muestra la misma relación para los puntos de análisis más cercanos al área de estudio (puntos 1 al 4 en la Figura 1). En dicha zona, se observa la misma tendencia anterior con un aumento en la magnitud de las precipitaciones durante días con temperaturas sobre 0 °C. En particular, para el punto 2 ubicado en la cabecera del estero Yerba Loca (Figura 1), se proyecta la ocurrencia en el período futuro cercano de eventos de más de 200 mm en 24 horas de precipitación esencialmente líquida.

3.2. Proyección de la frecuencia de eventos de precipitación extrema

Los resultados obtenidos a partir de las series de datos resultantes del modelo climático para los tres períodos de tiempo (Histórico, Futuro cercano y Futuro lejano) y localidades del área de estudio se presentan de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Análisis del número de eventos por localidad y por rangos de precipitación máxima diaria
- Análisis de tendencia de las temperaturas máxima y mínima por localidad
- Análisis comparativo de las variaciones relativas entre períodos (Futuro 1, Futuro 2 e Histórico) a nivel mensual por localidad

La Tabla 1 resume la proyección del número de eventos extremos de precipitación en 24 horas en el área de estudio, para diferentes rangos a partir de 20 mm, para los tres períodos de tiempo analizados: Histórico, Futuro cercano (FUT 8.5 P1) y Futuro lejano (FUT 8.5 P2). Se muestra, además, el valor máximo de precipitación diaria para cada localidad del área de estudio (Figura 1) por cada período. De los datos incluidos en la Tabla 1 se desprende que para todos los períodos de tiempo el mayor número de eventos de precipitación extrema se proyectan para la Localidad 10 (E de la ciudad de Rancagua) y, por el contrario, el menor número de estos eventos se registrarían en la Localidad 4 (cabecera cuenca del río Olivares, al E del

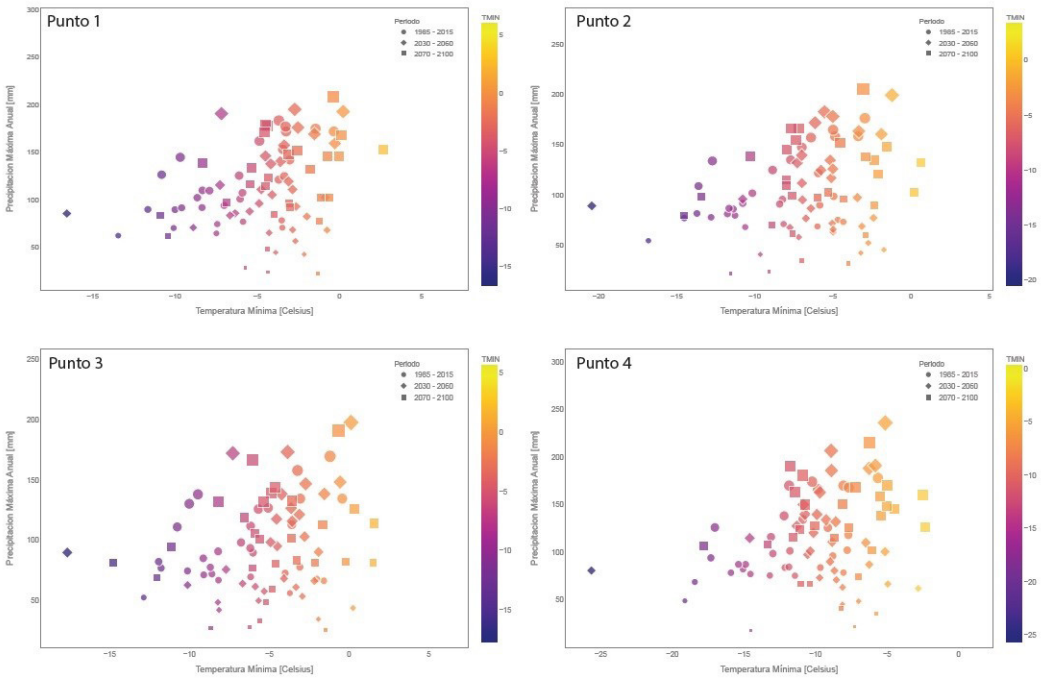


Figura 8. Relación de la temperatura mínima en el día de máxima precipitación para cada año en los puntos de análisis (1-4) cercanos al área de estudio. Los símbolos indican el período de tiempo analizado y el tamaño de los símbolos se relaciona con la magnitud de la precipitación y el color a la temperatura.

Tabla 1. Eventos de precipitación extrema (>20 mm/24 horas). Número de eventos de precipitación diaria con temperaturas máx. o min. > 0 °C menores a 20 mm, entre 20-40 mm, entre 40-60 mm, 60-120 mm y sobre 120 mm.

LOCALIDAD	No. DE EVENTOS PERÍODO HISTÓRICO					PP MAX
	<20	20-40	40-60	60-120	>120	HISTÓRICO
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
LOC 1	716	128	53	44	11	183,3
LOC 2	523	46	16	15	4	176,2
LOC 3	855	115	48	27	6	169,7
LOC 4	231	13	1	1	0	178,2
LOC 5	476	37	15	24	8	222,8
LOC 6	1095	178	72	50	4	151,0
LOC 7	746	63	24	22	4	181,2
LOC 8	874	194	50	24	0	116,7
LOC 9	1057	151	65	53	12	182,7
LOC 10	1225	220	121	143	39	270,5
LOC 11	759	123	69	75	23	249,1
LOC 12	792	68	30	39	13	221,1
LOCALIDAD	No. DE EVENTOS PERÍODO FUTURO CERCANO					PP MAX
	<20	20-40	40-60	60-120	>120	FUT P1
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
LOC 1	961	169	82	72	20	195,0
LOC 2	774	115	46	31	12	199,0
LOC 3	1094	150	64	42	15	197,8
LOC 4	349	49	15	11	3	236,1
LOC 5	726	108	50	47	18	226,7
LOC 6	1251	209	91	46	14	188,6
LOC 7	978	146	52	43	14	218,5
LOC 8	992	198	63	38	3	147,2
LOC 9	1265	183	82	72	20	192,5
LOC 10	1276	260	167	180	53	269,6
LOC 11	980	176	110	122	33	272,3
LOC 12	1036	133	77	74	23	243,5
LOCALIDAD	No. DE EVENTOS PERÍODO FUTURO LEJANO					PP MAX
	<20	20-40	40-60	60-120	>120	FUT P2
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
LOC 1	977	173	70	104	26	278,4
LOC 2	901	132	54	53	14	263,9
LOC 3	1065	158	70	59	12	239,4
LOC 4	560	63	19	23	16	189,1
LOC 5	905	131	66	85	33	341,7
LOC 6	1048	181	79	61	14	207,1
LOC 7	1093	154	59	65	19	256,2
LOC 8	818	145	68	41	1	120,5
LOC 9	1151	156	81	81	21	262,4
LOC 10	1214	239	130	173	54	321,9
LOC 11	1069	178	110	123	46	324,0
LOC 12	1156	154	89	91	34	300,8

área de estudio). Sin embargo, en esta última localidad, el evento de máxima precipitación diaria no es el menor de todos los sectores analizados, siendo de 236 mm para el futuro cercano y de 289 mm para el futuro lejano. Los eventos más extremos de precipitación diaria proyectados corresponden a 272 mm en la Localidad 11 (Futuro cercano) y de 341 mm en la Localidad 5 (Futuro lejano). En las localidades analizadas más cercanas al área de la cuenca del estero Yerba Loca (Localidades 1 a 4 en Figura 1) los máximos eventos de precipitación proyectados corresponden a 236 mm para el período Futuro cercano y de 289 mm para el Futuro lejano, ambos en la Localidad 4 (cabecera cuenca del río Olivares), siendo en ambos muy superiores a los máximos eventos de precipitación diaria proyectados para el período histórico (183 mm). Cabe destacar que el número de eventos extremos por sobre 120 mm de precipitación diaria proyectados aumenta notablemente en todas las localidades (Tabla 1). En particular en la Localidad 2 ubicada en la cuenca del estero Yerba Loca (Figura 1) ocurre un aumento desde cuatro eventos en el período histórico a 12 y 14 eventos en los períodos Futuro cercano y Futuro lejano, respectivamente.

La Tabla 2 muestra un análisis comparativo del número de eventos de precipitación líquida (temperatura sobre 0 °C durante el evento de precipitación) entre los tres escenarios modelados. Para todas las localidades, el número de eventos de precipitación extrema (sobre 60 mm en 24 horas) aumenta notoriamente para los escenarios Futuro cercano y Futuro lejano. Este aumento en el número de eventos extremos de precipitación es especialmente fuerte hacia fines de siglo en comparación con la ocurrencia del mismo tipo de eventos en el período histórico. Para las localidades cercanas a la cuenca del estero Yerba Loca, en particular la Localidad 2 (Figura 1), los eventos de precipitación entre 40 y 60 mm pasan de 16 en el escenario histórico a 46 y 54 para

Tabla 2. Análisis comparativo del número de eventos con precipitación líquida (sobre 0 °C) para diversos rangos de precipitación en 24 horas. Comparación de la diferencia de los eventos de precipitación líquida con temperatura superior a 0 °C para precipitaciones en rangos menores a 20, 20-40, 40-60 y sobre 60 mm/día entre: i) escenarios Futuro 1–Histórico; ii) Futuro 2-Histórico; iii) Futuro 2-Futuro 1. En rojo valores negativos (disminución de eventos).

	DIF. EVENTOS ESC FUT 1 - HISTÓRICO				DIF. EVENTOS ESC FUT P2 - HISTÓRICO				DIF. EVENTOS ESC FUT P2 - FUT P1			
	< 20 mm	20-40 mm	40-60 mm	> 60 mm	< 20 mm	20-40 mm	40-60 mm	> 60 mm	< 20 mm	20-40 mm	40-60 mm	> 60 mm
LOC 1	245	41	29	37	261	45	17	75	16	4	-12	38
LOC 2	251	69	30	24	378	86	38	48	127	17	8	24
LOC 3	239	35	16	24	210	43	22	38	-29	8	6	14
LOC 4	118	36	14	13	329	50	18	38	211	14	4	25
LOC 5	250	71	35	33	429	94	51	86	179	23	16	53
LOC 6	156	31	19	6	-47	3	7	21	-203	-28	-12	15
LOC 7	232	83	28	31	347	91	35	58	115	8	7	27
LOC 8	118	4	13	17	-56	-49	18	18	-174	-53	5	1
LOC 9	208	32	17	27	94	5	16	37	-114	-27	-1	10
LOC 10	51	40	46	51	-11	19	9	45	-62	-21	-37	-6
LOC 11	221	53	41	57	310	55	41	71	89	2	0	14
LOC 12	244	65	47	45	364	86	59	73	120	21	12	28

los escenarios Futuro cercano y Futuro lejano (Tabla 1), con aumentos de 30 y 38 eventos respectivamente (Tabla 2). Para los eventos sobre 60 mm en 24 horas en la misma localidad hay un aumento de 24 y 48 en el número de estos eventos (Tabla 2), para los períodos Futuro cercano y Futuro lejano respectivamente, con respecto al número de eventos en el período histórico.

La Tabla 3 muestra un análisis comparativo entre los tres períodos analizados de la distribución mensual de los eventos de precipitación superiores a 20 mm en 24 horas para las cuatro localidades más cercanas a la cuenca del estero Yerba Loca. De los datos se desprende que, para el promedio de estas cuatro localidades en el escenario Futuro cercano, los eventos de precipitación intensos sobre 20 mm en 24 horas, aumentarán en todos los meses, salvo enero, febrero, mayo y octubre. En tanto para el escenario Futuro lejano, este aumento de eventos se concentrará en los meses de marzo, abril, agosto y septiembre, es decir en meses de otoño y primavera.

La Tabla 4 muestra el mismo análisis comparativo anterior, para los eventos de precipitación sobre 20 mm que se proyecta ocurrirán con temperaturas atmosféricas sobre 0 °C. En este caso, el aumento es aún más dramático, ya que se proyecta que, para el período Futuro cercano, este aumento de hasta 38% mensual, de las precipitaciones "cálidas" ocurrirá prácticamente en todos los meses del año, salvo en enero, febrero y mayo. En tanto que, para el escenario Futuro lejano, este aumento de hasta 28% mensual,

Tabla 3. Análisis comparativo eventos de precipitación extrema (en 24 horas) desagregados por mes. Comparación mensual del número de eventos con precipitaciones mayores a 20 mm/día en las 4 localidades más cercanas a la cuenca del estero Yerba Loca. PH: Histórico, P1: Futuro cercano, P2: Futuro lejano. Azul: disminución respecto del período histórico; Rojo: aumento respecto del período histórico.

LOCALIDAD		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
LOC 1	P2-PH	-1	0	4	11	-11	8	-16	2	1	-10	-1	0
	P1-PH	-1	0	14	9	-23	30	8	3	13	2	0	1
LOC 2	P2-PH	0	0	4	9	-20	-1	-9	-6	3	-5	-1	-2
	P1-PH	1	0	12	11	-30	27	6	-3	16	3	3	-1
LOC 3	P2-PH	0	-1	4	6	-12	-11	-9	-5	6	-7	-1	0
	P1-PH	1	-1	10	2	-26	6	9	0	15	0	3	1
LOC 4	P2-PH	-3	-2	3	15	-13	-2	-13	11	9	-3	-4	-1
	P1-PH	-1	-1	16	14	-24	46	3	-3	19	-1	11	1
PROMEDIO P2-HIST		-1,83	-0,08	4,25	8,17	-13,25	-11,50	-15,83	2,17	5,75	-8,58	-2,25	-0,42
PROMEDIO P1-HIST		-1,25	-0,17	12,58	8,92	-18,67	26,83	10,42	0,33	17,75	-0,75	3,33	0,50

ocurrirá también prácticamente en todos los meses del año salvo en aquellos del verano (noviembre a febrero). Es decir, en ambos escenarios habrá más eventos de precipitaciones intensas en otoño, invierno y primavera con temperaturas atmosféricas más altas. Para el escenario Futuro cercano, esto también ocurrirá en los meses de noviembre y diciembre donde las temperaturas son también altas.

3.3. Modelamiento de flujos y crecidas de detritos en escenarios de Cambio Climático

Como se indicó en la sección 2 de este capítulo, para la modelación de flujos y crecidas de detritos en la cuenca del estero Yerba Loca se tomaron datos del inventario de remociones en masa del área (Clavero et al., 2019, actualizado por Droguett et al, en rev.; Figura 9). A partir de este inventario se seleccionaron algunos depósitos de crecida y de flujo de detritos representativos entre aquellos preservados en el registro geológico reciente en el área (Pleistoceno Superior-Holoceno), cuyas principales características se presentan en la Tabla 5. Para los depósitos seleccionados (dos de tipo flujo de detritos y tres de tipo crecida de detritos Tabla 6) se determinaron las áreas de captación de cada microcuenca para poder estimar los volúmenes equivalentes de agua, así como la magnitud de los eventos de precipitación asociados (Tabla 5). De los datos incluidos en la Tabla 5, se desprende que los flujos que originaron los depósitos seleccionados, y que son representativos de aquellos preservados en el registro geológico reciente, están asociados a eventos de precipitación de entre 50 y 180 mm, sobre la base de las microcuencas de captación asociadas a los depósitos identificados en el inventario de remociones en masa (Droguett et al., en rev.).

Con estos datos y los parámetros de modelación determinados específicamente para esta zona (Droguett et al., en rev.) se generó una serie de modelos de flujos y crecidas de detritos asociados a dos tipos de eventos de precipitación en el área en 24 horas: intensa (40 mm) y extrema (263 mm), que corresponden al evento más recurrente de precipitación intensa y al evento de máxima precipitación proyectados en los escenarios futuros para el sector del estero Yerba Loca (Figura 1), respectivamente. Es decir, los depósitos-tipo que sirven de base para la modelación fueron originados por eventos de precipitación de magnitud similar a aquella más frecuente de acuerdo a la proyección del modelo climático; en tanto que aquellos asociados a eventos de

Tabla 4. Análisis comparativo de eventos de precipitación extrema (en 24 horas) sobre 0 °C desagregados por mes. Comparación mensual del número de eventos con precipitaciones mayores a 20 mm/día con temperatura sobre 0 °C en las 4 localidades más cercanas a la cuenca del estero Yerba Loca. PH: Histórico, P1: Futuro cercano, P2: Futuro lejano. Azul: disminución respecto del período histórico; Rojo: aumento respecto del período histórico.

LOCALIDAD		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
LOC 1	P2-PH	-1	0	4	12	4	34	41	37	14	1	-1	0
	P1-PH	-1	0	14	10	-8	44	23	4	9	11	0	1
LOC 2	P2-PH	0	0	4	12	22	51	44	26	20	7	1	-2
	P1-PH	1	0	12	13	6	42	18	7	12	10	3	-1
LOC 3	P2-PH	0	-1	4	7	2	24	39	24	18	1	0	0
	P1-PH	1	-1	10	3	-16	31	23	3	11	5	4	1
LOC 4	P2-PH	-2	-2	3	22	39	3	6	9	11	7	0	-1
	P1-PH	0	-1	15	16	13	6	2	2	0	3	7	0
PROMEDIO P2-HIST		-1,75	-0,08	4,25	9,92	10,25	28,92	26,50	26,50	18,17	2,08	-0,92	-0,42
PROMEDIO P1-HIST		-1,17	-0,17	12,50	10,00	-0,67	38,00	20,67	3,92	12,00	6,25	3,25	0,42

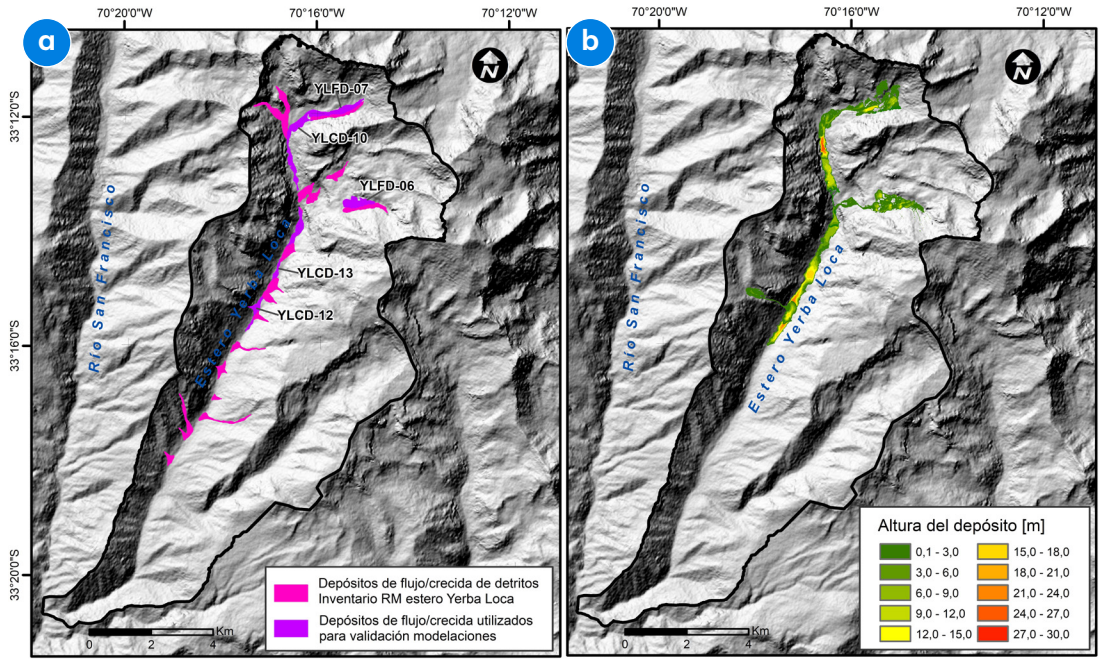


Figura 9. a) Inventario de flujos y crecidas de detritos en la cuenca del estero Yerba Loca (Droguett et al., en rev.); **b)** Resultados de la altura de los depósitos modelados de flujos y crecidas de detritos en el mismo sector (Droguett et al., en rev.).

Tabla 5. Características de depósitos de flujo y crecida de detritos seleccionados en la cuenca del estero Yerba Loca. Espesor, área cubierta y volúmenes del flujo y del depósito a partir del Inventario de remociones en masa (Droguett et al., en rev.).

Depósito	Ubicación		Espesor [m]	Distancia máxima recorrida [km]	Área [km^2]	Volumen estimado depósito [m^3]	Concentración de detritos estimada	Volumen estimado del flujo [m^3]	Precipitación estimada [mm]
	Este	Norte							
YLFD-06	383.188	6.322.938	>10	2,54	0,15	843.594	0,80	1.054.493	150-180
YLFD-07	382.492	6.325.900	<8	2,82	0,29	1.235.957	0,80	1.544.946	90-110
YLCD-12	379.912	6.319.529	4 a 6	3,3	0,05	83.148	0,45	184.772	50-60
YLCD-10	381.265	6.324.964	1	5,63	0,34	343.755	0,35	982.157	90-105
YLCD-13	380.781	6.321.083	1	4,38	0,41	408.330	0,35	1.166.657	50-60

precipitación superiores (150-180 mm, Tabla 5) fueron originados por lluvias de menor magnitud a la más extrema proyectada para la zona de acuerdo con los resultados del modelo climático (ca. 260 mm). La Tabla 6 resume los resultados y características principales de los flujos y depósitos obtenidos a partir de la modelación de flujos y crecidas de detritos en la cuenca del estero Yerba Loca.

Las Figuras 10 a 14 muestran los resultados para algunos flujos y crecidas de detritos que se podrían generar a partir de un evento de lluvias intensas como el de mayor precipitación proyectado en la zona por el modelo climático (263 mm) en el futuro.

La Figura 10 muestra el resultado de la modelación para un flujo de detritos de menor volumen y originado a partir de una quebrada secundaria lateral al valle principal del estero Yerba Loca. En este caso, se observa claramente la fuerte canalización del depósito en la parte de mayor pendiente y menor anchura de la quebrada, lo que genera que exista muy baja depositación de material detrítico en esta zona donde, además, el flujo adquiere su mayor velocidad.

La Figura 11 muestra el resultado de la modelación para un flujo de detritos característico en la zona de la cabecera de la cuenca del estero Yerba Loca. Aquí se observa que, si bien el flujo no alcanza grandes extensiones, gran parte del volumen de detritos se acomoda con un fuerte espesor del depósito, en particular hacia la parte final del depósito, en la zona de menor pendiente del recorrido. Por otra parte, se puede observar que las velocidades máximas llegan a ser del orden de 40 m/s en la cabecera y, posteriormente, en la parte canalizada central, disminuye a 15-20 m/s, que son velocidades características de este tipo de flujos en zonas de fuertes pendientes (p.e. Pierson et al., 1990; Rickenmann, 1999), aunque superiores a las recientemente medidas en flujos de detritos derivados de deslizamientos rocosos en los Alpes suizos (Walter et al., 2020).

Tabla 6. Parámetros de los resultados de la modelación de flujos y crecidas de detritos en la cuenca del estero Yerba Loca. Selección de resultados de la modelación de: volumen, velocidad, altura, distancia y área cubierta por flujos asociados a eventos de precipitación intensa máximo (263 mm en 24 h) y más recurrente (40 mm en 24 h) proyectados en escenario de Cambio Climático para la cuenca de Yerba Loca (FD: Flujo de Detritos; CD: Crecida de Detritos).

Precipitación en 24 horas: 40 [mm]								
Depósito tipo	Tipo de flujo	Modelo	Volumen	Velocidad máxima	Altura máxima flujo	Altura máxima depósito	Distancia máxima recorrida	Área cubierta
			[m^3]	[m/s]	[m]	[m]	[km]	[km^2]
YLFD-06	FD	AA_YLCCmod20	300.000	25,9285	15,4389	11,36	1,12	0,18
YLFD-07		AA_YLCCmod16	715.000	28,3089	14,3010	6,83	4,66	0,70
YLCD-12	CD	AA_YLCCmod18	190.000	15,7387	7,3960	3,03	3,85	0,23
YLCD-10	CD	AA_YLCCmod13	475.000	16,1263	11,2052	5,05	5,51	0,52
YLCD-13		AA_YLCCmod11	1.660.000	26,6058	36,3032	8,70	3,90	0,68
Precipitación en 24 horas: 263 [mm]								
Depósito tipo	Tipo de flujo	Modelo	Volumen	Velocidad máxima	Altura máxima flujo	Altura máxima depósito	Distancia máxima recorrida	Área cubierta
			[m^3]	[m/s]	[m]	[m]	[km]	[km^2]
YLFD-06	FD	AA_YLCCmod19	1.950.000	39,0259	49,5492	14,23	3,14	0,79
YLFD-07		AA_YLCCmod05	4.675.000	45,5159	51,6759	28,18	4,75	1,24
YLCD-12	CD	AA_YLCCmod08	1.225.000	31,4191	21,3027	16,40	4,16	0,38
YLCD-10	CD	AA_YLCCmod09	3.120.000	22,9572	24,3186	15,35	6,83	0,90
YLCD-13		AA_YLCCmod10	10.925.000	36,4236	71,4268	25,19	5,02	1,18

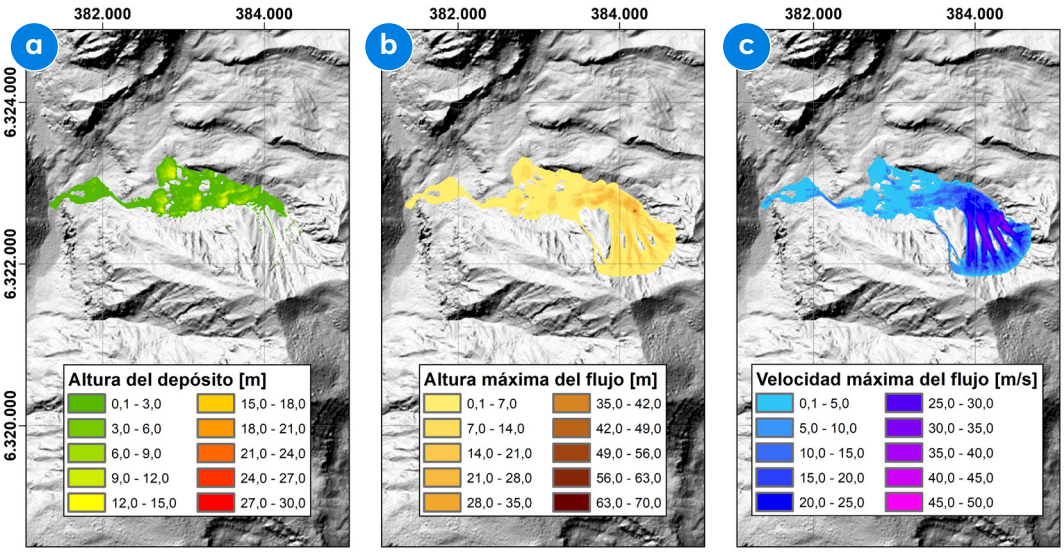


Figura 10. Modelo de flujo de detritos en la parte media y lateral de la cuenca del estero Yerba Loca. **a)** Altura del depósito modelado; **b)** Altura máxima del flujo durante su transporte; **c)** Velocidad máxima del flujo (Modelo AA_YLCCmod19 en Tabla 6).

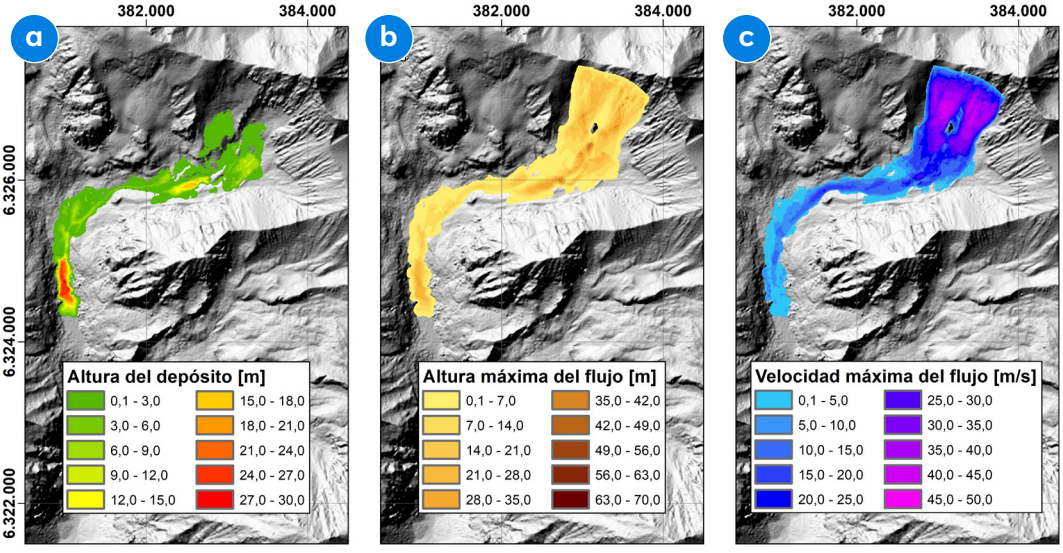


Figura 11. Modelo de flujo de detritos en la cabecera de la cuenca del estero Yerba Loca. **a)** Altura del depósito modelado; **b)** Altura máxima del flujo durante su transporte; **c)** Velocidad máxima del flujo (Modelo AA_YLCCmod05 en Tabla 6).

La Figura 12 muestra el resultado de la modelación de una crecida de detritos de pequeño volumen generada en diversos sectores de la cabecera de una quebrada secundaria lateral al valle principal. En este sector Droguett et al. (en rev.) han identificado una serie de depósitos de crecidas de detritos que demuestran una alta recurrencia de este tipo de fenómenos en tiempos geológicos recientes. Los resultados muestran

que, una vez terminada la parte inicial de alta pendiente, el flujo comienza a depositar material detrítico en casi todo el ancho del valle. Este tipo de depositación (en todo el ancho del valle) no ocurre en un sector donde existe un escalón topográfico con un escarpe de fuerte pendiente lo que origina una fuerte canalización del flujo, pero de muy corta distancia.

El resultado de la modelación de una crecida de detritos originada a partir de diversos puntos de acumulación hacia las cabeceras de la cuenca, indica que la depositación de material detrítico en este caso está fuertemente condicionada no solamente por la pendiente del cauce por el cual se transporta el flujo, sino también por la rugosidad y topografía del lecho del mismo (Figura 13). La existencia de depósitos morrénicos y glaciares de roca en el sector determinan los sectores donde puede existir mayor y menor acumulación de detritos, en especial en la cabecera, aumentando la depositación aguas abajo al presentar el lecho una morfología basal más suave y menos rugosa. En esta parte de la quebrada, tanto el flujo como el depósito resultante abarcan casi todo el ancho de la quebrada. Esto se debe principalmente a las características de este tipo de flujos, como una mayor dilución y menor concentración de partículas que los flujos de detritos (O'Brien y Julien, 1988), por lo que no sufren canalizaciones fuertes. Se puede observar también que las velocidades máximas del flujo se concentran en la parte alta de la cuenca y en el sector más canalizado, siendo de hasta 10-15 m/s y, por lo tanto, menores a aquellas asociadas a flujos de detritos en el mismo sector.

Los resultados de la modelación de una crecida de detritos generada en la parte alta de la quebrada principal de la cuenca muestran, de forma similar a los casos anteriores, la relación inversa entre velocidad y depositación de material detrítico, es decir, a mayor velocidad en la parte inicial y alta de la quebrada, la depositación es mínima, y al revés al avanzar hacia las facies distales, disminuye fuertemente la velocidad del flujo generando una mayor depositación y acumulación de material, llegando presentar fuertes espesores en la parte central (Figura 14). Al igual que para el caso anterior, se puede observar que tanto el flujo como el depósito resultante abarcan casi todo el ancho de la quebrada sin sufrir mayores canalizaciones.

Los resultados de algunos de los recorridos modelados para flujos y crecidas de detritos en la cuenca del estero Yerba Loca muestran que tanto el transporte como el recorrido de los flujos están fuertemente condicionados, como es de esperar, por la topografía y geomorfología local (Figura 15). Los principales factores que inciden son la pendiente, la presencia de

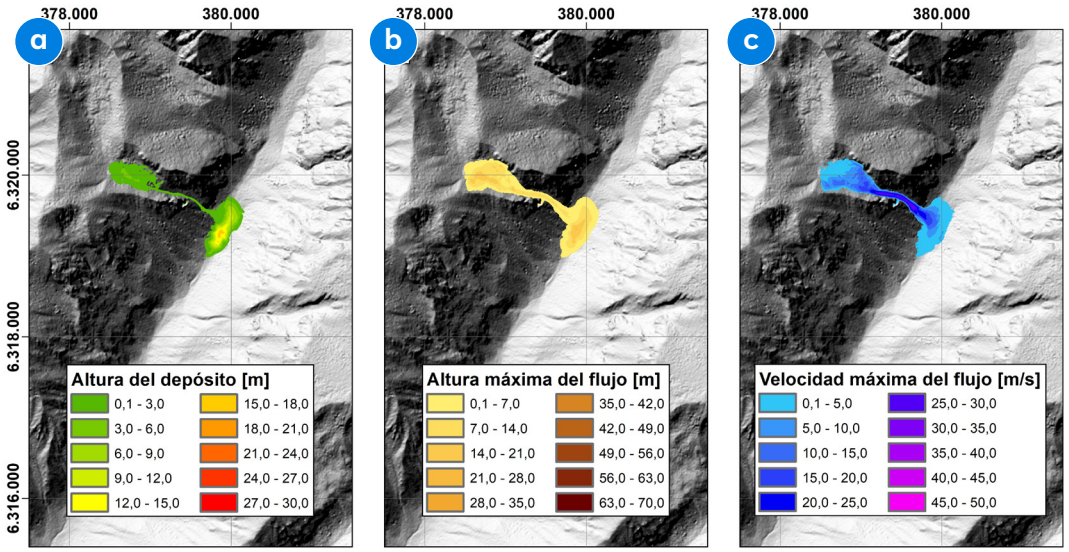


Figura 12. Modelo de crecida de detritos en la parte media y lateral de la cuenca del estero Yerba Loca. **a)** Altura del depósito modelado; **b)** Altura máxima del flujo durante su transporte; **c)** Velocidad máxima del flujo (Modelo AA_YLCCmod08 en Tabla 6).

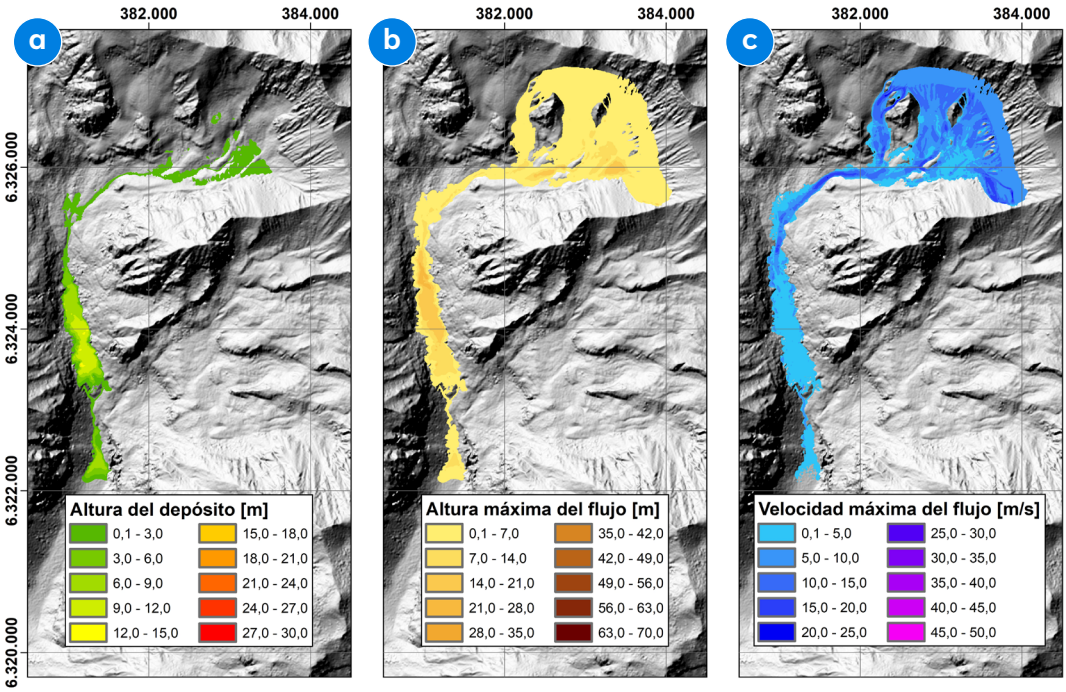


Figura 13. Modelo de crecida de detritos en la cabecera de la cuenca del estero Yerba Loca. **a)** Altura del depósito modelado; **b)** Altura máxima del flujo durante su transporte; **c)** Velocidad máxima del flujo (Modelo AA_YLCCmod09 en Tabla 6).

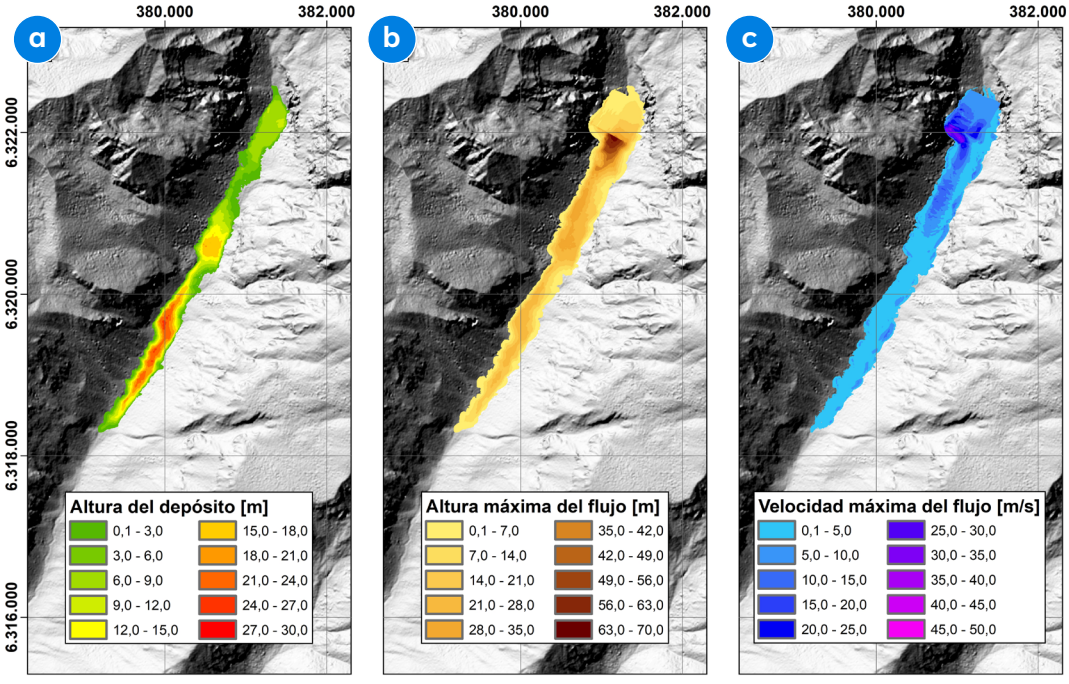


Figura 14. Modelo de crecida de detritos en la parte media y central de la cuenca del estero Yerba Loca. **a)** Altura del depósito modelado; **b)** Altura máxima del flujo durante su transporte; **c)** Velocidad máxima del flujo (Modelo AA_YLCCmod10 en Tabla 6).

llanos y quebradas, así como la rugosidad del lecho sobre el que se desplazan, tanto en la parte central de la cuenca como en las quebradas laterales que llegan a ella. Para los casos modelados a partir de la cabecera de la cuenca (Figura 15 a y c) se puede observar que el ancho del flujo, tanto para flujos como para crecidas de detritos, disminuye notablemente al aumentar el ángulo basal del lecho, en la cabecera misma de la quebrada como en los quiebres bruscos de pendiente. Asimismo, se observa que en los sectores con lechos más rugosos por la presencia de rocas y/o depósitos de morfología irregular (morrénicos y/o glaciares de roca, por ejemplo) el flujo se divide en varios brazos, los cuales en caso que la quebrada disminuya su ancho, vuelven a unirse en uno principal. Para los casos presentados de flujos modelados a partir de quebradas laterales al valle principal de la cuenca (Figura 15 b y d) se observa claramente un efecto topográfico como condicionante del transporte y recorrido de los flujos tanto para flujos como para crecidas de detritos. En ambos casos, en los sectores de fuerte pendiente, con o sin confinamiento, los flujos tienden a concentrarse en un solo recorrido principal. Esto cambia al momento de pasar por una topografía irregular o rugosa como el lecho rocoso de una pendiente o quebrada o recorrer un abanico aluvial, lugares donde el flujo de divide en diversos brazos. El recorrido de los flujos solo logra extenderse lateralmente al momento de llegar a sectores de baja y más regular pendiente.



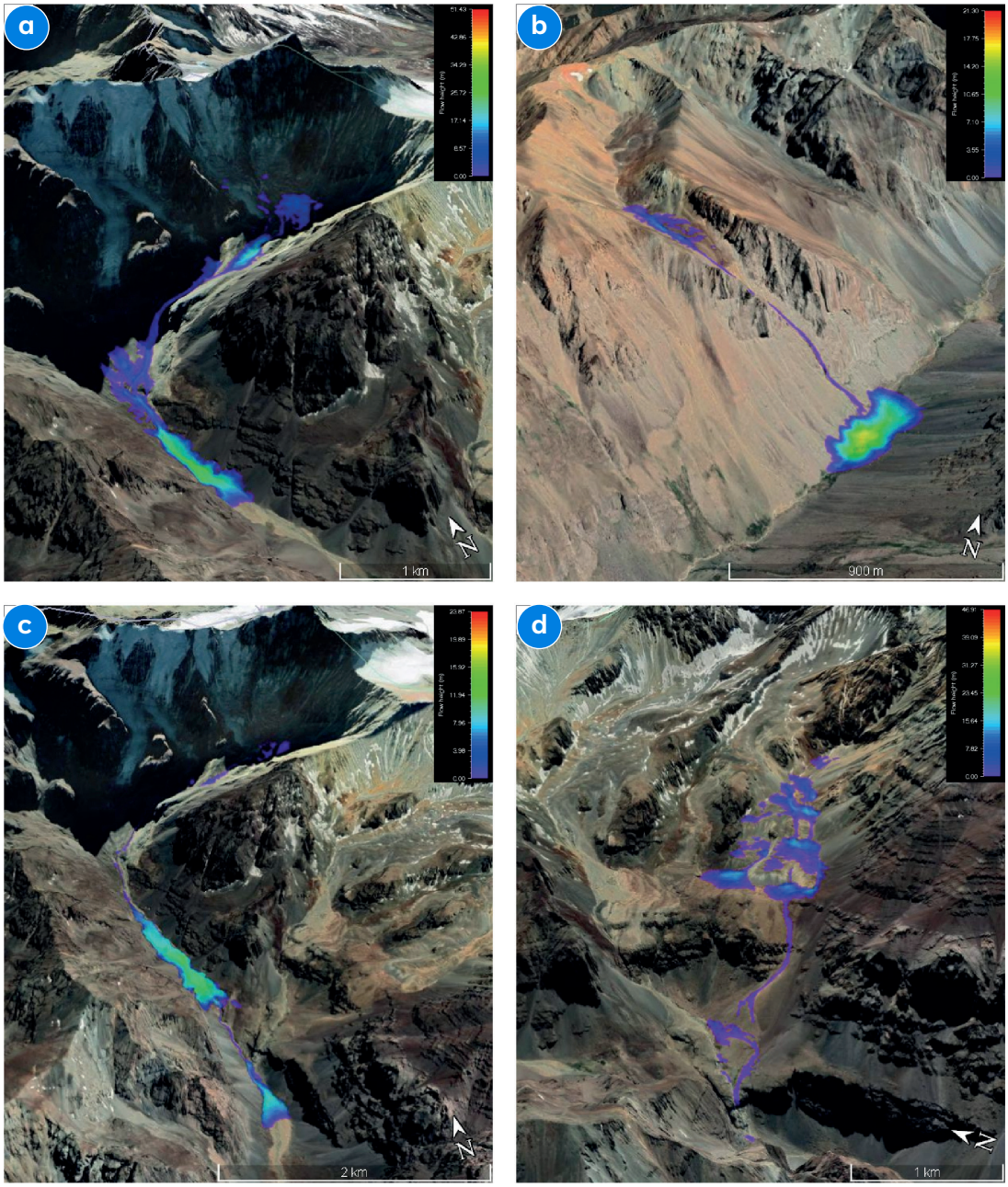


Figura 15. Recorrido de algunos flujos modelados en escenarios de Cambio Climático, cuenca estero Yerba Loca. Recorrido y efecto topográfico para algunos ejemplos de flujos y crecidas de detritos modelados con lluvias extremas en diversos sectores de la cuenca del estero Yerba Loca. **a)** Modelo AA_YLCCmod05 flujo de detritos en cabecera de la cuenca; **b)** Modelo AA_YLCCmod08 crecida de detritos en quebrada secundaria lateral O de la cuenca; **c)** Modelo AA_YLCCmod09 crecida de detritos en cabecera de la cuenca; **d)** Modelo AA_YLCCmod19 flujo de detritos en quebrada secundaria lateral ladera E parte media de la cuenca.

4. DISCUSIÓN

4.1. Tendencias climáticas en la zona

Los resultados del modelo climático presentado, muestran las mismas tendencias de la mayor parte de estos modelos a nivel internacional para esta región y también planteados por el IPCC (Doblas-Reyes et al., 2021). El modelo proyecta para la zona de estudio un aumento de la temperatura media en torno a 2 °C para el período de futuro cercano (2030–2059) y en torno a 3,8 °C hacia finales de siglo (2070–2099). En el caso de la precipitación, la proyección estima una moderada disminución a nivel promedio anual, pero muestra también una muy alta variabilidad interanual, incluso mayor que la registrada en tiempos históricos. Por lo tanto, el régimen de precipitaciones futuras en la zona estará caracterizado por la ocurrencia de años extremadamente secos con escasas a casi nulas precipitaciones, intercalados con años extremadamente lluviosos. No obstante a lo anterior, el número de eventos de precipitación en un año tiende a disminuir y, como consecuencia de ambos factores, en los años lluviosos los eventos de precipitación serían más intensos, es decir, se acumularán grandes volúmenes de agua precipitada en cortos períodos de tiempo. Sumado a lo anterior, se proyecta que los eventos de precipitación intensa tenderían a ocurrir durante días más cálidos y, por lo tanto, la mayor parte de estas precipitaciones lo haría en forma líquida en sectores donde hoy ocurren precipitaciones sólidas. Dichos eventos harían aumentar, a su vez, las áreas de captación hídrica y, por ende, el volumen de agua líquida disponible. Esta condición ciertamente tendrá impactos significativos en la hidrología de las cuencas precordilleranas y cordilleranas y, en particular, de aquellas con gran diferencia topográfica donde hoy los eventos de precipitación tienen porcentajes mezclados en términos de su relación líquida/sólida. Todo lo anterior, generará importantes volúmenes de agua líquida disponible para escorrentía en cortos períodos de tiempo en suelos que, dado su nivel de degradación, no podrán soportar con la infiltración. En consecuencia, la alta disponibilidad de material detrítico en estos valles precordilleranos se sumará a grandes volúmenes de agua líquida en superficie en cortos períodos de tiempo durante estos eventos, lo cual aumenta notablemente el peligro de generar flujos y crecidas de detritos en el sector.

4.2. Sistema hidrológico

Muchas cuencas hidrográficas chilenas son altamente susceptibles a inundaciones y sequías. Por otra parte, la infraestructura asociada a los recursos hídricos está muy afectada por eventos que generan acumulación de sedimentos en las cuencas (Saldías et al., 2016; Garreaud et al., 2017). La sedimentación extrema puede, incluso, crear una escasez generalizada del suministro de agua (Andreoli et al., 2012), a veces durante semanas. Por otra parte, un tercio de la población de Chile se encuentra en su ciudad capital, Santiago (ca. 7 millones de habitantes (INE, 2017)), que depende en gran medida del suministro de agua provisto por algunas cuencas de cabecera cordillerana, dentro de las cuales la más importante corresponde a la cuenca del río Maipo de la cual forma parte la cuenca del estero Yerba Loca. La intensificación de calentamiento en las zonas más altas de la cordillera y, en particular, en la zona de estudio (pre-cordillera y cordillera de Chile central) puede ser interpretado como un signo del fenómeno reconocido como calentamiento dependiente de la altura. Este proceso discutido a nivel internacional (p.e. Pepin et al., 2015) corresponde a un acelerado calentamiento de las zonas de altura en regiones de montaña como resultado de las interacciones que ocurren entre la superficie y la atmósfera. De manera más específica, el aumento de las temperaturas acelera el derretimiento de la cobertura de nieve, estos cambios en la cobertura de nieve alteran, a su vez, el albedo de la superficie y como resultado el balance radiativo a nivel de superficie (Figura 16). Además, condiciones más cálidas y áridas en altura tienen un efecto en la demanda evaporativa de la atmósfera con consecuencias en el ciclo hidrológico, y esto a su vez tiene un efecto en la atmósfera. Sobre la base de los resultados de este estudio, es de esperar que este tipo de fenómenos ocurran en la cordillera de los Andes y, por lo tanto, cambios significativos en el ciclo hidrológico son esperables, aun cuando los cambios en la precipitación media anual no sean tan relevantes en magnitud. Es decir, a pesar de que el modelo no proyecta una disminución importante en las precipitaciones acumuladas anuales en las próximas décadas para esta zona, el sistema hidrológico se verá fuertemente afectado de todas formas debido, principalmente, a los efectos desencadenados en las partes altas de las cuencas hidrográficas por el aumento de la temperatura.

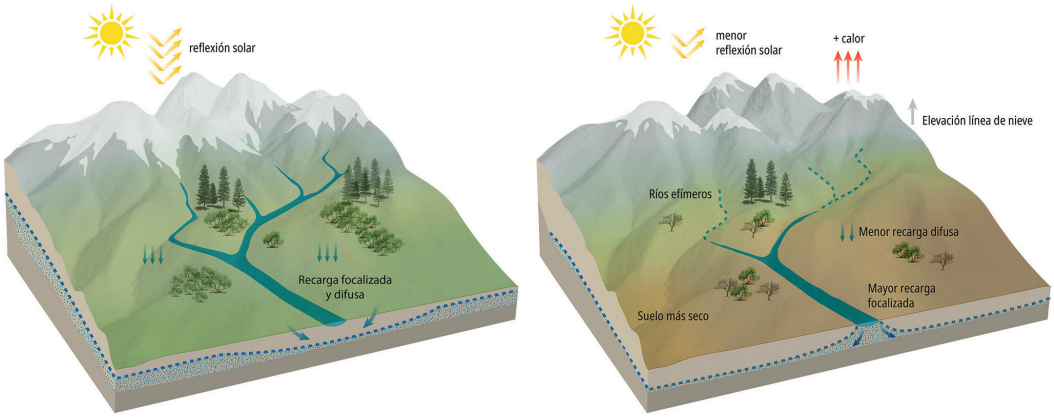


Figura 16. Esquema de los efectos del cambio climático en el sistema hidrológico de montaña. Entre ellos mayor focalización de la recarga hídrica, mayor desecación del suelo, menor reflexión solar y aumento de la altitud de la línea de nieve (Modificado de Siirila-Woodburn et al., 2021).

4.3. Frecuencia y magnitud de eventos extremos de precipitación

Las remociones en masa desencadenadas por lluvias intensas son comunes en zonas montañosas debido principalmente a las altas pendientes y a la abundancia de material detrítico disponible para ser removilizado. En las últimas décadas y, acompañado de los efectos de los cambios climáticos globales, las principales remociones en masa en el sector precordillerano y cordillerano de Chile central han sido gatilladas por eventos hidrometeorológicos (p.e. Naranjo y Varela, 1996; Hauser, 2000; Sepúlveda et al., 2015; Guerrero, 2019). Los datos obtenidos del análisis estadístico realizado en este estudio indican que la frecuencia de eventos hidrometeorológicos intensos, por sobre 20 mm en 24 horas se incrementará de forma notable en las próximas décadas. Este aumento en la frecuencia de precipitaciones intensas ocurriría a pesar de la tendencia global de una disminución de las precipitaciones anuales para esta zona del planeta.

Para el período Futuro cercano (años 2030 a 2059) el modelo climático proyecta un aumento consistente en todas las localidades cercanas al área de la cuenca del estero Yerba Loca (Loc. 1 a 4 en Figura 1) entre 13 y 37 eventos de precipitación superiores a 60 mm en 24 horas con respecto al período histórico. Este aumento persiste y es aún mayor incluso para el período Futuro lejano, variando de 38 a 75 eventos en el área (Tabla 2). La misma tendencia ocurre para los eventos más extremos de precipitación (>120 mm; Tabla 1) donde varían de 0 a 11 en el período histórico, aumentando entre 12 y 26 en el futuro lejano. Si se observa los eventos por sobre 20 mm en 24 horas, el aumento es incluso más dramático, puesto que se pasa de 13-128 en el período histórico (para las localidades cercanas a la cuenca de Yerba Loca) a 63-173. Es decir, las lluvias intensas por sobre 20 mm en 24 horas serán mucho más frecuentes en las próximas décadas e, incluso, ocurrirán con mayor frecuencia eventos de precipitación extrema por sobre 120 mm en 24 horas. Es más, los eventos de máxima precipitación en 24 horas proyectados para los períodos Futuro cercano y Futuro lejano son del orden de 230 y 260 mm, respectivamente. En ambos casos corresponden a eventos de extrema precipitación en cortos períodos de tiempo, sin precedentes en el registro reciente del área.

Si el aumento en la frecuencia de ocurrencia de lluvias intensas ya es un factor preocupante en términos de la eventual generación de remociones en masa hídricas, esto se ve intensificado por el hecho que el modelo también proyecta para las próximas décadas, un desplazamiento de estos eventos hacia los meses de otoño y primavera (Tabla 3) e, incluso, hacia algunos meses de invierno. Es decir, numerosos de estos eventos, que ocurren habitualmente en meses fríos de otoño e invierno, ahora ocurrirán durante días con temperaturas sobre 0 °C (Tabla 4), lo que implica que las precipitaciones serán esencialmente líquidas y no sólidas en esta zona. Todo lo anterior se traduce

en que las áreas de captación, durante estos eventos de precipitaciones intensas "cálidos", serán mucho mayores que en la actualidad y, por ende, aumentará la frecuencia de generación flujos y crecidas de detritos en el sector, los que además serán probablemente de mayores volúmenes a los registrados históricamente debido al mayor volumen de agua disponible en cortos períodos de tiempo. Esto podría implicar la formación de flujos y crecidas de detritos sin precedentes en el registro geológico reciente en términos de volumen (volumen agua + volumen de detritos).

4.4. Modelamiento y áreas de afectación

El modelamiento de remociones en masa, mediante técnicas análogas y computacionales es una herramienta de larga data y creciente uso tanto en el ámbito académico como profesional (p.e. Iverson et al., 1992; Major, 1997; Castruccio y Clavero, 2015; Mikos y Bezak, 2021), y constituye una contribución al conocimiento de la dinámica de estos flujos y también para el diseño de obras de mitigación y planes de prevención, así como para instrumentos de ordenamiento del territorio (p.e. Wilford et al., 2004; Fávero et al., 2020; Lee et al., 2020).

En este estudio se tomó como base la información del inventario de remociones en masa del sector (Droguett et al., en rev.) con el objetivo de plasmar el modelamiento a la magnitud y tipo de fenómenos preservados en el registro geológico. Los datos de esos sirvieron para determinar los parámetros principales de modelación, delimitar las áreas de captación y, con ello, poder determinar un volumen de agua equivalente a las microcuencas de captación para cada flujo modelado. Si bien en algunos casos los flujos modelados son claramente más voluminosos a los que ya han ocurrido en el área, esto se explica por el efecto del volumen de agua disponible, condicionado solo por la magnitud del evento de precipitación y no por el área de captación u otros parámetros físicos de los depósitos. Si bien se obtiene un resultado intuitivo en el sentido que los volúmenes de los flujos esperados para los casos extremos de precipitación proyectados son mucho mayores que los encontrados en el registro geológico reciente e histórico en el área, los resultados de la modelación en términos de distribución y alcances están bien calibrados y fundamentados.

Los resultados de los modelos de flujos y crecidas de detritos tipo realizados en la cuenca del estero Yerba Loca indican que, para el evento de precipitación más recurrente proyectado en zona para las próximas décadas (40 mm en 24 horas), los volúmenes esperados serán entre 1,5 y 2 veces aquellos determinados en el registro geológico reciente. Esto sugiere que, para un sector geomorfológicamente dinámico como es la cuenca precordillerana del estero Yerba Loca, este tipo de fenómenos será más recurrente y abarcaría prácticamente toda la extensión del valle principal y numerosas de sus quebradas secundarias laterales, en uno o varios eventos hidrometeorológicos.

Por otra parte, para el caso del evento de precipitación más extremo proyectado para la zona en las próximas décadas (263 mm en 24 horas), los volúmenes de flujos y crecidas se estima serán entre 4 y 10 veces superiores a los preservados en el registro geológico en la cuenca de Yerba Loca. Intuitivamente, esto llevaría a pensar que la distancia recorrida por los flujos será directamente proporcional a este mayor volumen; sin embargo, dada la dinámica de este tipo de flujos con altas concentraciones de partículas (p.e. Pierson et al., 1990; Iverson, 1997; Rickenmann, 1999), esta distancia está fuertemente condicionada por la topografía y por la rugosidad del lecho por el que descienden, entre otros factores (Iverson, 1997). Por lo anterior, los resultados de los modelos realizados indican que, si bien los flujos proyectados de mayor volumen recorrerán también mayores distancias aguas abajo, esta distancia no resulta directamente proporcional a este aumento de volumen, ya que una gran parte de este se acomodará en espesores mucho mayores de los depósitos resultantes, lo que es más evidente para los flujos de detritos. Para el caso de las crecidas de detritos, al ser flujos algo más diluidos y, por ende, tener menores concentraciones de partículas (p.e. Pierson et al., 1990; Iverson, 1997; Rickenmann, 1999), los resultados de los modelos muestran que las crecidas abarcarán casi todo el ancho del valle principal cuando son generadas en este y que, en las quebradas secundarias, su trayectoria se verá condicionada por la pendiente y rugosidad del lecho. Cabe indicar eso así que, dada la naturaleza de estos flujos y el tipo de modelo utilizado (fase única), los recorridos se refieren a la depositación principal del flujo con un fuerte componente detrítico, por lo que fases esencialmente hídricas asociadas a estos, seguirán aguas abajo por el valle durante eventos que generen este tipo de fenómenos, pudiendo aumentar el caudal del estero.



5. CONCLUSIONES

En la zona de Chile central donde se localiza la cuenca del estero Yerba Loca, el modelo climático proyecta un aumento de la temperatura media en torno a 2 °C para el período de futuro cercano (2030–2059) y en torno a 3,8 °C hacia finales de siglo (2070–2099). En el caso de la precipitación, la proyección estima una ligera disminución global de la precipitación promedio anual; sin embargo, la variabilidad interanual de la precipitación tendería a aumentar, con la ocurrencia de algunos años extremadamente secos y otros años con abundantes precipitaciones. Estas últimas, además, estarán concentradas en cortos períodos de tiempo dando lugar a eventos puntuales de precipitaciones extremas, por sobre los 20 mm en 24 horas. Estos eventos de precipitaciones intensas a extremas, a su vez, serán cada vez más frecuentes en el futuro, incluso en los meses de otoño, invierno y primavera con temperaturas atmosféricas altas, lo cual aumentará las áreas de captación y, por ende, el volumen de agua líquida disponible en cortos períodos de tiempo. Lo anterior, sumado a una menor disponibilidad hídrica del suelo a nivel global en la zona, mayor disponibilidad de material detrítico y al retroceso que están sufriendo los glaciares, contribuirá a aumentar la frecuencia de generación de flujos y crecidas de detritos en la zona. Los modelos de flujos y crecidas asociados a estos futuros eventos de precipitación intensa indican que los volúmenes esperados, en los casos más extremos, serán notablemente mayores a los ocurridos en tiempos recientes en el área y, por ende, se proyecta que sus alcances sean ligeramente mayores y abarquen áreas más extensas valle abajo, aunque una buena parte del acomodo del mayor volumen se verá reflejado en un notable aumento de la altura de los depósitos resultantes. Por otra parte, las velocidades y alturas de los flujos durante su transporte serán mucho mayores, lo que implica un mayor riesgo de afectar eventual infraestructura en el valle.

Como sociedad debemos adaptarnos rápidamente para enfrentar los desafíos que nos impone el cambio climático en diversos ámbitos, tanto en términos de disponibilidad del recurso hídrico para consumo humano, para consumo industrial, así como en la planificación del territorio en relación al recurso agua y otros efectos asociados al clima, como es la generación de remociones en masa desencadenadas por eventos hidrometeorológicos. Así también, es clave aumentar la resiliencia de la sociedad en relación a las consecuencias derivadas de los cada vez más recurrentes eventos de precipitación extrema que, entre otros efectos, generarán flujos y crecidas de detritos que ya han tenido enormes efectos en la vida de millones de personas a nivel mundial (p.e. Inventario DesInventar, www.desinventar.org). Los resultados derivados de esta investigación contribuyen al conocimiento de este tipo de fenómenos geológicos peligrosos y de sus eventuales alcances y futuras recurrencias en la precordillera de Chile central. Las proyecciones climáticas futuras indican que estos eventos serán cada vez más recurrentes, por lo que es esencial tomar en consideración los alcances y volúmenes que flujos y crecidas de detritos podrán tener en el futuro para desarrollar e implementar el diseño de obras de mitigación y planes de prevención ante este tipo de fenómenos geológicos peligrosos

y así disminuir los riesgos asociados a su ocurrencia. De misma forma, es urgente desarrollar sistemas de monitoreo conjunto de variables hidrometeorológicas y geológico-geomorfológicas que ayuden a mejorar los modelos predictivos de remociones en masa hídricas, que permitan implementar sistemas de alerta temprana efectivos en sitios de interés precordilleranos y cordilleranos de Chile central.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto de investigación ***Remociones en masa en escenarios de Cambio Climático en Chile central,*** ha sido financiado por Anglo American a través de la Gerencia de Control y Proyectos Ambientales, a quien se agradece su permanente apoyo para el desarrollo y publicación de los resultados. Se agradece, además, a R. Quiroga y F. Salgado por sus contribuciones en terreno y en el procesamiento estadístico de datos climáticos. Los autores agradecen especialmente a Fabiola Orrego (CAPES) por su voluntad y valiosos aportes en la revisión de este manuscrito.

REFERENCIAS

Adam, J. C., Hamlet, A. F., y Lettenmaier, D. P. (2009). Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the twenty-first century. *Hydrological Processes: An International Journal*, *23*(7), 962-972.

Andreoli, A., Mao, L., Iroumé, A., Arumí, J., Nardini, A., Pizarro, R., Caamaño, D., Meier, C., y Link, O. (2012). The need for a hydromorphological approach to Chilean river management. *Revista Chilena de Historia Natural*, *85* (3), 339-343.

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Figueroa, C. R., Uribe, J. M., y Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, *54*, 4309–4330. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4

Bambach, N. E., Rhoades, A. M., Ullrich, P. A., y Zarzycki, C. M. (2021). Projecting climate change in South America using variable-resolution CESM: An application to Chile. *International Journal of Climatology* (Aceptado). https://doi.org/10.1002/joc.7379

Bartelt, P., Bieler, C., Bühler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Graf, C., McArdell, B., Salz, M., y Schneider, M. (2013). *A numerical model for debris flows in research and practice*. RAMMS User Manual v. 1.5 Debris Flow.

Bozkurt, D., Rondanelli, R., Garreaud, R., y Arriagada, A. (2016). Impact of Warmer Eastern Tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama Floods. *Monthly Weather Review*, *144*(11), 4441-4460. https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0041.1

Castruccio, A., y Clavero, J. (2015). Lahar simulation at active volcanoes of the Southern Andes: implications for hazard assessment. *Natural Hazards*, *77*, 693-716. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1617-x

Clavero, J., Droguett, B., Pérez, W., Vidal, P., Briceño, I., Tamayo, A., y Kovacic, I. (2019). *Modelling debris Flow/Debris flood Hazards under Climate Change scenarios in the Andes Cordillera of central Chile*. In 27th General Assembly 2019 – IUGG 2019, Symposium: JC03 - Mountain Cryosphere Hazards (IACS, IAVCEI), July 8-18, Montréal, Canada.

Cruden, D. (1991). *A simple definition of a landslide*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur. 43. http://doi.org/10.1007/BF02590167.

Doblas-Reyes, F. J., Sörensson, A. A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W. J., Haarsma, R., Hamdi, R., Hewitson, B., Kwon, W. T., Lamptey, B. L., Maraun, D., Stephenson, T. S., Takayabu, I., Terray, L., Turner, A., Zuo, Z. (2021). Linking Global to Regional Climate Change. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*). Cambridge University Press.

Droguett, B., Vidal-Páez, P., Clavero, J., Pérez-Martínez, W., Briceño-de-Urbaneja, I., Ramírez, V., y Tamayo, A. (en rev.). Heavy rain-induced debris flow/flood hazards at a geomorphologically active Andean valley: the case of the Yerba Loca basin, Central Chile. Submitted to Andean Geology.

Fávero, A. H., Askarinejad, A., Springman, S. M., y Borja, R. I. (2020). Simulation of debris flow on an

instrumented test slope using an updated Lagrangian continuum particle method. *Acta Geotechica, 15*, 2757–2777. https://doi.org/10.1007/s11440-020-00957-1

Garreaud, R. D., y Viale, M. (2014). Análisis de los fenómenos meteorológicos y climáticos que afectan la cuenca del río Maipo. *Aquae Papers, 5*, 17–29.

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., y Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology & Earth System Sciences, 21*(12), 6307-6327.

Garreaud, R. D., Vergara, I., y Viale, M. (2021). *Análisis: ¿Una tormenta de invierno en pleno verano? Entendiendo el extraordinario evento de finales de enero de 2021 en Chile central*. Center for Climate and Resilience Research (CR2). Santiago, Chile.

Guerrero, L. (2019). *Dinámica y modelamiento numérico de las crecidas de detritos ocurridas en febrero de 2017 en sector El Volcán-Baños Morales, San José de Maipo, Chile* (Tesis de pregrado). Universidad Mayor, Santiago.

Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile* (versión actualizada). Boletín 59. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Huang, X., y Ullrich, P. A. (2017). The changing character of 21st century precipitation over the western United States in the variable-resolution CESM. *Journal of Climate*, http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0673.1

Instituto Nacional de Estadística. (2017). *Resultados censo de población y vivienda 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.

Iverson, R. M., Costa, J. E., y LaHusen, R. G. (1992). Debris-flow flume at H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon. *U.S. geological Survey Open File Report*, 92-483. https://doi.org/10.3133/ofr92483

Iverson, R. (1997). The physics of debris flows. *Reviews in Geophysics, 35*(3), 245-296.

Lee, M., Cho, J., y Yoon, H. (2020). Quantitative risk analysis of debris flow disasters in urban area using Geographic Information System. *Sensors and Materials, 32*(12), 4573–4586. https://doi.org/10.18494/SAM.2020.3134

Major, J. J. (1997). Deposition processes in large-scale debris-flow experiments. *Journal of Geology, 105*, 345-366.

MAP-GAC. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Multinacional No. 4.

Mikos, M., y Bezak, N. (2021). Debris flow modelling using RAMMS model in the Alpine environment with focus on the model parameters and main characteristics. *Frontiers in Earth Sciences, 8*, 605061. https://doi.org/10.3389/feart.2020.605061

Moreiras, S. M., Sepúlveda, S. A., Correas-González, M., Lauro, C., Vergara, I., Jeanneret, P., Junquera-Torrado, S., Cuevas, J. G., Maldonado, A., Antinao, J. L., y Lara, M. (2021). Debris flows occurrence in the semiarid central Andes under Climate Change scenario. *Geosciences, 11*(2), 43. https://doi.org/10.3390/geosciences11020043

Moritz, M. A., Parisien, M. A., Batllori, E., Krawchuk, M. A., Van Dorn, J., Ganz, D. J., y Hayhoe, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere, 3*(6), 1-22.

Moss, R. H., Babiker, M., Brinkman, S. Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kalleher, J., Lamarque, JF., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neil, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weeyant, J., Wilbakns, T., van Ypersele, J.P. y Zurek, M. (2008). *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies*. Intergovernmental Panel for Climate Change Expert Meeting Report. Geneva, Switzerland.

Naranjo, J. A., y Varela, J. (1996). *Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago, el 3 de mayo de 1993*. Boletín, 47. Servicio Nacional de Geología y Minería.

O'Brien, J. S., y Julien, P. Y. (1988). Laboratory analysis of mud flow properties. *Journal of Hydraulic Engineering, 114*(8), 877–887. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877)

Parodi, E., Kahhat, R., y Vásquez-Rowe, I. (2021). Multi-dimensional damage assessment (MDDA): A case study of el Niño Flood disasters in Peru. *Climate Risk Management*, *33*, https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100329

Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H., Baraër, M., Caceres, E., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M., Liu, X., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahedanova, M., Wang, M. B., Willaimson, A. N., Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature climate change*, *5*, 424-430. https://doi.org/10.1038/nclimate2563

Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., y Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Columbia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *41*, 17–66.

Poveda, G., Espinoza, J., Zuluaga, M., Solman, S., Garreaud, R., y van Oevelen, J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science, 8*, 162. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00162

Rhoades, A. M., Ullrich, P. A., Zarzycki, C. M., Johansen, H., Margulis, S. A., Morrison, H., Xu, Z., y Collins, W. (2018). Sensitivity of mountain hydroclimate simulations in variable-resolution CESM to microphysics and horizontal resolution. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *10*, 1357-1380. https://doi.org/10.1029/2018MS001326

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards, 19*, 47–77. https://doi.org/10.1023/A:1008064220727

Saldías, G. S., Largier, J. L., Mendes, R., Pérez-Santos, I., Vargas, C. A., y Sobarzo, M. (2016). Satellite-measured interannual variability of turbid river plumes of central-southern Chile: Spatial patterns and the influence of climate variability. *Progress in Oceanography*, *146*, 212–222.

Sepúlveda, S. A., Moreiras, S. M., Lara, M., y Alfaro, A. (2015). Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides*, *12*, 115-133. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0539-0

Sepúlveda, S., Alfaro, A., Lara, M., Carrasco, J., Olea-Encona, P., Rebolledo, S., y Garcés, M. (2020). An active large rock slide in the Andean paraglacial environment: the Yerba Loca landslide, central Chile. *Recent landslides*, 18, 697-705. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01564-7

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019). *Remoción en masa en el Santuario de Yerba Loca*. Informe Técnico. Subdirección Nacional de Geología, Unidad de Asistencias Técnicas y Emergencias Geológicas.

Siirila-Woodburn, E. R., Rhoades, A. M., Hatchett, B. J., Huning, L. S., Szinai, J., Tague, C., Nico, P. S., Feldman, D. R., Jones, A. D., Collins, W. D., y Kaatz, L. (2021). A low-to-no snow future and its impacts on water resources in the western United States. *Nature Reviews Earth & Environment, 2*, 800-819. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00219-y

Tramblay, Y., Llasat, M. C., Randin, C., y Coppola, E. (2020). Climate change impacts on water resources in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, *20*(83), 4–6. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01665-y

Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, *47*(1-2), 123-138.

Walter, F., Amann, F., Kos, A., Kenner, R., Phillips, M., de Preux, A., Huss, M., Tognacca, C., Clinton, J., Diehl, T., y Bonanomi, Y. (2020). Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*, *351*, 106933. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933

Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., y Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, *1*, 61–66. https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0

Wu, C., Liu, X., Lin, Z., Rhoades, A. M., Ullrich, P. A., Zarzycki, C. M., Lu, Z., y Rahimi-Esfarjani, S. R. (2017). Exploring a variable resolution approach for simulating regional climate in the Rocky Mountain region using the VR-CESM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(20), 10939–10965.

GLOSARIO

Remoción en masa: movimiento ladera abajo de una masa de roca, detritos o tierra, bajo la influencia de la gravedad. Se suelen clasificar según tipo de movimiento y tipo de material, lo que da como resultado cinco clases principales: caídas, vuelcos, deslizamientos, flujos, propagaciones laterales y reptaciones, siendo los flujos aquellos que se caracterizan por un mayor contenido de agua durante el transporte.

Lluvia intensa: precipitaciones líquidas abundantes que ocurren en un corto período de tiempo en una zona determinada. Los umbrales de precipitación a considerar dependen de otros factores como topografía, cobertura vegetacional, cota de la isoterma 0 °C, temperatura atmosférica al momento de ocurrir las precipitaciones, lluvias antecedentes entre otros.

Cambio Climático. Se refiere a los cambios que sufre el clima en una región determinada identificado mediante cambios de variables climáticas por algunas décadas o más. También puede referirse a la persistencia o frecuencia de ocurrencia de eventos climáticos y meteorológicos extremos.

RCP 8.5: corresponde al Escenario o Trayectoria de Concentración Representativa para una serie de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases químicamente activos. El RCP 8.5 se refiere a la concentración de carbono que genera un calentamiento global a un promedio de 8,5 watts/m^2 en el planeta. El escenario RCP 8.5 generará un incremento aproximado de 4,3 °C al año 2100, en relación a la temperatura del planeta pre-era industrial.

Flujo de detritos. flujo saturado en detritos, rápido a extremadamente rápido, que viaja por un canal/quebrada de alta pendiente. Durante la trayectoria el flujo tiene una alta capacidad de arrastre de material y agua desde el lecho. Suelen ser fenómenos peligrosos muy extendidos en terreno montañosos y se diferencian de otros tipos de remociones en masa en que pueden ocurrir de forma periódica por canales establecidos.

Crecida de detritos. Flujo hídrico muy rápido y con una carga de detritos muy alta que se trasporta por un canal/quebrada de alta pendiente. Se forman como producto de eventos de inundación extremos en quebradas (canales de alta pendiente que desestabilizan el lecho y generan el arrastre masivo de sedimentos).