

	C2

**Evaluación de multiamenazas como
fundamento de la gestión**

C2

Evaluación de multiamenazas como fundamento de la gestión¹

Roberto Moris y otros^(a)

Abstract

Chile es un país que debe enfrentar múltiples amenazas de origen natural y su alta exposición al cambio climático. Si bien cuenta con una consolidada cultura sísmica fuertemente relacionada al robustez de las normas y prácticas de mitigación, no existe consciencia plena de la multiplicidad de amenazas a considerar en la gestión. Los procesos de toma de decisión se han perfeccionado en cuanto a gestión de riesgos, en especial a partir del terremoto tsunamigénico de 2010. Estas mejoras han estado acompañadas de una mejor y diversa información científica y una mayor experiencia en la gestión de emergencias y recuperación debido a la alta recurrencia de eventos entre 2005 y 2017. Se presenta la experiencia de la Cuenca del Río Salado, provincia de Chañaral en la Región de Atacama frente a las inundaciones de 2015 y 2017. El “Informe de Misión Científica CIGIDEN en ciudades de Chañaral, Diego De Almagro y Taltal” da cuenta de la misión postdesastre realizada a tres días del evento hidrometeorológico extraordinario de los días 24, 25 y 26 de marzo de 2015 que afectó a las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Este informe entregado a las autoridades sectoriales, regionales y comunales el 20 de abril de 2015 incidió en varios aspectos en las decisiones de recuperación de los primeros días, semanas y meses. Uno de las recomendaciones fue contar con estudio de multiamenazas en el corto plazo. El “Estudio de amenazas de las localidades urbanas de la cuenca del río Salado, Chañaral, el Salado y Diego de Almagro, en la Región de Atacama” financiado con aportes de la Corporación Nacional del Cobre CODELCO permitió contar con una mirada de multiamenazas del territorio afectado. Este análisis integró antecedentes múltiples (registros históricos, cultura local, visitas técnicas, análisis de laboratorio y datos de estaciones meteorológicas) para la comprensión del comportamiento de la zona y las proyecciones ante distintos escenarios. El posterior aluvión de mayo de 2017 demostró que las modelaciones eran coherentes con ese tipo de evento costero afectó más a quebradas que el evento de acumulación en montaña de 2015 que activó el Río Salado. También se demostró en el caso de las modelaciones de inundación de Diego de Almagro la importancia de la observación en el lugar en la calibración de las modelaciones. Este estudio fue insumo para los estudios fundados de riesgo de la posterior actualización de los instrumentos de planificación territorial de la provincia.

Palabras clave: estudios multiamenazas, inundaciones, Atacama, riesgos

¹ Documento desarrollado en base a informes realizados en 2015 y 2016 como parte del proceso de recuperación postdesastre de las inundaciones de marzo de 2015 en la Región de Atacama en Chile.

- Informe 1: González, G. Moris, R., Escauriaza, C., Ovalle, C., Riquelme, R., del Río, I., Jordán, M., Cienfuegos, R. & Gironás, J. (2015) Informe de misión científica CIGIDEN de ciudades de Chañaral, Ciego de Almagro y Taltal. Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales.
 - Informe 2: Moris, R., Bergamini, K., Walker, R., Sáez, E., Ledezma, C., Ovalle, C., Cienfuegos, R., Gironás, J., Escauriaza, C. Lucero, F. & Sandoval, J. (2016) Estudio de amenazas de las localidades urbanas de la cuenca del río Salado, Chañaral, el Salado y Diego de Almagro, en la Región de Atacama. Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales y Observatorio de Ciudades UC. Corporación Nacional del Cobre de Chile.
- (a) González, G. Escauriaza, C., Ovalle, C., Riquelme, R., del Río, I., Jordán, M., Cienfuegos, R. & Gironás, J., R., Bergamini, K., Walker, R., Sáez, E., Ledezma, C., Ovalle, C., Cienfuegos, R., Escauriaza, C. Lucero, F. & Sandoval, J.

1. Informe de misión científica postdesastre en Atacama.

Ciudades de Chañaral, Diego De Almagro y Taltal.

29.03. 2015 – 31.03.2015

Integrantes de la misión

- Gabriel González (Geólogo UCN, IP L1)
- Roberto Moris (Arquitecto Planificador Urbano UC, IP L5)
- Cristián Escauriaza (Ingeniero Hidráulico UC, IA L2)
- Carlos Ovalle (Ingeniero Geotécnico UC)
- Rodrigo Riquelme (Geólogo UCN)
- Ian del Río (Estudiante de Doctorado UCN)
- Maria Teresa Jordan (Cornell University)

Investigadores que participaron en el análisis

Rodrigo Cienfuegos (Ingeniero Hidráulico UC, IP L2)

Jorge Gironás (Ingeniero Hidráulico UC, IA L2)

Introducción

El presente informe ha sido desarrollado por investigadores de CIGIDEN e investigadores vinculados a las universidades que lo conforman. El centro CIGIDEN como Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales tiene como objeto generar conocimiento para la reducción de riesgos y el fortalecimiento de la resiliencia.

Este informe da cuenta de los primeros antecedentes recopilados y analizados durante los primeros días con posterioridad al evento hidrometeorológico extraordinario de los días 24, 25 y 26 de marzo de 2015 que afectó a las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Estos primeros resultados sobre las características del fenómeno y sus impactos en las ciudades de Chañaral, Diego de Almagro y Taltal, será complementado a futuro con nuevos análisis relacionados a cálculos de isotermas, cálculos de volúmenes de masa, cálculos de caudales y escurrimientos, comportamiento de los flujos, etc.

Esta primera misión científica de los días 29 y 31 de marzo concentró sus observaciones de campo en Taltal, Chañaral y Diego de Almagro. Un segundo informe abordará los resultados de la segunda misión realizadas entre los días 7 y 11 de abril a la zona de Copiapó, Paipote y Tierra Amarilla.²

1.1 Observaciones generales

1.1.1 Respecto a los fenómenos asociados al evento:

Una de las características principales observadas en la visita es que las precipitaciones generaron muy escasa remoción en masa en las cuencas de drenaje de la Cordillera de la Costa y en aquellas ubicadas en las inmediaciones de Diego de Almagro. Por lo tanto, se puede inducir que el agua resultó de precipitaciones concentradas en la Precordillera en cotas superiores a la altura de Diego de Almagro (700-800 m sobre el nivel del mar), es muy probable que incluso por sobre alturas de 2800-3000 m sobre el nivel del mar. En la imagen

² En esta segunda misión integrada por Roberto Moris (7-11 de abril de 2015), Paula Repetto (8-11 de abril de 2015) y Nicolás Bronfman (8-11 de abril de 2015). El proyectado segundo informe no se realizó en el formato del primer informe de misión, sino que se optó por transformarlo en el trabajo de base una investigación sobre la respuesta de las comunidades realizada por los investigadores Paula Repetto, Nicolás Bronfman (Bronfman et al., 2019) y Manuel Tironi.

1 se muestra la distribución de las cuencas de Taltal, Salado y Copiapó. En las imágenes 2, 3 y 4 se muestra información detallada de cada una de estas cuencas.

El evento hidrometeorológico extraordinario de los días 24, 25 y 26 de marzo de 2015 afectó a las regiones de Antofagasta, Atacama en particular, así como también a Coquimbo. El fenómeno desencadenó procesos de remoción en masa y flujos aluvionales en cauces ubicados en las localidades de Antofagasta, Taltal, Chañaral, Diego de Almagro, El Salado, Copiapó, Tierra Amarilla y Paipote. Las localidades con mayor afectación fueron Chañaral, Diego de Almagro y Copiapó.

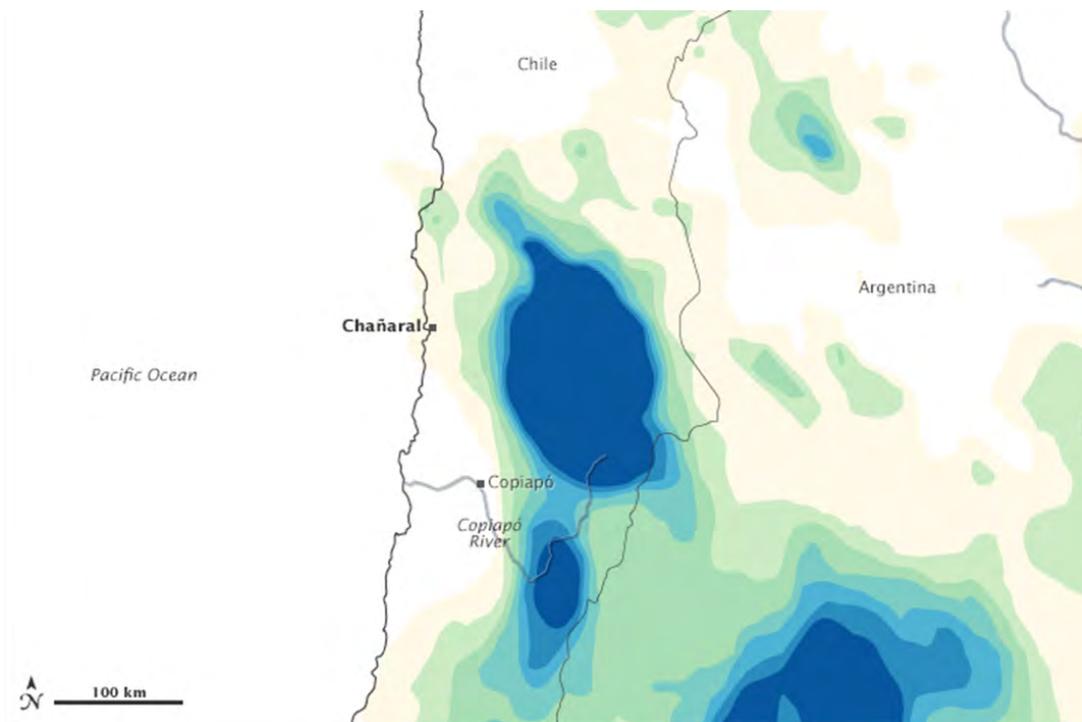
El evento de precipitación se desencadenó producto de un núcleo frío en altura alimentado por importantes cantidades de humedad provenientes del norte, concurrente adicionalmente con condiciones de temperaturas altas propias del verano en la zona. Este evento produjo una precipitación del orden de los 24 mm sobre Antofagasta, 64 mm en el valle del Copiapó (Estación DGA Pastillo, entre días 24 y 27 de Marzo) y 26 mm en el sector de Mina Candelaria, Tierra Amarilla. Otros valores de precipitación para los días 24 – 26 de marzo registrados en las estaciones de las regiones de II, III y IV región se presentan en la siguiente Tabla. A modo de comparación, la precipitación anual en Caldera es de 18 mm, mientras que en Copiapó en Pastillo es de aproximadamente 40 mm. Luego entonces, los pocos registros de precipitación en la superficie en la III región indican una anomalía de las magnitudes del evento más hacia el interior que en la costa. Sin embargo, es necesario considerar que se hace complejo caracterizar correctamente la variación espacial del fenómeno, dada la presencia de altas cumbres de la cordillera de Los Andes (algunas mayores a los 6.000 m) y la carencia de estaciones en distintos uniformemente distribuidas en todo el espacio, particularmente sobre los 2.000 m de altura)

Estaciones en línea	Región	Institución	Lat	Long	Elev	PP24Mar	PP25Mar	PP26Mar
SaladoEmbalse	Antofagasta	DGA	-22,29	-68,20	3200	2,6	9,6	0
SaladoAyquina	Antofagasta	DGA	-22,29	-68,34	2890	4,25	6	0
Cerro moreno	Antofagasta	DMC	-23,45	-70,44	113	0,6	10,7	0,1
El Loa	Antofagasta	DMC	-22,50	-69,90	2293	2,3	4,1	6,5
Caldera Ap	Atacama	DMC	-27,26	-70,77	204	1,2	8	0
Copiapó en Pastillo	Atacama	DGA	-28,00	-69,97	1300	17,9	31,9	6,5
Mina Candelaria	Atacama	Mina	-27,53	-70,31	710	11,9	13,7	0
HuascoAlgodones	Atacama	DGA	-28,73	-70,51	750	2,688	9,568	0
Elqui en Algarrobal	Serena	DGA	-30,00	-70,59	760	32,6	34,2	0,6
Grande en las ramadas	Serena	DGA	-31,01	-70,58	1380	21,6	24,4	4
LaFlorida	Serena	DMC	-29,92	-71,20	142	0	13,2	0,2

Tabla 1: Precipitaciones diarias en las distintas estaciones de las regiones II, III y IV, para los días 24 – 26 de marzo de 2015. Fuente: DGA

Existen otras estimaciones espaciales de la precipitación, las cuales son obtenidas utilizando percepción remota. En particular existe un producto remote denominado Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG), de la iniciativa Global Precipitation, que combina estimaciones remotas y mediciones mensuales en terreno de la precipitación. La siguiente ilustración presenta las estimaciones de precipitación para el evento bajo análisis. Ésta muestra los núcleos principales del eventos ubicados al sur-este de Copiapó y al Este de Chañaral, donde se encuentran los aportes de cabecera del río Salado. En ambos sectores se estima que cayeron más de 75 mm de lluvia, ocurriendo esto principalmente en un área espacial significativamente grande en la parte norte de la cuenca del río Copiapó (contribución a la quebrada Paipote) y en la cabecera del río Salado.

Estas estimaciones se condicen con los resultados de la visita de terreno, donde se observó una escasa remoción en masa en las cuencas de la Cordillera de la Costa y en aquellas ubicadas en las inmediaciones de Diego de Almagro. La visita confirma que las crecidas resultaron de precipitaciones concentradas en la Precordillera en cotas superiores a la altura de Diego de Almagro (700-800 m sobre el nivel del mar), siendo muy probable que las precipitaciones más intensas tuvieran lugar por sobre los 1.000 m sobre el nivel del mar.



Total Rainfall (mm)

trace ≤15 30 60 ≥75

Figura 1: Distribución espacial de la precipitación del evento del 24-26 de marzo
Fuente: Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG), Global Precipitation Measurement mission.

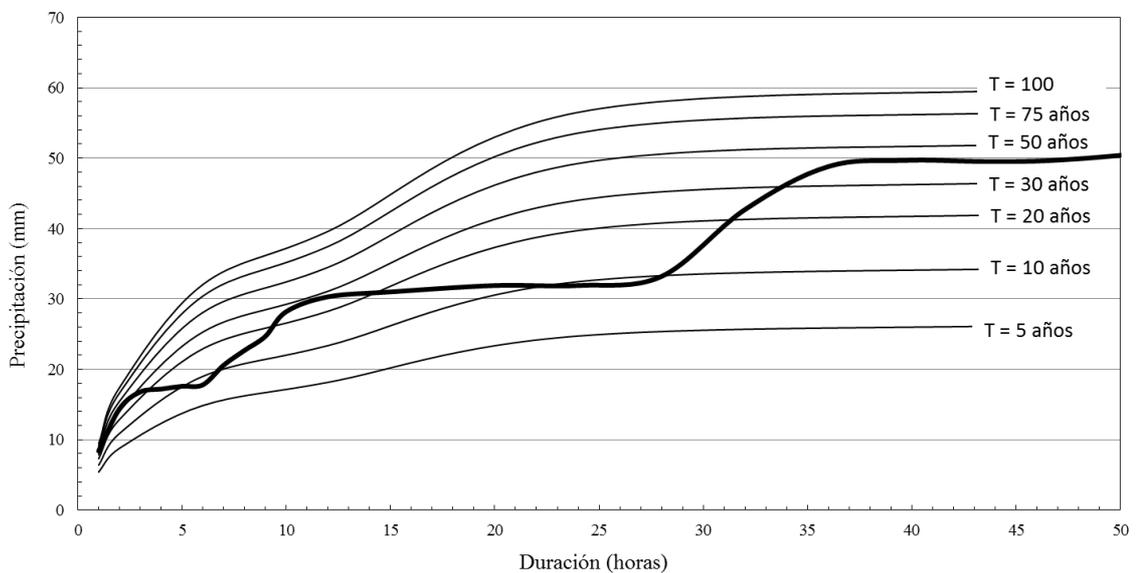


Figura 2: Curvas PDF y evolución de las horas más lluviosas para el evento en estudio
Fuente: Estación Pastillo, Cuenca Río Copiapó.

Es interesante comparar el comportamiento de todo el evento de precipitación con los valores máximos esperables para distintas duraciones y periodos de retorno. La figura 2 presenta las curvas de Precipitación-Duración-Frecuencia en la estación Iglesia Colorada (1500 msnm), las que indican las magnitudes de lluvia acumulada para distintas duraciones según su periodo de retorno. A las curvas se le agrega la precipitación acumulada consecutiva

máxima del evento obtenidas en la estación de Pastillo (1300 m). Así entonces, en la hora más lluviosa de la tormenta cayeron 8 mm, en las dos horas consecutivas más lluviosas cayeron 15 mm, en las 10 horas más lluviosas cayeron 29 mm, y así sucesivamente.

El gráfico muestra entonces como en sus tres horas más lluviosas este evento superó lo observado en promedio cada 30 años. Para duraciones más largas las magnitudes son luego similares a las observadas cada 10 – 20 años. Sin embargo, para 10 horas, la precipitación caída es nuevamente del orden de la tormenta de 30 años de periodo de retorno, y para duraciones de más de 36 horas, el evento tiene un periodo de retorno cercano a 50 años. Los registros muestran que básicamente no existen lluvias de más de 2 días de duración. Por otra parte (no se muestra en la figura) la lluvia total entre el 24 y el 27 de marzo fue de casi 65 mm, lo que significa una situación muy especial en la región.

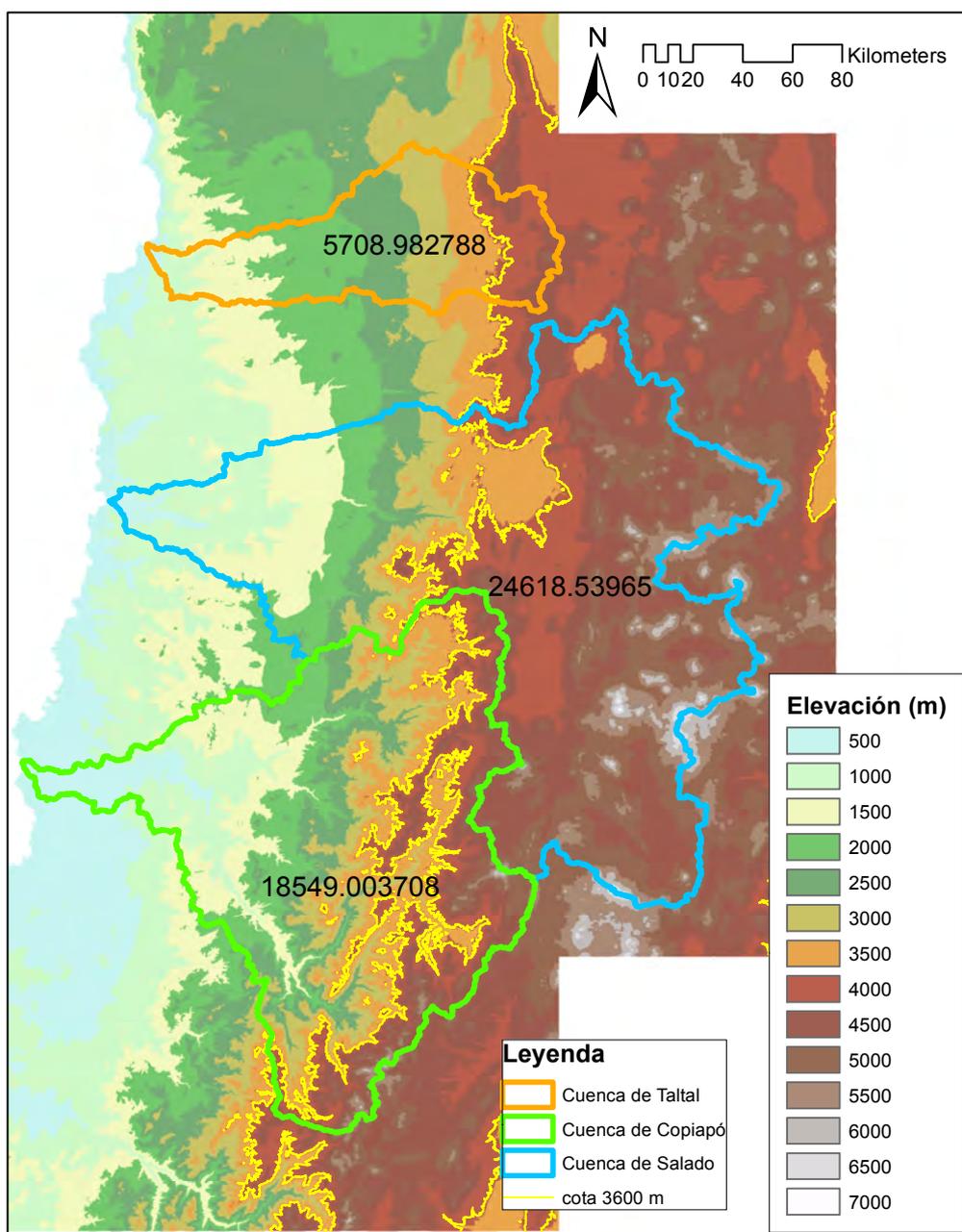


Figura 3. Distribución de cuencas que drenan hacia las áreas afectadas por las inundaciones. De norte a sur, Cuenca de Taltal, Cuenca del Río Salado y Cuenca del Río Copiapó. Los números en negro insertos representan el área en km². Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 se presenta las áreas de las cuencas aportantes hacia Taltal, Chañaral y Copiapó. Es en estas áreas aportantes donde se transforma la precipitación en escorrentía, generándose los flujos que significan las crecidas e inundaciones observadas. Se hace notar que la estimación de la cuenca aportante al río Salado a partir de un Modelo Digital de Terreno sobreestima la definida por la Dirección General de Aguas. Esto ocurre porque hay zonas planas o deprimidas hacia el interior que podrían no formar parte de la cuenca, las que al ser corregidas (i.e. elevadas artificialmente) para otorgarle una salida a su drenaje, si pasan a hacerlo. Se debe revisar en detalle si esta situación está ocurriendo, aunque aún de ser así, el área aportante a Chañaral sigue siendo extremadamente grande (~7.600 km²).

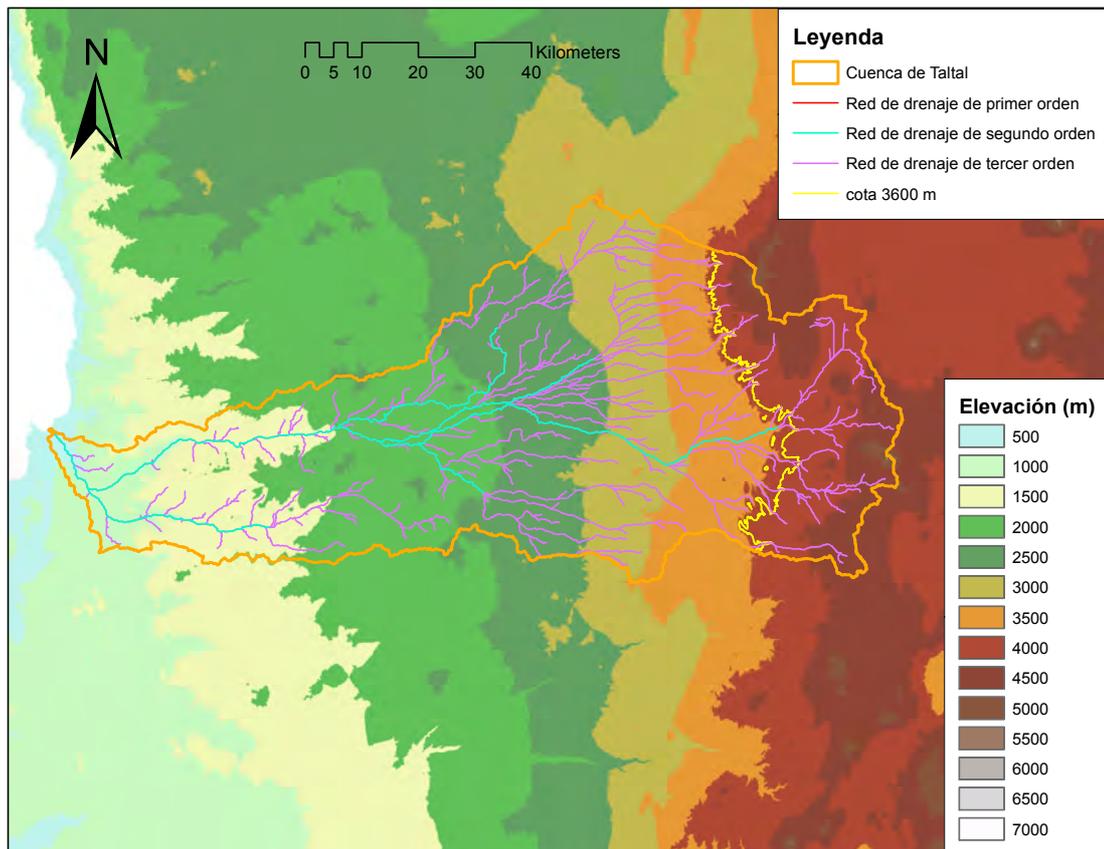


Figura 4. Cuenca y red de drenaje de Taltal, curva de nivel en amarillo cota de 3.600 m.s.n.m., que representa la isoterma de 0° para este evento. Fuente: Elaboración propia equipo de Gabriel González UCN.

No es fácil caracterizar las crecidas poco tiempo después de ocurrida el evento meteorológico. Lo anterior se explica dada la práctica inexistencia de estaciones en el área de estudio en línea, así como la alta incertidumbre en los datos de escorrentía medidos. Esta incertidumbre se debe a la posibilidad de que la estación fluviométrica presentara fallas durante el evento, no haya hecho una medición correcta producto de la gran cantidad de sedimentos en el flujo, o haya registrado alturas de escurrimiento para las cuales no esté calibrada la curva de descarga de estimación del caudal a partir de esta altura.

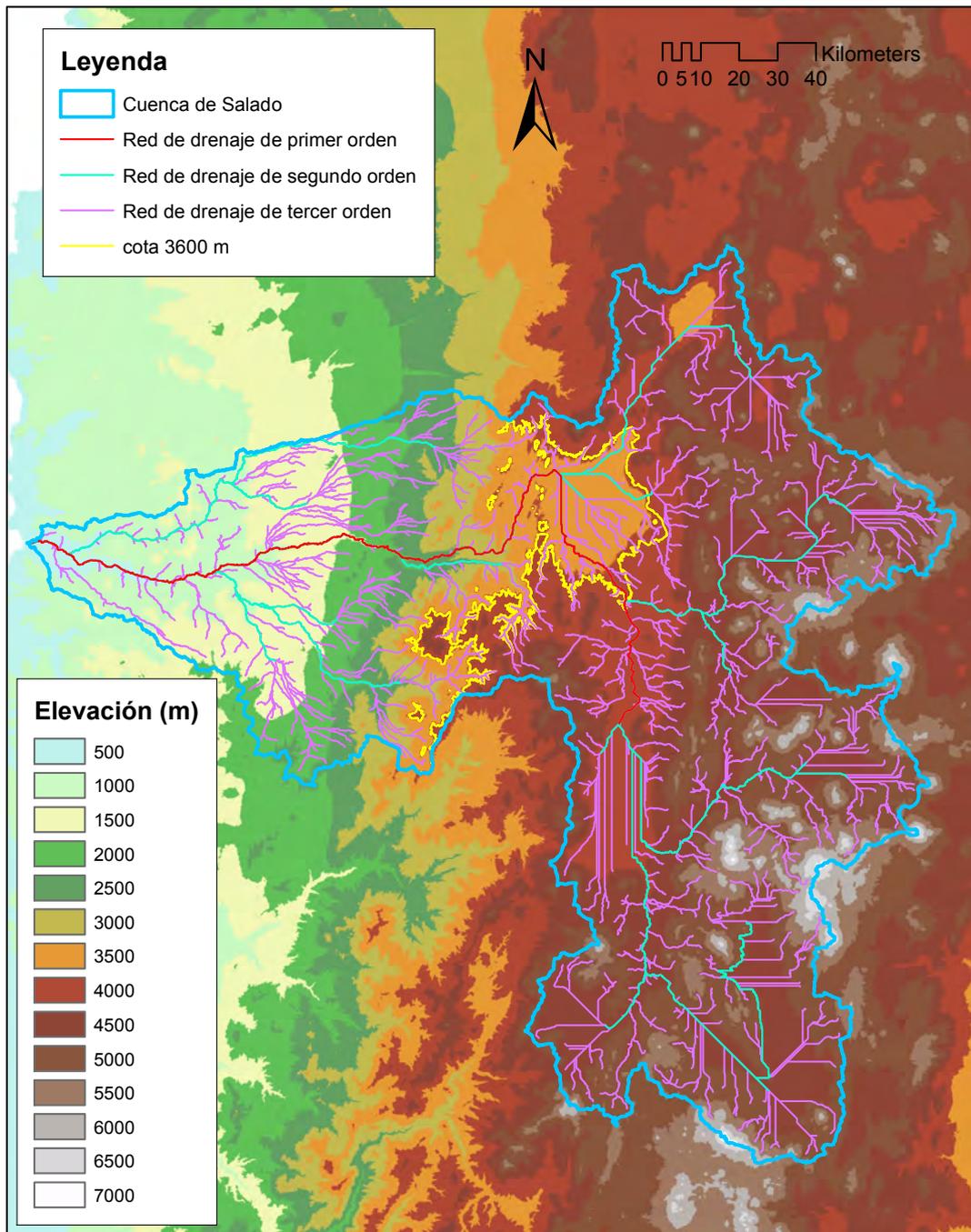


Figura 5. Cuenca y red de drenaje principal del río Salado. Fuente: Elaboración propia equipo de Gabriel González UCN.

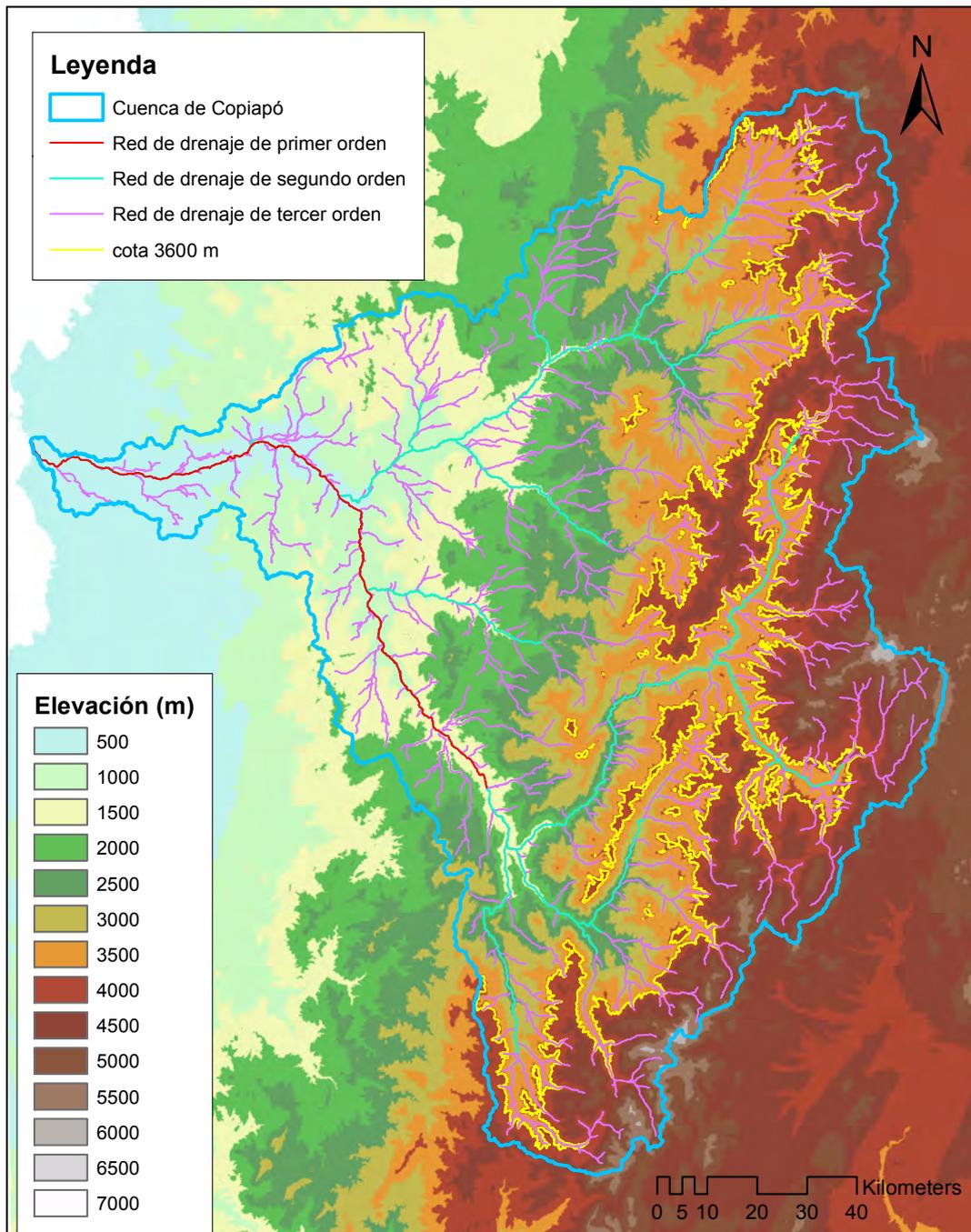


Figura 6. Cuenca y red de drenaje del río Copiapó. Fuente: Elaboración propia equipo de Gabriel González UCN.

En la zona del desastre hay una estación fluviométrica en línea, correspondiente a la estación Pastillo en el río Copiapó. Ésta se encuentra a 1.300 m de altura aguas abajo de la unión de los tres principales ríos aportantes: Río Pulido, Río Manflas y Río Jorquera. El área potencialmente aportante a la estación es de 7.000 km² aproximadamente. El hidrograma registrado junto con la precipitación medida en la misma estación se presenta a continuación:

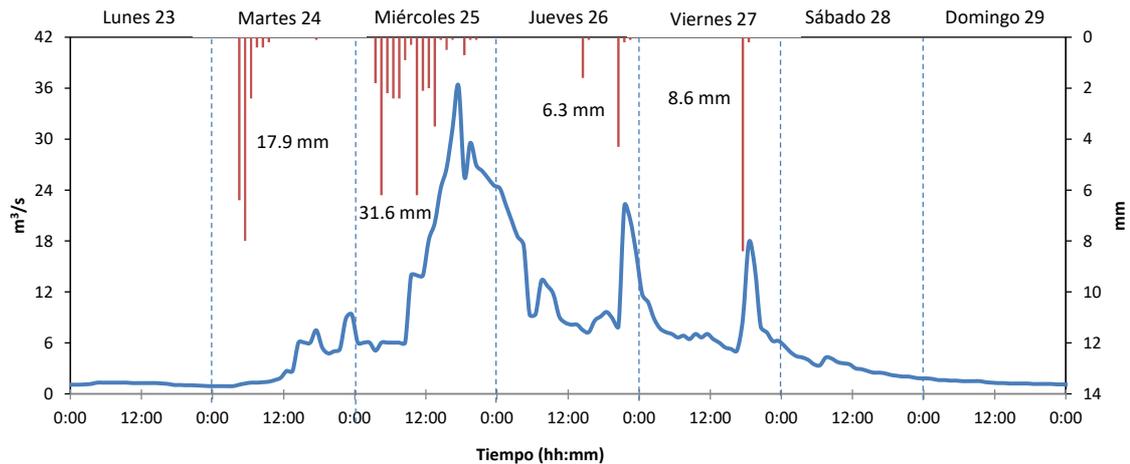


Figura 7 Histograma de precipitación e hidrograma observado en estación Pastillo (DGA), río Copiapó. Fuente: elaboración propia.

De la Figura se observa que las precipitaciones ocurrieron durante 4 días seguidos, algo muy inusual para la zona. La precipitación total en esta estación es de 64.4 mm, la cual se dividió en 4 sub-eventos de 17,9, 31,6, 6,3 y 8,6 mm, ocurridos con un tiempo seco entre ellos de más de 15 horas. El hidrograma de respuesta refleja estos cuatro subeventos, aunque en forma distinta según el momento en que ocurren. El primer subevento, pese a ser el segundo en magnitud y contar con intensidades importantes durante 2 horas (7,2 mm/h), produce caudales bastante bajos dada las condiciones iniciales de sequedad de la cuenca.

Este subevento significó humedecer el suelo y reducir su capacidad de control de las precipitaciones que cayeron posteriormente. La segunda parte de la tormenta ocurrida desde la madrugada del miércoles 25 hasta la noche del mismo día es la que más volumen de agua significó. Este subevento sobre el suelo húmedo produjo caudales mucho mayores, llegando a un máximo de más de 36 m³/s. Finalmente en los días jueves 26 y viernes 27 de marzo ocurren dos pulsos cortos, pero bastante intensos que originaron crecidas instantáneas bastante grandes de 21 y 18 m³/s respectivamente. Se puede ver que el tiempo de respuesta asociado a estas crecidas (i.e. tiempo entre la precipitación y el caudal máximo) es muy corto, lo que se explica por la condición de saturación del suelo y el fácil escurrir de las aguas en esta condición.

El análisis de frecuencia de los caudales diarios máximos en la estación muestra que el caudal promedio de las 24 horas con mayor escurrimiento durante el evento (21 m³/s) es de entre 100 y 200 años de periodo de retorno. Por otra parte, un análisis más incierto de la frecuencia del caudal máximo instantáneo (36 m³/s) considerando una distribución log-normal de los registros históricos, permite estimar que la crecida en esta estación pudo haber tenido un periodo de retorno de más de 300 años. Este análisis es más incierto porque la medición instantánea también lo es, además de que al ser un valor extremo, su periodo de retorno será muy dependiente de la distribución de probabilidades adoptada en el análisis. Por último, estos periodos de retorno se conciben con observaciones visuales del río Copiapó en Copiapó, donde el parque Kaukari operó en condiciones un poco más exigentes a las de diseño, que consideraban una crecida de 100 años de periodo de retorno.

Algo relevante que merece ser analizado es el volumen escurrido registrado en esta estación y el dónde se produce éste. Este volumen es de aproximadamente 3,8 millones de m³ lo que puede transformarse en altura de agua una vez conocida la ubicación de la línea de nieve. De esta manera, el área aportante a considerar para esta transformación es aquella ubicada bajo la elevación que demarca las regiones donde cayó agua líquida (bajo esta elevación) y nieve (sobre esta elevación). Para estimar esta altura se utilizaron imágenes MODIS obtenidas antes y después del evento, las que permitieron detectar que la línea de

nieve se ubicó en torno a los 3.600 m. Luego, el área aportante a la estación es de 3.300 km² aproximadamente, y la precipitación efectiva de 1,1 mm. Un análisis de sensibilidad establece que para una ubicación de la línea de nieve en 3.200 y 3.000 m significarían precipitaciones efectivas de 2 y 2,6 mm respectivamente. Cualquiera sea el caso, estos valores de precipitaciones parecen un poco bajos, lo que sugiere un futuro análisis más exhaustivo para entender mejor la formación de la escorrentía en el río Copiapó.

Por otra parte, la inspección visual y los comentarios de la población permiten concluir que fue la quebrada de Paipote la que más problemas originó. Esto tiene sentido dada las características del fenómeno. Una línea de nieves ubicada a la altura estimada significa que aproximadamente el 80% de la cuenca aportante a esta quebrada (i.e. 5.300 km²) contribuyó a la generación de los escurrimientos que ahí se produjeron. Fue precisamente en esta área donde se produjeron las precipitaciones más importantes según la imagen satelital previamente mostrada.

En resumen, el evento observado entre los días 24 y 27 de marzo corresponde a un evento de precipitación de gran magnitud y una inusual duración de 4 días en algunas zonas. Sin embargo, pareciera ser que el periodo de retorno asociado a las duraciones críticas de la precipitación es menor al del periodo de retorno de la crecida en el río Copiapó. Esto se explicaría por las temperaturas altas de verano concurrentes con el evento de precipitación, lo que significó mayores áreas aportantes a las típicas en los meses de invierno, que es cuando en otras ocasiones ha llovido con magnitudes comparables.

1.1.2 Respecto al impacto en áreas urbanas:

- Los aluviones afectaron intensamente a las áreas urbanas de las ciudades de Chañaral y Diego de Almagro, y en menor medida a la ciudad de Taltal. En esta última, se pudo observar que las piscinas de retención ayudaron a contener parte de carga de sedimentos de los aluviones.
- Las áreas afectadas fueron principalmente las alledañas a los cauces e incluso urbanizaciones dentro de los cauces. Este patrón de emplazamiento está reconocido por los instrumentos de planificación territorial, no indicándose las zonas afectadas como zonas de riesgo. Sin embargo, la observación en terreno permite determinar con claridad que varias zonas urbanas se desarrollaron en zonas de cuenca o en cercanías de antiguos bordes costeros.
- Estos emplazamientos urbanos consideraban no solamente áreas residenciales e industriales, sino que también de equipamiento crítico como edificios municipales y terminales de transporte público.
- Las características de los impactos de las áreas urbanas permiten inducir que estuvieron relacionados con un volumen de agua extremadamente alto que superaría los 100 m³/s.

1.1.3 Respecto a la emergencia y recuperación

- Las ciudades de Chañaral y Diego de Almagro estaban bajo la operación de las fuerzas armadas y, al momento de la visita, se estaban iniciando las primeras acciones de limpieza con maquinaria pesada.
- Es importante destacar que al inicio de la visita la información oficial indicaba una cantidad de 12 personas fallecidas y 20 personas desaparecidas (30.03.2015). Visto el impacto en las áreas visitadas, la entrevistas a los habitantes, las imágenes de prensa y la presencia de funcionarios buscando cuerpos, estas cifras se parecían muy bajas. Las cifras al momento de redactar este informe ya dan cuenta de 25 personas fallecidas y 101 personas desaparecidas. La cifra de damnificados por la emergencia, es 29.741 personas, de las cuales 2.734 corresponden a albergados. A lo anterior, se suma que hay 2.071 viviendas destruidas y 6.254 con daño mayor (ONEMI 04.04.2015).
- La sociedad civil se encontraba incipientemente acercándose a las zonas para poder entregar donaciones y colaboración. Aunque la presencia de efectivos militares y funcionarios se observó mayoritaria. Los liceos están siendo utilizados como albergues y no se observó construcción de viviendas de emergencia.
- Los catastros de afectados están siendo levantados por los municipios y también con información de fotos áreas para el cálculo de viviendas y otras edificaciones afectadas.
- La conectividad principal de las ciudades se ha visto afectada, pero existen rutas alternativas y bypass transitorios que han permitido mejorar la conectividad rápidamente. En los mapas de la imagen 5 se muestran el estado de las carreteras, el domingo 29 de marzo de 2015, informados por la DIRPLAN MOP.

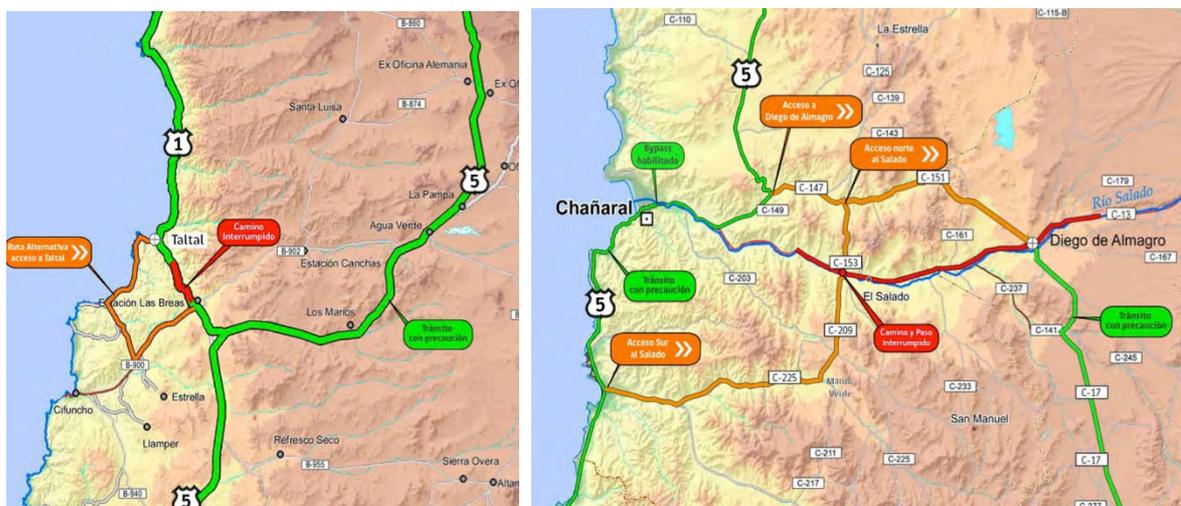


Figura 8. Estado de la conectividad el 29 de marzo para Taltal, Chañaral, El Salado y Diego de Almagro. Fuente: DIRPLAN MOP.

2. Observaciones sobre Chañaral, Diego de Almagro y Taltal

2.1 Observaciones específicas de Chañaral

2.1.1 Respecto a los fenómenos asociados al evento:

- El flujo aluvional se concentró en el cauce principal del Río Salado. Se observa que aguas arriba de Chañaral (hacia el nudo vial de la ruta 5 que conecta con el camino a Diego de Almagro) el flujo de agua ocupó todo el ancho del valle (210 m de ancho máximo, imagen 9), produciéndose la carga de sedimentos que fue movilizadado aguas abajo.
- El sedimento aportado por el flujo aluvional consistió principalmente en arena gruesa y grava. Este tipo de depósito forma un relleno compacto de unos 2 m de espesor que cubre gran parte de la zona baja de Chañaral desde la estación Copec hasta aguas abajo (Figura 10). Se trata de flujos hipeconcentrados.
- La forma del depósito sugiere su penetración en las viviendas como un flujo acuoso con selección granulométrica de carácter gravitacional (Figura 19). Esta condición indica que la distribución de velocidad del flujo fue heterogénea, produciendo un flujo principal de alta velocidad y zonas de depositación laterales de menor velocidad.
- La mayoría de las casas y edificaciones destruidas por el flujo aluvional se concentran en el cauce de la Quebrada del Salado y en la desembocadura del mismo, donde se formó un delta de grandes proporciones.
- Es relevante destacar las formas de erosión que se formaron en la línea de costa. Consisten en cuencas erosivas de hasta 15 m de profundidad con paredes subverticales que cortaron la ruta 5. Estas formas erosión fueron producidas en sedimentos de eólicos y marinos. El mar actualmente ha penetrado en estas zonas y la línea de costa avanzó hacia el continente hasta por los menos 700 m tierra adentro (Imágenes 10, 21 y 22).



*Figura 9. Marcas de flujo de agua a lo ancho del Río Salado.
Fuente: Fotografía Gabriel González.*



*Figura 10. Chañaral y la desembocadura del río Salado, antes del aluvión del 26 de marzo 2015.
Fuente: SAF, imagen Satelital Fasat Charlie (27 de junio 2014).*



*Figura 11. Chañaral y la desembocadura del río Salado, después del aluvión del 26 de marzo 2015.
Fuente: SAF, imagen Satelital Fasat Charlie (28 de marzo 2015).*

2.1.2 Respecto al impacto en área urbana:

- Las imágenes 12 y 13 da cuenta del impacto del aluvión en la zona urbana donde el Plan Regulador Comunal vigente de 2005 y modificado en 2006 definía zonas residenciales y mixtas en el cauce del río.
- Las imágenes 14 y 15 muestran la zona del acceso oriente arrasada por el aluvión y su impacto en viviendas emplazadas en el cauce. También se puede observar cómo el paso sobrenivel ayudó a encauzar el flujo hacia el poniente, protegiendo de alguna manera el sector norte de la ciudad. En la imagen 13 se puede ver que las viviendas se construyeron al menos 5 metros más abajo que el borde del cauce.
- Las imágenes 16 y 17 muestran las viviendas y equipamientos que fueron afectados en el centro de Chañaral, con alto nivel de destrucción. La altura actual del lodo es de al menos dos metros, con alguna presencia de sólidos sobre dimensionados como los que se observan en las imágenes 18 y 19, que podrían pertenecer a actividades económicas con pétreos en zonas cercanas a las ciudades.
- En las figuras 20, 21 y 22 se puede observar el socavón que se localizó en el antiguo borde costero. También se observan las construcciones que fueron emplazadas en la zona baja de la ciudad. En la imagen 23 se muestra la diferencia de altura entre la parte antigua de la ciudad donde están localizada la plaza y la iglesia, con la parte baja donde incluso estaba emplazada la municipalidad (Figuras 23 y 28).

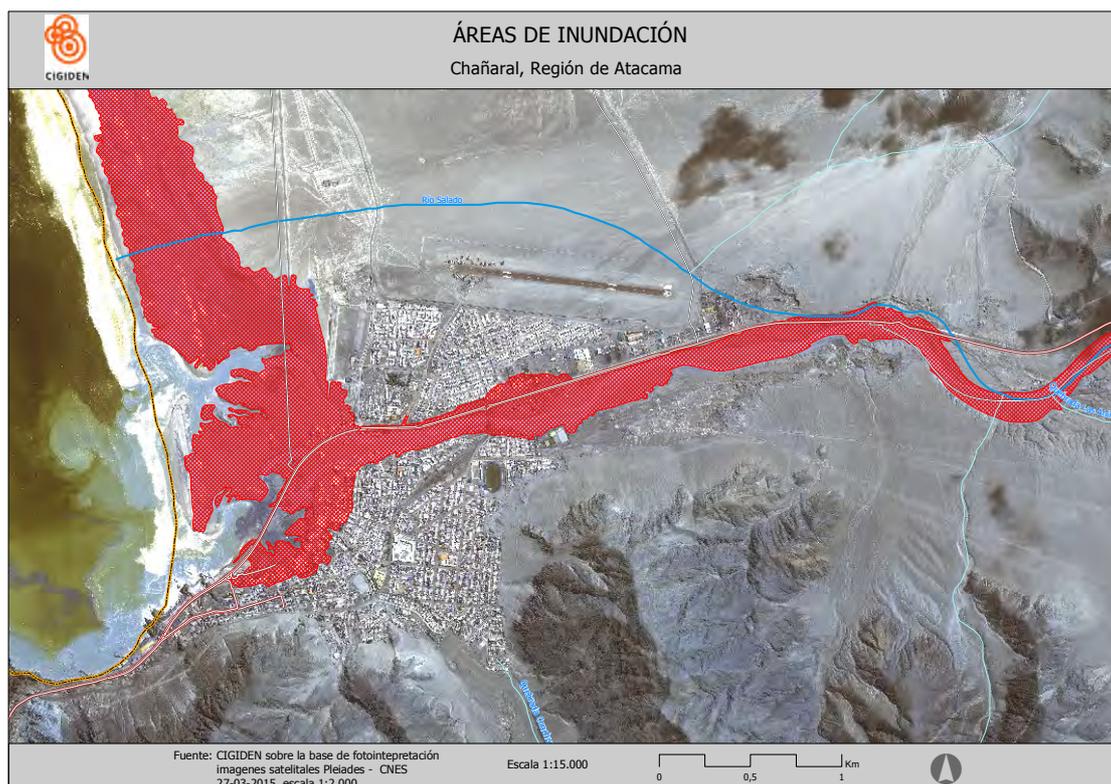


Figura 12. Superficie de inundación en área urbana de Chañaral y alrededores. Fuente: Elaboración propia en base a SAF.

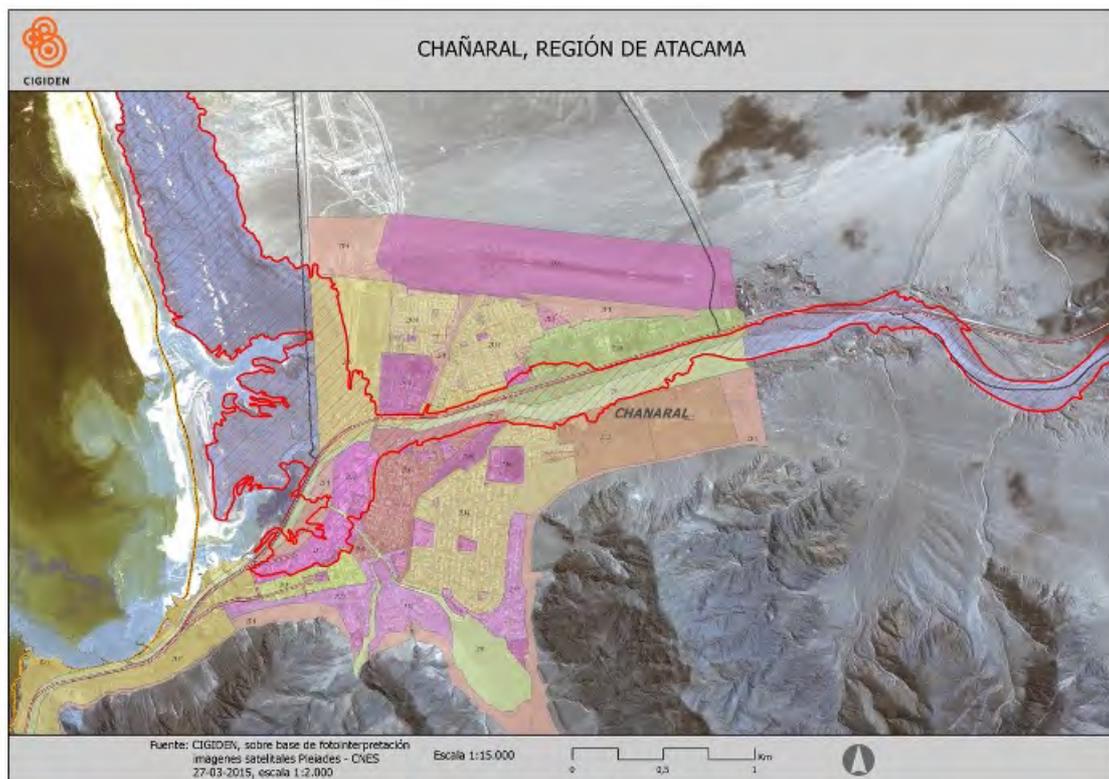


Figure 13 Zona de inundación sobre Plan Regulador Comunal de Chañaral. Fuente: elaboración propia.



Figure 14. Inundación en acceso oriente de Chañaral. Fuente: Elaboración propia en base a foto post evento de SAF (26.03.2015)



Figura 15. Inundación en acceso oriente de Chañaral. Fuente: SAF.



Figure 16. Viviendas construidas en el cauce del Río Salado. Fuente: Fotografía de Roberto Moris



Figura 17. Inundación en zona centro de Chañaral. Fuente: Elaboración propia en base a foto post evento de SAF (26.03.2015)



Figura 18. Flujo de aluvional cubriendo casas en la desembocadura del Río Salado. Fuente: Fotografía de Gabriel González.



Figura 19. Depósitos de gravas y arenas formando el relleno del interior de una casa habitación. Fuente: Fotografía de Gabriel González.



Figura 20. Depósitos de sólidos sobredimensionados. Fuente: Fotografía de Roberto Moris.



Figura 21. Inundación y socavones en zona centro sur de Chañaral. Fuente: Elaboración propia en base a foto post evento de S.A.F (26.03.2015)



Figure 22 Formas de erosión producidas en la costa de Chañaral. Fuente: Fotografía de Gabriel González.



Figura 23. Emplazamiento de municipalidad de Chañaral en zona inundable (edificio azul). Fuente: Foto Roberto Moris.



Figura 24. Vista desde Chañaral antiguo hacia el bajo y la costa. Fuente: Fotografía de Roberto Moris.

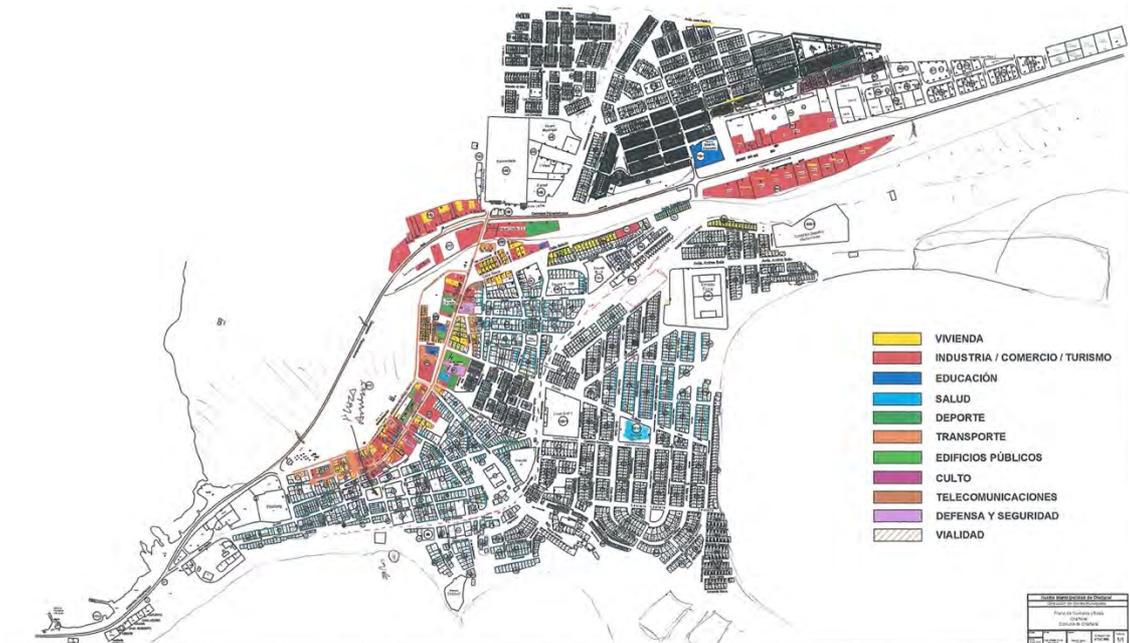


Figura 25. Catastro municipal de las construcciones afectadas con la definición de usos. Fuente: Municipalidad de Chañaral.

2.1.3 Antecedentes respecto a borde costero histórico y la playa de relaves en la bahía de Chañaral

La siguiente información tiene como fuente el sitio <http://www.derechoalagua.cl>

- Desde 1938, cuando los tranques de relaves de Potrerillos (Andes Copper Mining Company) alcanzaron su capacidad máxima, se comenzó a vaciar el material al mar, a través del cauce del río Salado, que pasa por las localidades de Llanta, Diego de Almagro y El Salado antes de desembocar en la Bahía de Chañaral.
- En 1959 se agotó el yacimiento de Potrerillos y comienza la explotación de El Salvador, continuando con la descarga de relaves al mar. Con la nacionalización del cobre, Salvador pasó a ser propiedad de Codelco y se continuó utilizando el mismo sistema de evacuación de relaves en la Bahía de Chañaral.
- A comienzos de los años '70, los reclamos de la comunidad y los perjuicios al puerto mecanizado de embarque de la Minera San Fe, motivaron a la División Salvador a trasladar -en 1975- el vaciado de sus desechos 9 kilómetros al Norte de Chañaral, en la Caleta Palitos.
- El MOP dispuso el desvío del río Salado para que desembocara más al Norte, contaminando otra zona de la costa.
- La corriente de Humboldt y la dinámica costera provocaron que el área contaminada de 5 millas en el mar aumentara a 20 millas, extendiéndose a la zona del Parque Nacional Pan de Azúcar.
- La depositación hidráulica lenta y sostenida generó una playa de relaves de baja pendiente y pie prácticamente recto, “embalsando” la eventual crecida del río Salado.
- Fotografías de principios del siglo XX muestran una playa natural con forma de herradura, típica de zonas de desembocadura (ver Figura 27).



Figura 26. Línea de costa de Chañaral antes del evento en 2014. Fuente: Elaboración propia en base Google Earth.



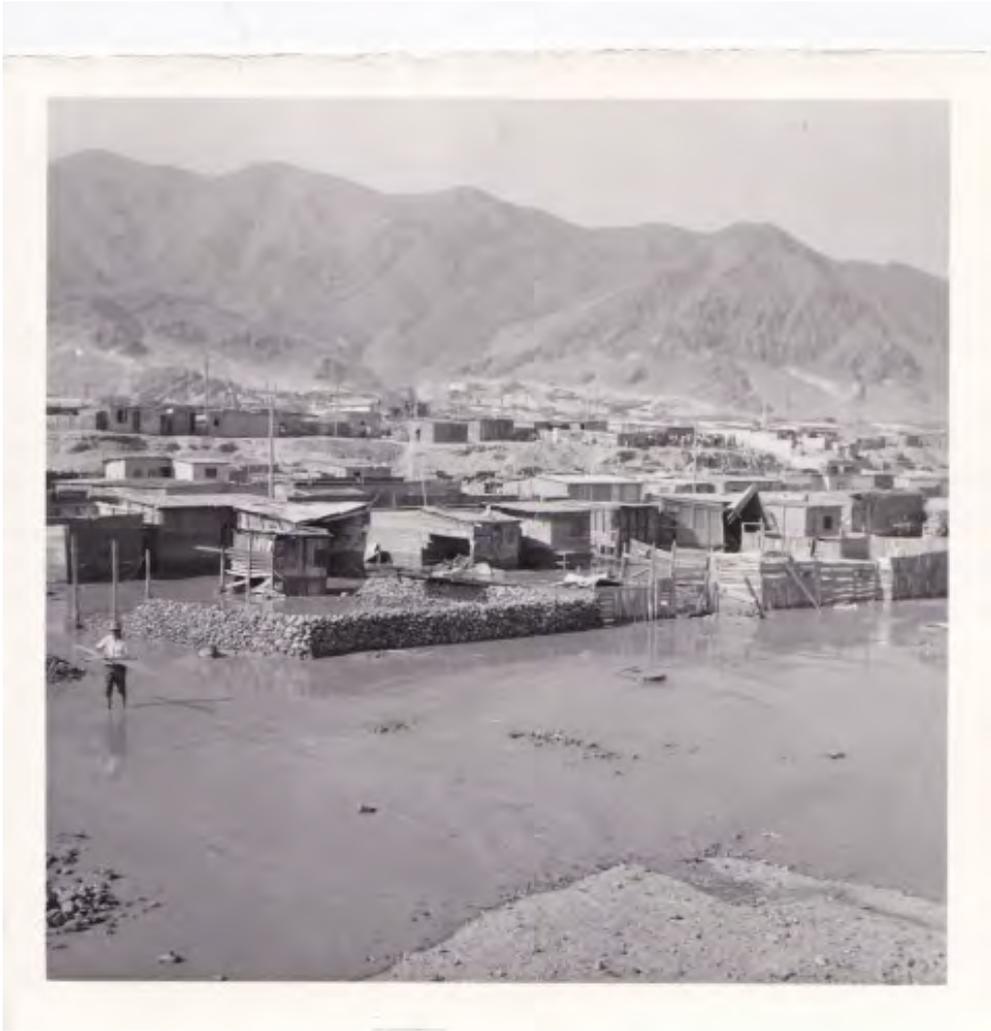
Figura 27. Línea de costa de Chañaral antes del evento en 2014. Fuente: Elaboración propia en base Google Earth.



Figura 28. Línea de costa de Chañaral en 1922. Fuente: Museo Histórico Nacional
<http://www.fotografiapatrimonial.cl/p/19127>



Figuras 29 y 30. Comparación de imágenes antes y después del evento. Fuente: Elaboración propia en base Google Earth y SAF.



Figuras 31 y 32. Fotografía del aluvión de 1972 en Chañaral. Fuente: Elaboración propia en base Google Earth y SAF.

2.2 Observaciones específicas de Diego de Almagro

2.2.1 Respecto a los fenómenos asociados al evento:

- El flujo aluvional inundó la ciudad por distintos frentes, siendo el cauce sur el que causó mayor daño, generando zanjas de más de tres metros en la zona urbana.
- La inspección aguas arriba permitió reconocer la presencia de relaves, rellenos y desechos mineros. Análisis posteriores podrían determinar el nivel de incidencia si es que la hubo en los flujos de los aluviones. Sin embargo, según se puede observar en el capítulo inicial sobre el fenómeno meteorológico, se deduce que el volumen más significativo de los aluviones proviene de la acumulación de agua y barro en las zonas altas de la cuenca.
- El aluvión hacia el oriente se observó a ambos lados de la carretera, identificándose puntos en que el flujo principal cambia de norte a sur. La gran disponibilidad de sedimentos y la magnitud del caudal permitió un flujo en varios brazos que se desplazaron durante el evento, formando una morfología trenzada que se mantiene hasta la condición presente. La imagen 33 muestra uno de los brazos del flujo aluvional.
- En la zona urbana se identificó una obra de encauzamiento de unos 200 metros de largo asociadas al nuevo puente construido por vialidad que sobrevivió, pero su diseño proyectado la hizo insuficiente para mitigar el impacto del aluvión. Se observó erosión y ensanchamiento del cauce antes y después de la obra de encauzamiento (imagen 34).
- Cruces de los cauces fueron sobrepasados por el flujo aluvional, al igual que las estructuras de drenaje, que se taparon principalmente con escombros y basura que transportó el flujo (imagen 34).



Figura 33. Uno de los brazos principales del cauce, 2 km aguas arriba de Diego de Almagro, en una zona de acopio de relaves que fueron movilizados durante el evento. Fuente: Fotografía de Cristián Escauriaza.



Figura 34. Cauce principal del río Salado con acopios de relaves a un costado. Fuente: Fotografía de Roberto Moris.



Figura 35. Obra de encauzamiento en la zona urbana de Diego de Almagro. Fuente: Fotografía de Carlos Ovalle.



Imágenes 36 y 37. Puente sobre el cauce sobrepasado por el flujo en Diego de Almagro. Fuente: Fotografías de Carlos Ovalle.

2.2.2 Respecto al impacto en área urbana:

- En la imagen satelital de la figura 38 se puede observar el área de impacto. El agua y el barro afectaron aproximadamente a un 50% del territorio urbanizado de la ciudad, principalmente en las zonas aledañas al antiguo cauce. Se observaron depósitos de sedimentos entre 50 cm a 150 cm. En la imagen 39 se puede ver la zona de inundación sobre el Plan Regulador Comunal.
- El Plan Regulador Comunal vigente desde 2011 no presentaba una definición de zonas de riesgo acorde a la realidad observada. Se recomienda la actualización del PRC a partir de nuevos estudios de riesgo que definan las zonas aptas para el desarrollo urbano. Esto debería implicar una modificación de las zonas de extensión urbana y la vialidad, en especial la circunvalación proyectada. Asimismo, se requieren obras de encauzamiento de mayor capacidad en la zona urbana, diseñadas para crecidas de esta magnitud, asociadas a períodos de retorno del orden de 50 años.
- La zona al sur del cauce también fue afectada por la inundación. Según la conversación con el Director de Obras Municipales DOM esta zona al sur estaría siendo considerada para la construcción de viviendas nuevas. Será importante determinar el nivel de seguridad de la zona (ver imágenes 42 y 43).
- En la imagen 41 se puede observar la zona de inundación y las zonas del estadio y Escuela que están siendo utilizadas como centros de logística y albergue.

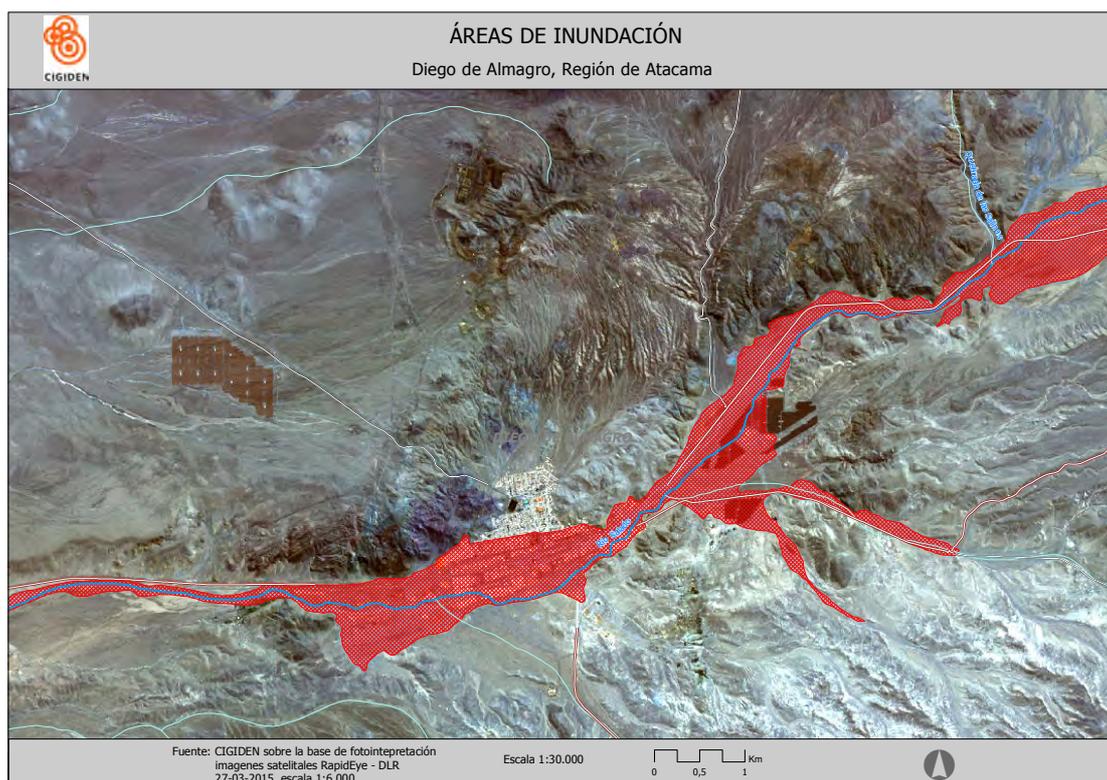


Figura 38. Área de inundación de área urbana y alrededores de Diego de Almagro. Fuente: Elaboración propia en base RapidEye of DLR



Figura 39. Foto satelital post evento del 26 de marzo de 2015. Fuente: SAF.

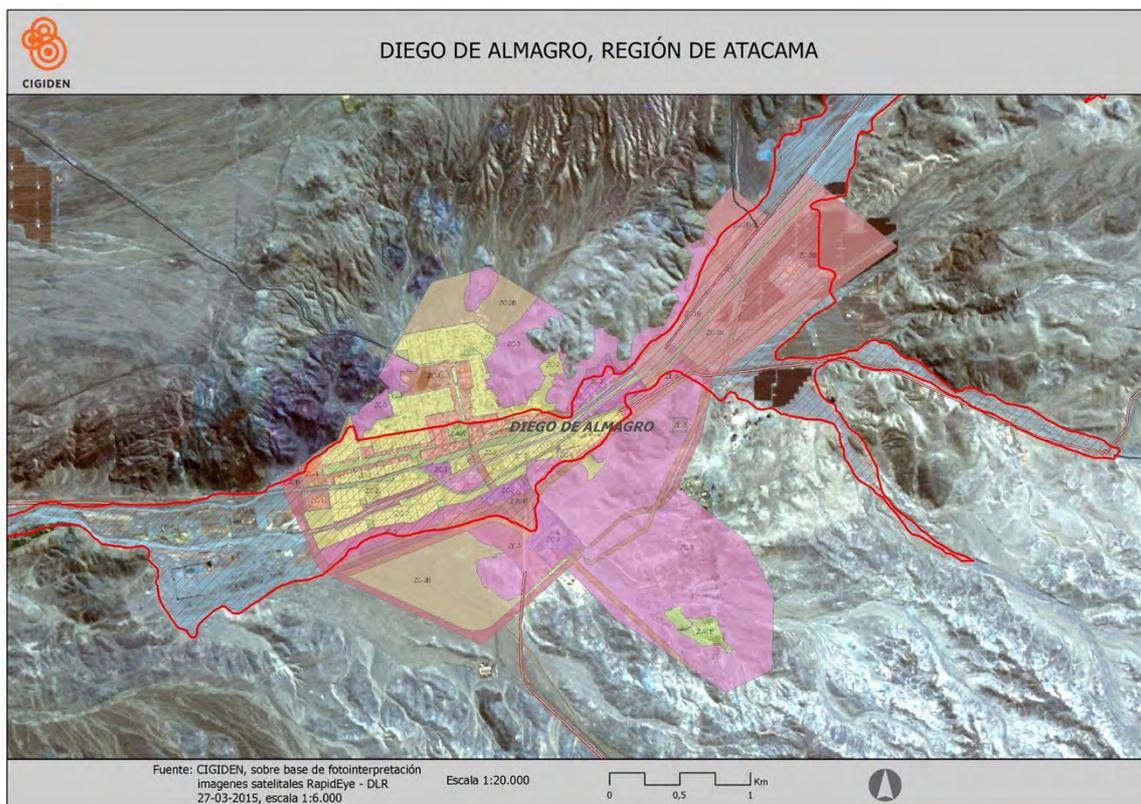


Figura 40. Zona de inundación sobre Plan Regulador Comunal de Diego de Almagro. Fuente: Elaboración propia en base a foto post evento de SAF (26.03.2015) y mapas IDE Chile.



Figura 41. Detalle de la zona central afectada en Diego de Almagro. Fuente: SAF



Figura 42. Vista hacia el poniente desde el Cerro Caracol. Fuente: Fotografía de Roberto Moris.



Figura 43. Vista de zonas afectadas en Diego de Almagro, sector al norte del río Salado. Fuente: Fotografía de Cristián Escauriza.

2.2.3 Respeto de la emergencia y recuperación:

- La zona se encuentra controlada por el Ejército que tiene un gran número de efectivos desplegados y al menos 20 camiones.
- Hay maquinaria limpiando las zonas dañadas, lográndose una accesibilidad de vías estructurales probablemente en uno o dos días.
- El albergue principal está en la escuela Aliro Lamas, que está administrado por el municipio. El acopio de donaciones se encuentra en otro recinto.
- El Ejército se instaló a un costado del estadio con carpas y una atención médica de emergencia.
- Se nos indicó que la comunidad se encuentra fuertemente afectada emocionalmente y se requerirá apoyo psicosocial.
- El catastro preliminar del municipio muestra 793 viviendas afectadas y el catastro preliminar MINVU en base a fotografía aérea muestra 1.900 viviendas afectadas (ver imagen 44). Estas familias que deben incluir allegados más el déficit habitacional anterior determinaría la demanda por satisfacer en la reconstrucción. También es posible que familias que no sufrieron tantos daños deban también ser relocalizadas.



Figura 44. Plano de catastro de la municipalidad (DOM) en el albergue (31.03.2015). Fuente: Fotografía de Roberto Moris.



Figuras 45 y 46. Albergue en el la escuela Aliro Lamas de Diego de Almagro.

Fuente: Fotografía de Cristian Escaviazza.



Figura 47. Presencia del Ejército de Chile en el establecimiento de las condiciones de comunicación, orden y accesibilidad. Fuente: Fotografía de Cristian Escauriaza.



Figura 48. Carpas de campaña en Diego de Almagro a un costado del Estadio Municipal. Fuente: Fotografía de Carlos Ovalle.

2.3 Observaciones específicas de Taltal

2.3.1 Respecto a los fenómenos asociados al evento:

- Conectividad debilitada por daños en acceso principal Ruta 1.
- Aparente buena respuesta de piscinas de decantación que habrían contenido el impacto. A pesar de haber sido sobrepasadas con el caudal, contribuyeron a minimizar el potencial impacto del flujo aluvional.
- Barro penetró el pueblo a través de la avenida principal que se encuentra alineada con el eje de la quebrada, hasta al menos la calle Atacama.
- Plano de ciudad muestra zona de impacto con barro de 50 cm aproximadamente.
- Mayor daño en vehículos que estaban en acceso norte y en primeras viviendas de acceso norte.



MOSAICO TATAL
Sensor Digital DMC
Fecha de Captura 27 de Marzo de 2015



Figura 49. Foto satelital de Taltal y la cuenta del río Taltal, post evento del 26 de marzo de 2015. Fuente: SAF.

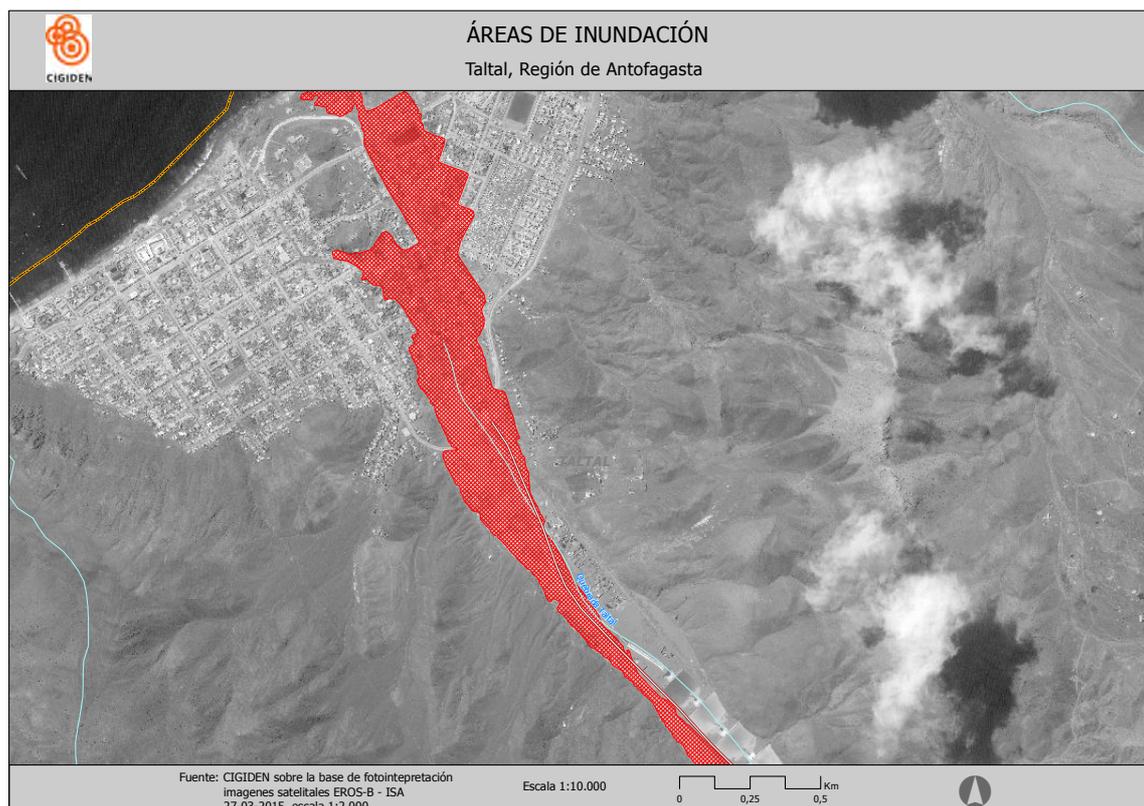


Figura 50. Superficie de inundación en área urbana de Taltal y alrededores. Fuente: Elaboración propia en base a SAF

2.4. Orientaciones preliminares respecto a la recuperación

Transformando experiencias post-catástrofe en aprendizaje.

Tanto la experiencia internacional como la propia de los últimos años nos han entregado información valiosa respecto a la manera en que abordamos la emergencia y la recuperación. A la luz de estudios académicos³ e informes de gobierno⁴ respecto de la experiencia reciente, nos vemos enfrentados nuevamente a la posibilidad de repetir patrones de comportamiento institucional o tomar caminos que den cuenta de estos aprendizajes. Pensando en esta última posibilidad y en vista de ser coherentes con los compromisos establecidos en Sendai para la reducción de riesgos, parece prudente plantear los siguientes puntos:

- Fomentar el rol de ONEMI como ente coordinador de la emergencia, asumiendo los impactos de ésta en las fases de recuperación;
- Potenciar el rol de los intendentes evitando el nombramiento de delegados presidenciales;
- Fortalecer la labor de los gobiernos locales, reforzando sus equipos, capacidades y acceso a recursos públicos;

³ Comerio, Mary (2012); Moris, R. & Walker, R. (2014) "Reconstrucción de territorios vulnerables en un escenario de reconstrucción inequitativa. El caso de Pelluhue, Chile". Desarrollado como parte de la investigación conjunta con Universidad de Columbia sobre los aprendizajes de la catástrofe del 27 de Febrero de 2010; Moris, Roberto (2014) "Notas respecto a los aprendizajes del proceso de reconstrucción en Chile después del 27 de febrero de 2010"; Siembieda, William (2011) "Small is beautiful". Natural Hazards Observer. Irazabal et al (2015) "Aprendiendo del 27F: un análisis comparativo de los procesos de reconstrucción en Chile tras el terremoto del 2010" Financiado por Columbia-Chile Fund. CONICYT.

⁴ Delegación Presidencial para la Reconstrucción (2014) "Diagnóstico estado de la construcción. Terremoto y Tsunami. 27 de febrero de 2010".

- Desarrollar y contractualizar Planes de Reconstrucción desde el Ministerio del Interior, asegurando la intersectorialidad de su ejecución;
- Involucrar a las autoridades y comunidades locales en la definición e implementación de los planes;
- Poner en marcha una plataforma de seguimiento de planes de acceso público y actualizada, que muestre clara y transparentemente cuáles son los compromisos y plazos;
- Delimitar la participación de la sociedad civil y empresas privadas en las fases de recuperación, no descuidando la responsabilidad del Estado y encauzando la potencia de la solidaridad nacional;
- Mejorar drásticamente la calidad de las soluciones de emergencia y barrios de transición. Proyectando tiempos de permanencia reales y asegurando la calidad de vida de las familias afectadas;
- Finalmente, tener un delicado, honesto y pragmático manejo de las expectativas. Los procesos de recuperación son lentos y es muy importante que se mantenga la credibilidad de las instituciones y la población pueda prepararse adecuadamente para el dramático periodo de transición hacia las soluciones definitivas.

Antecedentes disponibles con anterioridad

- Información IDE Chile: Fotos con estructura urbana y vialidad
- Información MINVU: Planes reguladores vigentes
- Información MOP: Informes de conectividad
- Información ONEMI:
 - a) Fotos SAF post evento de Chañaral y Copiapó;
 - b) Fotografías satelitales de chárter de diversos organismos (AIRBUS 2/4/15 18:08:00, DLR 29/3/15 13:51:00, E-GEOS-IT 29/3/15 14:01:00, ESA_EU 31/3/15 20:22:00, ISA_IL/ 30/3/15 12:03:00, KARI 2/4/15 9:26:00, NRSC-IRS 29/3/15 13:51:00, ROSKOSMOS 29/3/15 13:50:00, UKSA 29/3/15 13:57:00, USGS 29/3/15 13:46:00;
 - c) Imágenes del SIAC de ONEMI en base a información IGM Digital Globe.

Contactos en la zona

- Eduardo Ruiz, Encargado de Relaciones Públicas de Municipalidad de Diego de Almagro, responsable del albergue. Cel: +56995592886
- Sergio Miranda, Director de Obras Municipales de Diego de Almagro, contraparte de MINVU y otros sectores para catastro y reconstrucción. Mail: smirandaarq@gmail.com cel: +56987392120
- José Vega, habitante de Chañaral. Cel: +56968727265

Contactos sectoriales

- Víctor Orellana, Subdirector ONEMI
- Juan Piedra, Geógrafo Sección Análisis y Estudios ONEMI
- Juan Manuel Sánchez, Director DIRPLAN MOP
- Pablo Contrucci, Jefe DDU MINVU

3. Estudio de multiamenazas en Atacama.

Localidades urbanas de la cuenca del río Salado, Chañaral, el Salado y Diego de Almagro, en la Región de Atacama.

Introducción

El estudio denominado “Estudio de amenazas de las localidades urbanas de la Cuenca del Río Salado, Región de Atacama” se desarrolló en el marco del Convenio firmado entre la Corporación Nacional del Cobre, CODELCO, y la Pontificia Universidad Católica de Chile, para apoyar a las distintas instituciones del Estado, especialmente a las del nivel comunal, en el proceso de reconstrucción de las localidades afectadas por el evento catastrófico de marzo de 2015 producido en la provincia de Chañaral.

El presente estudio plantea la generación de una propuesta que sirva de base para la definición de áreas de amenaza y la reformulación de los instrumentos de planificación territorial (IPT) existentes en las localidades afectadas. El producto será un valioso insumo para las autoridades responsables de la planificación y gestión del territorio, para orientar las decisiones de los encargados de protección civil y para apoyar al desarrollo económico, social y ambiental de las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro.

3.1 Objetivos, productos y localidades

Objetivos

El objetivo general del estudio es generar una base de antecedentes respecto a las amenazas naturales de origen geológico e hidrometeorológico existentes en las localidades de la cuenca del río El Salado (Chañaral, El Salado y Diego de Almagro) que sirva para la posterior zonificación de riesgos en los respectivos instrumentos de planificación territorial (IPT). Dichos antecedentes son necesarios para el diseño de los Planes Reguladores respectivos, y su correspondiente norma urbana, de acuerdo al grado de susceptibilidad a la amenaza que determine el estudio.

En cuanto a los objetivos específicos, se establecieron los siguientes:

1. Revisar y sistematizar los antecedentes bibliográficos respecto a la definición y a la ocurrencia histórica de las amenazas descritas en el artículo 2.1.1 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) así como la identificación de su localización geográfica, magnitud y recurrencia.
2. Modelar y caracterizar las amenazas naturales de origen geológico e hidrometeorológico existentes en las localidades de la cuenca del río El Salado, identificando el grado de susceptibilidad que tienen éstas localidades a dichas amenazas.
3. Espacializar las amenazas de la cuenca del río El Salado mediante la elaboración de cartografía temática en base a los resultados del modelo, incorporando análisis de expertos.

Productos

El estudio tiene dos productos. En primer lugar, un Informe de Diagnóstico, que incluye una propuesta conceptual, una revisión integral de los antecedentes del área de estudio, especialmente de aquéllos que se relacionan a la ocurrencia de eventos naturales extremos potencialmente riesgosos, un análisis del marco legislativo en el cual insertarían las modificaciones a los IPT a nivel comunal (encargados por el Ministerio de Vivienda y

Urbanismo), así como también un diagnóstico de los estudios de riesgo que se habían desarrollado hasta el momento del evento del 25 de marzo 2015, asociados a los planes de desarrollo regionales y a los IPT vigentes. Finalmente, se hace una caracterización del evento de marzo de 2015.

El segundo producto corresponde a un Informe de **Caracterización de las Amenazas** identificadas en el contexto de las tres localidades que se están estudiando. Para esta parte, se solicitó a investigadores de CIGIDEN expertos en cada una de las amenazas, que realizaran un estudio fundado. Este estudio consistió en el levantamiento de datos en terreno, análisis respectivos de laboratorio, construcción de modelos y generación de cartografía de las amenazas y sus niveles de susceptibilidad respectivos.

Localidades

Como lo indica el Convenio con CODELCO, el estudio se enfoca en las localidades de la cuenca del río El Salado que fueron afectadas por el evento hidrometeorológico ocurrido entre los días 24 y 27 de marzo de 2015. La primera localidad corresponde a la ciudad de **Diego de Almagro**, ubicada en la comuna de Diego de Almagro y con una población aproximada de 8.051 habitantes (Censo INE 2002 y levantamiento SECPLA DDA 2011), que fue la primera en ser afectada por los flujos aluvionales producidos entre el 24 y 27 de marzo de 2015, que inundaron aproximadamente el 51% de la superficie de la ciudad.

En segundo lugar, se estudiará el caso de **El Salado**, ubicado en la comuna de Chañaral, con una población aproximada de 989 habitantes (Censo 2002), cuyo centro desapareció producto del flujo y cuya superficie afectada alcanzó el 22%. La última localidad estudiada será **Chañaral**, capital provincial y comunal, ubicada en la desembocadura de la cuenca de El Salado, con 12.003 habitantes (Censo 2002) y que fue afectada en un 21% de su superficie. La localización geográfica del área de estudio se expone en el siguiente mapa.

3.2 Principales Conceptos

Amenaza

“Posibilidad más o menos concreta de que uno o varios fenómenos ligados a procesos de origen natural o humano, se produzcan en un determinado tiempo y que la región no esté preparada para afrontar sin traumatismos ese fenómeno” (Wilches – Chaux, 1998). Existen tres grupos generales de amenazas: naturales (fenómenos propios de la naturaleza), socio-naturales (surgen de la interacción de amenazas naturales con los suelos y recursos naturales explotados o degradados) y antrópicas (atribuidas a la acción humana). En este estudio se abordan tanto las amenazas naturales como las socio-naturales, que de acuerdo a su origen se clasifican en geológicas e hidrometeorológicas.

Amenazas Geológicas

Terremoto

Los sismos o terremotos son movimientos vibratorios de la superficie terrestre, causados por el paso de ondas sísmicas que se irradian desde una fuente de energía elástica. Dependiendo de su magnitud, estos movimientos pueden provocar una gran cantidad de daños en una extensa área de territorio, en tan sólo un par de minutos. (Miranda, 2006).

Actividad Volcánica

Corresponde a distintos tipos de manifestación que presenta un volcán. La forma más clara de actividad volcánica es la erupción volcánica. Ésta se manifiesta cuando ocurre la proyección de material sólido, líquido y gaseoso a través de un cráter. También corresponde a una acción más o menos violenta que experimenta un volcán que ha entrado en actividad. Se origina cuando el magma interno asciende y emana hacia la superficie en forma de lava

Tsunami

“Un tsunami es un fenómeno que ocurre principalmente en el mar, generado por un disturbio sísmico u otros procesos geológicos como erupciones volcánicas o deslizamientos, que impulsan y desplazan verticalmente la columna de agua originando un tren de ondas progresivas gravitacionales largas, con longitudes de onda del orden de cientos de kilómetros y alturas en agua profunda inferiores a un metro” (Lagos, 2008). Poseen períodos que van de varios minutos hasta una hora, propagándose a gran velocidad en todas direcciones desde la zona de origen y cuyas olas al aproximarse a las costas pueden alcanzar alturas de grandes proporciones, infligiendo una vasta destrucción e inundación (Wiegel, 1970; Satake, 2002).

Remoción en masa por sismo / Deslizamientos

Se define como el movimiento descendente por efecto de la gravedad de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos (Cruden, 1991), constituyéndose como una de las formas más recurrentes de la evolución del relieve terrestre. Se caracterizan por ser los fenómenos morfodinámicos más frecuentes de la inestabilidad de las laderas y que dependen de las características litológicas (variaciones de meteorización y permeabilidad de la roca), morfológicas del relieve (erosión basal, depósitos de sobrecarga de laderas, presencia de cizallas), estructura y propiedades físicas del suelo, factores tenso-deformativos, la densidad de cobertura vegetal, etc. (Mardones Flores & Rojas Hernández, 2012).

Amenazas Hidrometeorológicas

Inundaciones

También llamadas avenidas o crecidas, se refieren a la concentración y saturación de terrenos planos o depresiones, principalmente por aguas lluvias, fusión rápida de nieve o hielo o la conjunción de dos o más de estos fenómenos. Las causas de las inundaciones pueden ser naturales y/o antrópicas. Entre las causas naturales están las ligadas a precipitaciones torrenciales, con sus consecuentes desbordes de ríos. En cuanto a las antrópicas, ellas radican en la alteración del régimen hidrológico, como las obras de cultivo y uso irracional del suelo, más el aumento de zonas urbanizadas.

Remoción en masa por lluvia

Se define como el “movimiento descendente por efecto de la gravedad de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos”, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, cuando ésta se produce por un factor extraordinario vinculado a un evento hidrometeorológico, o al aumento de la cantidad de agua en el suelo, se define como remoción en masa por lluvia y se entiende como flujo de barro y detritos.

Vulnerabilidad

Se entiende como la probabilidad de que un sujeto o elemento expuesto a una amenaza natural, tecnológica, antrópica o socio-natural, sufra daños y pérdidas humanas, como materiales, en el momento del impacto del fenómeno, teniendo además la dificultad en recuperarse de ello, a corto, mediano o largo plazo (antes, durante o después del evento)” (Chardon, 2010). La vulnerabilidad es cambiante, ya que evoluciona tanto cualitativa como cuantitativamente según las variables de tiempo, espacio y tipo de amenaza (Chardon, 2008).

Exposición

Se entiende como la posibilidad de que las personas, propiedades, sistemas y demás elementos presentes en una zona de peligro se encuentren sujetos a posibles pérdidas. (Naciones Unidas, 2015). La exposición es un factor que depende únicamente de la localización en relación a las amenazas, es decir, es independiente del nivel socioeconómico, de la calidad de la construcción o del nivel de preparación de la población, y se evalúa cuantitativamente: cuánta gente, viviendas, equipamientos críticos, etc...., hay en determinada área de riesgo (Wood & Schmidtlein, 2012).

Riesgo

Se entiende como “la probabilidad de producirse un peligro o amenaza hidrológica, meteorológica o geofísica que puede resultar en la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos de salud, así como daños en los bienes (propiedades, infraestructuras, recursos ecológicos), medios de sustento y servicios expuestos. Las características y circunstancias de una comunidad, sistema o activo que lo torna susceptible a los efectos perjudiciales de un peligro, constituyen su vulnerabilidad” (Naciones Unidas, 2015)

Susceptibilidad al riesgo

Se define como la propensión o la capacidad de determinado lugar de ser afectado por una amenaza natural. Si bien la susceptibilidad no se encuentra definida en la literatura internacional como una forma de medir el riesgo, se introduce en este caso como una estrategia para dimensionar el nivel de peligrosidad, en relación a ciertos factores condicionantes, que se determinan de acuerdo a cada tipo de amenaza.

Desastre

Corresponde a “los efectos adversos o pérdidas en las vidas y bienes humanos dejados por la ocurrencia de un evento amenazante en una sociedad vulnerable a ellos” (Velásquez y Rosales, 1998). Es decir, el desastre es la materialización del riesgo preexistente en la sociedad, ocasionado por un determinado evento físico como un terremoto, tsunami, inundación, incendio, etc, expresado en términos de pérdidas (Lavell, 1999).

Gestión del Riesgo de Desastres

La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) es un instrumento para la reducción del riesgo de desastres, principalmente mediante la disminución de la vulnerabilidad, en base a acuerdos sociales que surgen como resultado del análisis de riesgo, los cuales son el producto de un proceso social altamente complejo, en el que participan todas los grupos sociales y de interés, siendo estos acuerdos uno de los fundamentos necesarios para poder hacer frente a las consecuencias de eventos naturales extremos futuros (Kobler, Jülich, & Bloemertz, 2004). Para las Naciones Unidas (EIRD/ONU, 2011) las principales oportunidades para la disminución del riesgo residen en reducir la vulnerabilidad, es decir, abordar los factores

subyacentes del riesgo mediante el fortalecimiento de las capacidades de gobernanza, si es que no es posible reducir la intensidad de las amenazas y la exposición frente a ellas.

En este sentido, la GRD busca fortalecer las capacidades de autoprotección. Para ello, combina aspectos técnicos, sociales, políticos, socio-económicos, ecológicos y culturales con diferentes componentes preventivos para así conformar un sistema integrado. Sólo esta red permite a la GRD aminorar el riesgo a un nivel tolerable para una determinada sociedad (Kobler, Jülich, & Bloemertz, 2004). A su vez, la eficacia de la GRD depende de la participación inteligente de todos los actores involucrados, siendo indispensable intercambiar información y poder acceder fácilmente a la información para investigar, planificar, monitorear las amenazas y evaluar los riesgos (EIRD/ONU, 2004).

Para poner en marcha un plan de Gestión del Riesgo, Narváez, Lavell & Pérez Ortega (2009), definen un conjunto de pasos, con un enfoque de procesos, con la finalidad de que éstos puedan ser adaptadas a cada realidad nacional:

1. Generar conocimiento sobre el riesgo de desastre en sus diferentes ámbitos
2. Prevenir el Riesgo futuro
3. Reducir el Riesgo existente
4. Preparar la Respuesta
5. Responder y Habilitar
6. Recuperar y Reconstruir

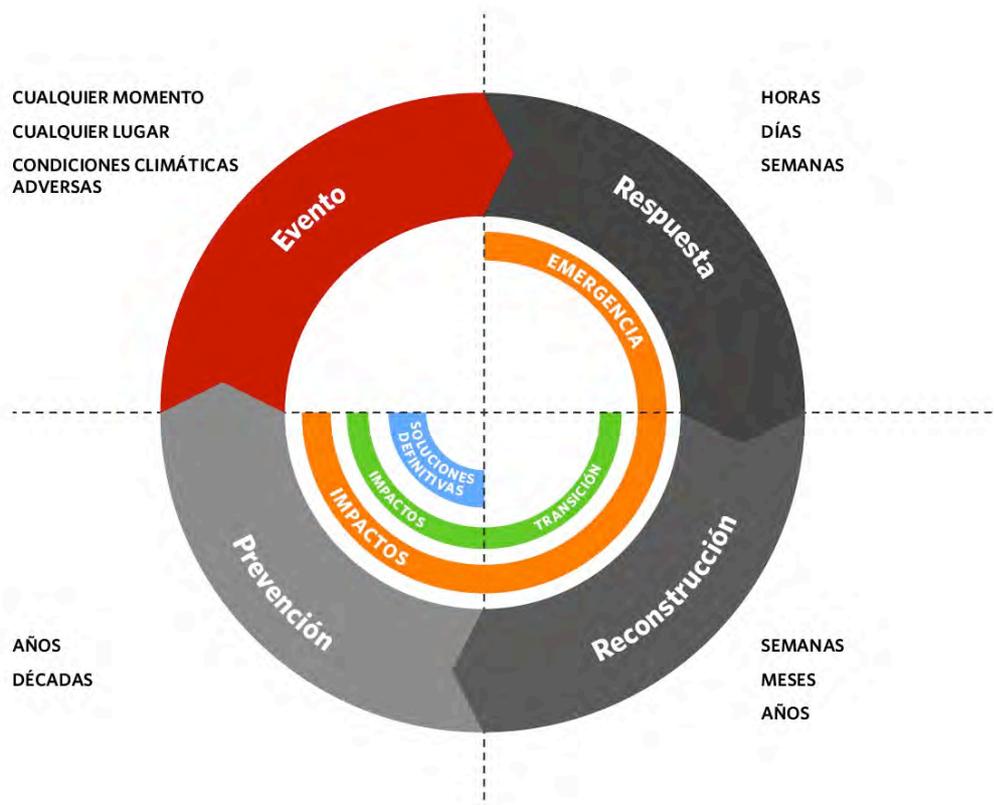


Figura 51 Ciclo de Gestión del Riesgo de Desastres. Fuente: CIGIDEN, 2015.

De esta manera, se pretende reorganizar los esfuerzos para lograr una GRD eficiente y vinculada con el desarrollo sustentable. Esto es lo que también se conoce como **Ciclo de Gestión del Riesgo**, cuyo objetivo principal es preparar a la población para enfrentar un evento catastrófico que puede ocurrir en cualquier momento, lugar y circunstancia, para atender la fase de la emergencia con eficiencia, eficacia y previendo que los impactos de las

decisiones del primer momento afecten la sustentabilidad del proceso de reconstrucción posterior. La etapa de respuesta puede durar horas, días e incluso semanas, momento en el cual el desastre debe ser evaluado y debe decidirse dónde reubicar en forma transitoria a la población que resultó damnificada. La etapa de respuesta continúa con el proceso de reconstrucción, el cual es un período de transición entre la emergencia y la reinstalación de la situación “normal” (entendiendo que ésta no necesariamente volverá a ser como antes).

La reconstrucción es un proceso que puede durar semanas, meses e incluso años, dependiendo de la magnitud del daño generado por el evento, y que debe concebirse integralmente considerando tanto los factores de habitabilidad, urbanización, salud física y mental, pero que debe tener como norte un plan que permita que la ciudad o el barrio afectado sea rehabilitado con mejores condiciones de sustentabilidad y resiliencia para la comunidad. Los impactos de la reconstrucción y la calidad de las obras que se desarrollen tendrán un importante impacto en la forma en que la población pueda prepararse para posibles futuros eventos de catástrofe, por lo que la etapa de prevención, que incluye tanto estrategias de educación para la población, el mejoramiento de los planes de evacuación ante posibles amenazas, considerando el nuevo conocimiento y tecnologías que se desarrollen como consecuencia del evento ocurrido, como las obras de reconstrucción y mitigación.

De acuerdo a lo anterior, el presente estudio se enmarca en la etapa de reconstrucción, orientado hacia la solución definitiva de los daños generados por el aluvión de marzo del 2015, pero considerando el desarrollo de un estudio de amenazas que permita planificar mejor las ciudades y localidades afectadas, para prevenir futuros daños, la construcción de las obras de mitigación necesarias para aminorar el impacto de posibles nuevos eventos catastróficos y además, mejorar sustancialmente la calidad de vida de la población de la cuenca de El Salado, ya que luego de este proceso de reconstrucción, probablemente puedan pasar años antes de que sea nuevamente el foco de la inversión en infraestructura pública. En este sentido, el Ciclo de Gestión del Riesgo es también una estrategia que transforma una situación de catástrofe en una oportunidad de desarrollo para la región afectada.

3.3 Marco Legal y contexto de gestión

La Constitución Política de Chile indica en su artículo 1° que “es deber del Estado resguardar la seguridad nacional, dar protección a la población y a la familia, propender al fortalecimiento de ésta”.

Por su parte, la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) establece las disposiciones relativas a la planificación urbana, urbanización y construcción, a través de las cuales el Ministerio de Vivienda y Urbanismo debe velar por que todos los municipios del país cuenten con un plan regulador que delimite las áreas urbanas, las áreas protegidas y de exclusión, así como también los usos permitidos en cada sitio del área urbana.

En este contexto, en marzo del 2014 se presentó la nueva Política Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU), para guiar el desarrollo de las ciudades del país, a través del establecimiento de principios rectores y objetivos comunes que ordenen las múltiples variables que inciden en el desarrollo de las ciudades y centros poblados.

En términos de la gestión del riesgo en las áreas urbanas, el objetivo 3.2 de la nueva PNDU, mandata “identificar y considerar los riesgos naturales y antrópicos en los IPT, así como a “integrar en los mismos el concepto de reducción de riesgo de desastres”, y a “establecer reglas objetivas para el emplazamiento de construcciones en áreas de riesgo”. Es así como comienza a estudiarse cómo incorporar las variables de la gestión del riesgo de desastres en los diferentes instrumentos.

Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) vigentes

Plan Regional de Desarrollo Urbano (PRDU)

Su propósito es orientar el desarrollo de los centros urbanos de las regiones del país, definiendo los roles de los centros urbanos, sus áreas de influencia recíproca, relaciones gravitacionales y metas de crecimiento, entre otros (D° 458/1975, MINVU).

Plan Regulador Intercomunal (PRI) o Metropolitano (PRM)

Su propósito es regular el desarrollo físico de las áreas urbanas y rurales de diversas comunas que, por sus relaciones, se integran en una unidad urbana. Cuando esta unidad sobrepase los 500.000 habitantes, le corresponderá la categoría de área Metropolitana para los efectos de su planificación. En ambos casos, el Plan Regulador constará de un conjunto de normas y acciones para orientar y regular el desarrollo físico del área correspondiente (D° 458/1975, MINVU).

Plan Regulador Comunal (PRC)

Su propósito es promover el desarrollo armónico del territorio comunal, en especial de sus centros poblados, en concordancia con las metas regionales de desarrollo económico-social. Está constituido por un conjunto de normas sobre las adecuadas condiciones de higiene y seguridad en los edificios y espacios urbanos, y de comodidad en la relación funcional entre las zonas habitacionales, de trabajo, equipamiento y esparcimiento. (D° 458/1975, MINVU) Sus disposiciones se refieren al uso del suelo o zonificación, localización del equipamiento comunitario, estacionamiento, jerarquización de la estructura vial, fijación de límites urbanos, densidades y determinación de prioridades en la urbanización de terrenos para la expansión de la ciudad, en función de la factibilidad de ampliar o dotar de redes sanitarias y energéticas, y demás aspectos urbanísticos.

Plan Seccional

El Artículo 46° de la LGUC señala que en los casos en que, para la aplicación del Plan Regulador Comunal, se requiera de estudios más detallados, ellos se harán mediante Planos Seccionales, en que se fijarán con exactitud los trazados y anchos de calles, zonificación detallada, las áreas de construcción obligatoria, de remodelación, conjuntos armónicos, terrenos afectados por expropiaciones, etc.

En las comunas en que no exista Plan Regulador podrán estudiarse Planes Seccionales, los que se aprobarán conforme a lo prescrito en el inciso primero del artículo 43 de la LGUC.

3.4 Contexto de la Planificación Urbana en situaciones de catástrofe

Dado que el plazo promedio de tramitación de los planes reguladores es de seis años, en el contexto de un país que debe enfrentar recurrentes catástrofes y procesos de reconstrucción, se hace necesario también contar con herramientas que permitan al Estado reaccionar con mayor celeridad ante situaciones de emergencia y reconstrucción. Es por esta razón que a través del artículo 116 bis D de la LGUC, se define que “La Ordenanza General de esta ley podrá establecer normas especiales y procedimientos simplificados de aprobación y recepción para la regularización de construcciones y la aprobación de nuevas construcciones que se realicen en zonas que hubieren sido decretadas zona afectada por catástrofe, cuando formen parte de los planes de reconstrucción regionales o municipales, o se trate de reconstruir o reponer construcciones dañadas por la catástrofe”.

La Ley de Sismos y Catástrofes (Ley 16.282/1965), permite, mediante la Declaración de Estado de Emergencia emitido por el Presidente de la República, una modificación más rápida de los Planes Reguladores Comunales (PRC) y Planes Reguladores Intercomunales

(PRI) en las áreas afectadas por el evento catastrófico, en el marco de un plazo máximo de 2 años, mediante un estudio fundado de riesgos.

De esta forma, se agiliza el proceso de reconstrucción urbana, disminuyendo la vulnerabilidad de la población, ya que el plan de reconstrucción debe ajustarse a las modificaciones del plan regulador en cuestión. En este sentido, todas las obras nuevas para las que sean solicitados permisos de construcción, podrán quedar congelados hasta que la modificación sea publicada en el diario oficial.

Normativa en trámite: Modificación a la OGUC

De acuerdo con las experiencias recogidas en las anteriores catástrofes (especialmente el terremoto y tsunami del 2010 (27F) y las del año 2014) el gobierno ha propuesto una serie de modificaciones a aplicar en los IPT, en lo que se denominó “Decreto de Reconstrucción”, documento que modifica principalmente el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), y que se encuentra actualmente en trámite en la Contraloría General de la República.

Dichas modificaciones se fundamentan en el planteamiento de la Nueva Política Nacional de Desarrollo Urbano, que plantea considerar los riesgos naturales y antrópicos en los IPT, integrar en los mismos, el concepto de “Reducción de riesgo de desastres (RRD)” y establecer reglas objetivas para el emplazamiento de construcciones en áreas de riesgo; y en las nuevas disposiciones contenidas en la Ley n° 20.582 (Ley n° 20.852/2012) que modificó el Artículo 27 de la Ley de Sismos y Catástrofes (Ley n° 16.282/1965) y el Artículo 116 bis D) de la LGUC (DS 458/1975, MINVU), para lo cual se propone adaptar el artículo 2.1.17 de la OGUC, que refiere a riesgos en los IPT.

De esta forma, se consolidaron dos nuevas definiciones que afectan transversalmente todos los IPT: **Área de Riesgos**, entendida como el “Área o zona expuesta a peligros naturales o antrópicos definidas, previo estudio de riesgos, por el instrumento de planificación territorial, en la que se establecen restricciones a su uso y/o edificación por razones de seguridad”, y **Estudio de Riesgos**, entendido como el “Documento técnico fundado que forma parte de la memoria explicativa del plan regulador o plan seccional, elaborado por uno o más profesionales especialistas, cuyo objetivo es identificar las áreas expuestas a peligros naturales y antrópicos. Este estudio identifica la naturaleza de los peligros, sus factores condicionantes y desencadenantes, y las áreas expuestas conforme a su grado de susceptibilidad, cuando corresponda”.

En cuanto a “área de riesgos”, el artículo 2.1.17 de la OGUC amplió el horizonte de riesgos posibles de afectar el territorio, identificando las siguientes: áreas con riesgo de inundación, áreas con riesgo de anegamiento, áreas con riesgo volcánico, áreas con riesgo de remoción en masa, áreas con riesgo por la existencia de fallas geológicamente activas o potencialmente activas, áreas con riesgo por mala calidad o inestabilidad del suelo por condiciones naturales, áreas con riesgo por inestabilidad del suelo producto de la actividad humana, y áreas o terrenos deteriorados por actividades humanas extinguidas.

Las modificaciones al artículo 2.1.17 de la OGUC incluyen además un nuevo concepto en relación al nivel de vulnerabilidad: **grado de susceptibilidad del riesgo**. Los grados de susceptibilidad podrán ser clasificados en 5 niveles: muy bajo, bajo, moderado, alto o muy alto, según se observa en la Figura.

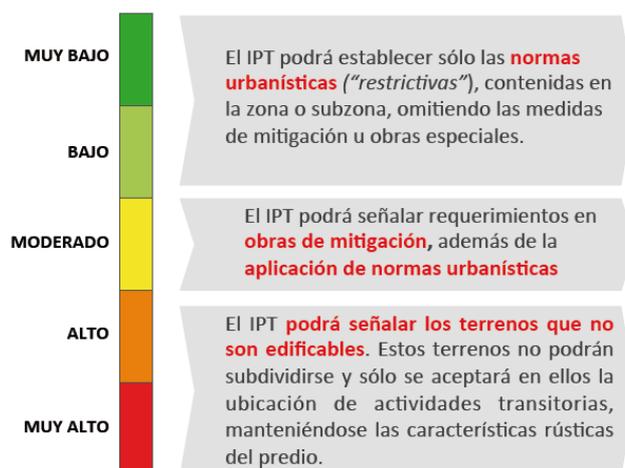


Figura 52 Niveles de Susceptibilidad a ser afectados por amenazas. Fuente: Walker, R.(2015). Exposición "Decreto de Reconstrucción".

Para aquellas áreas de muy alta susceptibilidad de riesgos, el plan regulador no podrá admitir los siguientes destinos cuyas actividades impliquen vulnerabilidad de las personas o edificaciones que deban mantenerse en operación ante situaciones de emergencia, los que se conocen como equipamientos críticos: equipamientos de seguridad, relacionados con carabineros, bomberos, PDI, etc., equipamientos destinados a salud, equipamientos de educación, equipamientos destinados a servicios públicos, hogares de ancianos y casas de acogida, edificaciones destinadas a centros de control de empresas de servicios energéticos y sanitarios, y emisoras de telecomunicaciones, e infraestructura de transporte aéreo.

Es importante mencionar que al momento del desarrollo de este estudio, el Decreto de Reconstrucción aún se encontraba en trámite de aprobación en la Contraloría General de la República, sin embargo, se decidió realizar el estudio de riesgos de acuerdo a las nuevas definiciones de éste, para que los productos que surgieran a partir de él tengan vigencia por más tiempo y así prevenir a la población afectada de futuras amenazas.

Gestión del Riesgo de Desastres en Chile

Debido a la exposición y susceptibilidad a desastres naturales y/o antrópicos, nuestro país se ha visto históricamente forzado a construir un marco operativo y normativo que permita actuar de forma eficiente para evitar pérdidas humanas y materiales ante situaciones de eventos catastróficos, como consecuencia de las principales catástrofes que ha debido enfrentar nuestro país, haciéndose evidente una estrategia más bien reactiva, que preventiva, frente este tipo de eventos.

En la línea de estas acciones, el Estado de Chile firma en el año 2005 el Marco de Acción de Hyogo (MAH), en donde los países partícipes se comprometen a reducir de manera considerable las pérdidas en términos de vidas humanas, bienes sociales, económicos y ambientales ocasionadas por los desastres, y a realizar una serie de acciones para aumentar la resiliencia tanto del país como de sus comunidades ante los eventos catastróficos (Naciones Unidas, 2005). Posteriormente, en el año 2010, la ONU realiza una evaluación del estado de avance donde establece 75 recomendaciones, dentro de las cuales se encontraba como prioritaria la formulación de una Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres que permitiera desarrollar una gestión integral del riesgo frente amenazas (ONEMI, 2014), la cual fue lanzada en el año 2014 por la Plataforma Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres liderada por ONEMI.

Actualmente Chile se ha adherido al Marco Sendai 2015-2030, instancia que elabora las herramientas de Gobernanza de Riesgo de Desastre (GRD) a nivel país, la Política Nacional

para la Gestión del Riesgo de Desastres y su respectivo Plan Nacional (Naciones Unidas, 2015), a la luz de 5 ejes estratégicos:

1. Fortalecimiento estratégico
2. Fortalecimiento de los sistemas de monitoreo y alerta temprana
3. Fomento de la cultura de la prevención y autoaseguramiento
4. Reducción de los factores subyacentes del riesgo
5. Fortalecimiento de la preparación ante los desastres para lograr una respuesta eficaz

Sin embargo, el organismo encargado de la Gestión del Riesgo en Chile, la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI) no tiene injerencia, primero, debido a que su organigrama históricamente no ha velado por una gestión prospectiva, sino más bien por una reactiva, y segundo, debido a que su organización es marcada por su carácter centralista.

3.5 Antecedentes del área de estudio

El evento hidrometeorológico ocurrido en la precordillera de la Región de Atacama entre los días 24 y 27 de marzo de 2015, afectó severamente las localidades existentes al interior de las cuencas hidrográficas de los ríos Copiapó y El Salado, provocando pérdidas humanas y materiales. Debido a la existencia de una serie de condicionantes urbanas y físicas, tales como trazados fluviales indefinidos, ocupación de cauces para construcción de áreas residenciales y su uso como micro-basurales, el desastre acontecido fue particularmente severo en Chañaral, Diego de Almagro y El Salado, localidades ubicadas geográficamente a lo largo de la cuenca del río Salado. En virtud a lo anteriormente descrito, el área de estudio del presente estudio es la cuenca del río Salado, para la cual se realizó un levantamiento de todos los instrumentos de planificación territorial, para develar el nivel de profundidad con que han sido estudiadas las diferentes amenazas que afectan las diferentes escalas territoriales (regional, intercomunal, comunal y local).

A continuación se presentan las conclusiones:

Amenazas Geológicas

Amenaza de Sismo

A nivel regional, el PROT 2011 menciona la amenaza sísmica para el área de estudio, haciendo una revisión histórica de los terremotos que han afectado Atacama, indicando también las áreas de lagunas sísmicas. Por otro lado, la Zonificación de Usos del Borde Costero indica que, de acuerdo a la Norma Sísmica, la región de Atacama es afectada por tres áreas sísmicas, de acuerdo a los distintos grados de intensidad.

A nivel local, el PRC de Diego de Almagro indica que “el modelamiento del área en el que se emplaza la ciudad, sumado al fuerte pasado tectónico, permite observar la presencia de múltiples fallas tanto normales como inversas, lo que hacen de la ciudad extremadamente vulnerable ante episodios sísmicos”.

Respecto de Chañaral y El Salado, en sus correspondientes PRC no hay información relativa a sismos.

Amenaza Volcánica

La amenaza volcánica no está presente en la región de Atacama. Si bien existen 7 volcanes dentro de sus límites, según describe el PROT, ninguno de ellos se encuentra activo, por lo que, como aclara el PRI Costero, “este tipo de eventos o riesgo es inexistente”.

Amenaza de Licuefacción por Sismo

Ninguno de los IPT analizados entrega mayor información respecto de la amenaza por licuefacción. Sólo se indica que existen dos eventos registrados en los que se observó este

fenómeno (PROT), pero no brinda mayores antecedentes.

Amenaza de Remoción en Masa por Sismo

La remoción en masa por sismo, a nivel regional, es presentada por el PROT mediante mapas de pendientes de cuencas y entregando mayor detalle para el caso de Chañaral, donde presenta mapas síntesis de amenaza por remoción en masa en Chañaral.

El mismo instrumento, luego hace mención a la inestabilidad de laderas, indicando que en la región no existen estudios acabados respecto de esta amenaza. Se hace referencia al Estudio Fundado de Riesgos para el PRC de Copiapó (2010), que define una carta de pendientes a partir de las curvas de nivel cada 1 m y zonifica el área urbana en 3 niveles de susceptibilidad de deslizamientos.

Por su parte, el PRI Costero Atacama define conceptualmente un área de riesgos por pendientes y remoción en masa, como “todas aquellas áreas que presenten altas pendientes incompatibles con la urbanización, problemas derivados de riesgos de tipo geofísico, fallas o inestabilidad, inadecuada constitución de terrenos, deslizamientos, rodados de piedras u otros materiales de arrastre” y le asigna una serie de usos permitidos, que corresponden a fines científicos, de área verde y edificaciones con destinos complementarios al área verde. Sin embargo, el instrumento no le asigna un código para su integración en la cartografía, por lo que no es posible identificar territorialmente esta amenaza.

A nivel local, el PRC de Chañaral identifica “ZU-5.2” como Área Residencial de Baja Densidad por Zona de Pendientes, donde la normativa determina las zonas de pendiente expuesta a desencadenamiento de derrumbes y desplazamientos de material. Sin embargo, en vez de prohibir el emplazamiento, la norma urbana indica que los emplazamiento residenciales deben observar las precauciones ambientales y de seguridad, como medidas de mitigación por parte de los propietarios o residentes.

Amenazas Hidráulicas

Amenaza de Inundación por Crecida de Quebradas

A modo de resumen, el PROT señala que en la región no existen estudios acabados respecto a la amenaza por inundación por crecida de quebradas, pero que sí existen registros y trabajos en terreno desarrollados por ONEMI. Sin embargo, esta amenaza aparece incorporada como área de riesgo en algunos PRC de la región, (Diego de Almagro, 2011) y hay obras de mitigación que hacen evidente esta amenaza, como los tranques retenedores de aguas lluvias, por parte de la DOH, en Copiapó (2012)

Por su parte, la propuesta en trámite del PRI Costero de Atacama establece un área de riesgo por escurrimiento torrencial (quebradas), el cual “corresponde a zonas que forma parte del cauce de quebradas, sus laderas y bordes de escurrimiento permanente o intermitente, delimitadas en base a líneas paralelas desde su eje geométrico o el borde que define su cauce”. Por otro lado, también se propone una zonificación específica “ZRN-2” para Riesgo por Inundación y/o Delimitación de Cauces.

A nivel local, tanto el PRC de Chañaral (que incluye el Seccional de El Salado), como el PRC de Diego de Almagro, zonifican las áreas vinculadas con las quebradas. Por un lado, el PRC de Chañaral indica como “Zona de Protección Ambiental” las áreas de protección al lecho de los ríos, canales y quebradas, pero sólo como medida de protección ambiental y no contra amenazas. Como resguardo contra la amenaza, se identifica como “ZU-5.1” el Área Residencial de Baja Densidad por Zona de Quebradas, para la cual se establecen “frangas de protección ambiental y zonas de escurrimientos meteóricos de aguas lluvias. Los emplazamientos residenciales deben observar las precauciones ambientales y de seguridad”. Por otro lado, el PRC de Diego de Almagro identifica como “E-5” las Áreas de Inundación por Quebradas.

Amenaza de Inundación por Crecida de Ríos

Como indica la Memoria del PROT Atacama, "el río Salado es un cauce/quebrada de escurrimiento temporal, como consecuencia directa de precipitaciones intensas. Este tipo de quebradas pueden presentar amenaza por fenómenos de remociones en masa del tipo flujo de detritos, existiendo estrecha relación entre estos fenómenos e inundaciones por escorrentía torrencial de gran velocidad". A pesar de lo anterior, se señala que sólo hay antecedentes históricos de desbordes para los ríos Huasco y Copiapó.

El PROT presenta otros antecedentes para ilustrar la amenaza por inundación fluvial, como un esquema de áreas de inundación y períodos de retorno para un río "X" y el mapa de área de inundación del Río El Salado para la ciudad de Diego de Almagro (PRC, 2011), especificando que sólo éste último aborda la amenaza mediante una zona de riesgo en la cuenca del río Salado y otra en el canal Aguas Claras, del tranque Pampa Austral.

Por su parte, el PRI Costero de Atacama vigente (2001) identifica como "ZPI-7" la Zona de Protección de Cauces y Quebradas (de acuerdo al artículo 2.1.17 de la OGUC), que corresponde a la única mención en la ordenanza del PRI Costero respecto de algún aspecto de la zonificación de riesgo, y que identifica todas aquellas áreas del territorio en las cuales se debe restringir o condicionar el emplazamiento de asentamiento humanos, por considerarse que existe factores físicos de origen natural que amenazan la seguridad de la población.

La propuesta en trámite del PRI Costero identifica como "ZRN-2" la zona de Riesgos por Inundación y/o Delimitación de Cauces de Origen Natural o Artificial. Con respecto de los cauces y cuerpos de aguas superficiales de origen natural, se indica que éstos "corresponden a todos los cauces y principales afluentes pertenecientes a las hoyas hidrográficas de los principales ríos del territorio intercomunal, para los cuales es posible determinar áreas ocupadas por las aguas en eventos de aluvi3n o crecidas fuertes. Se restringe todo tipo de asentamiento humano que implique presencia prolongada de personas o la concentración de ellas sin posibilidad de evacuación expedita y/o que interfieran el curso libre de las aguas". Por otro lado, los cauces artificiales "corresponden a obras de canalización de aguas de riego, tranques o embalses.

Los proyectos respectivos deberán consultar fajas de protección de 5m mínimo, medidos desde el borde del cuerdo de agua hacia cada costado, y de 20, como mínimo en el caso de tranque o embalse. En el caso que los canales se entuben el uso de suelo sobre él será gravado como franja de restricción, sobre la cual no será posible edificar". Para ambos casos, los usos permitidos serán áreas verde y edificaciones con destinos complementarios al área verde, y espacio público.

A nivel local se hace evidente una diferencia con la normativa regional e intercomunal. El Río Salado no aparece trazado en el Plano Regulador Comunal de Chañaral. No se reconoce su existencia, ni se menciona en la Ordenanza del PRC. A pesar de esto, en la memoria del PRC se habla de la cuenca del río Salado, se menciona el cauce del río Salado y el transporte de relaves a través del río Salado.

Por el contrario, en la Memoria del PRC de Diego de Almagro hace un detallado análisis de la amenaza de inundación fluvial. Se identifica como "E-4" el Área de Inundación del a Cuenca del Río El Salado y Canal Aguas Claras, Tranque Pampa Austral. Se señala que los problemas de anegamiento están asociadas, no sólo a condiciones naturales topográficas, hidrográficas y climáticas, sino que fundamentalmente a la intervención antrópica sobre el fondo del valle excavado por la quebrada.

Amenaza de Remoción en Masa por Lluvia

Los IPT regionales lo relacionan a la vulnerabilidad de la red vial: El PROT Atacama menciona los abanicos aluvionales y la vulnerabilidad de la red vial de la región de Atacama por amenaza de remoción en masa.

A nivel intercomunal, la Ordenanza del PRI Costero Atacama 2001 (vigente), no considera el cauce del río El Salado como un área que debe ser protegida, a nivel ambiental, ni tampoco mediante norma urbana.

EL PRC de Chañaral no menciona la amenaza de remoción en masa por lluvia. Por el contrario, el PRC de Diego de Almagro profundiza bastante en ésta, señalando que “las dinámicas aluvionales que han afectado o potencialmente pueden afectar la zona poseen características de corrientes o torrentes de barrio que en ambientes áridos y semiáridos son detritos de meteorización estériles, carentes de carpeta vegetal continua. Estos suelos, al saturarse con el agua de las lluvias torrenciales, pueden perder su estabilidad y empezar a deslizarse, avanzando aguas abajo en forma de flujo muy rápido de barro puro o cargado en distinto grado de clastos y bloques mayores”.

Amenaza de Inundación por Tsunami

La amenaza de Tsunami es bastante estudiada desde el punto de vista histórico. El PROT hace un importante levantamiento de la información relativa a catastros de tsunamis de campo cercano y lejano que han afectado las costas de la región de Atacama. Tanto el PROT como la Zonificación de Usos de Borde Costero presentan como antecedente la Carta de Inundación por tsunami en el Puerto de Chañaral (SHOA, 1998), pero no describen el área de riesgo por inundación en sus cartografías de zonificación respectivas.

Por su parte el PRI Costero del 2001, especifica tres tipos de zonas de protección vinculadas al borde costero, identificadas como “ZPI.1”: Playas Arenosas Menores, Bordes o Sectores Rocosos y Áreas fuera del límite urbano de los PRC en las que se proyecten áreas de desarrollo turístico que contemplen alojamiento masivo en playas arenosas mayores.

A nivel local, el PRC de Chañaral, sin embargo, no hace mención al área afectada por amenaza de tsunamis. A pesar de lo anterior, sí señala dentro de la norma urbana, la vialidad de escape ante la ocurrencia de un maremoto.

3.6 Evento hidrometeorológico marzo 2015

Diagnóstico de la Misión Científica de CIGIDEN

De acuerdo al Informe de la Misión Científica de CIGIDEN “Ciudades de Chañaral, Diego de Almagro y Taltal afectadas por aluviones de marzo 2015”, llevada a cabo por investigadores del Centro entre los días 29 y 31 de marzo del 2015, las principales observaciones del evento hidrometeorológico del 24 al 27 de marzo del mismo año, se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

1. El evento de precipitación se desencadenó producto de un núcleo frío en altura, alimentado por importantes cantidades de humedad provenientes del norte, concurrente adicionalmente con condiciones de temperaturas altas propias del verano en la zona. Fue percibido en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo y las localidades más afectadas fueron Chañaral, Diego de Almagro y Copiapó.
2. Se hace complejo caracterizar correctamente la variación espacial del fenómeno, dada la presencia de altas cumbres de la cordillera de Los Andes (algunas mayores a los 6.000m.s.n.m.) y la carencia de estaciones distribuidas uniformemente en todo el espacio, particularmente sobre los 2.000 m de altura.
3. De la combinación de estimaciones remotas de la precipitación y mediciones mensuales en terreno de la precipitación (mediante Integrated MultiSatellite Retrievals for GPS (IMERG), de la iniciativa Global Precipitation), fue posible estimar la cantidad de agua precipitada para el evento en los principales núcleos del evento, ubicados al sur-este de Copiapó y al este de Chañaral, donde se encuentran los aportes de cabecera del río Salado. En ambos sectores se calcula que cayeron más de 75 mm de lluvia.

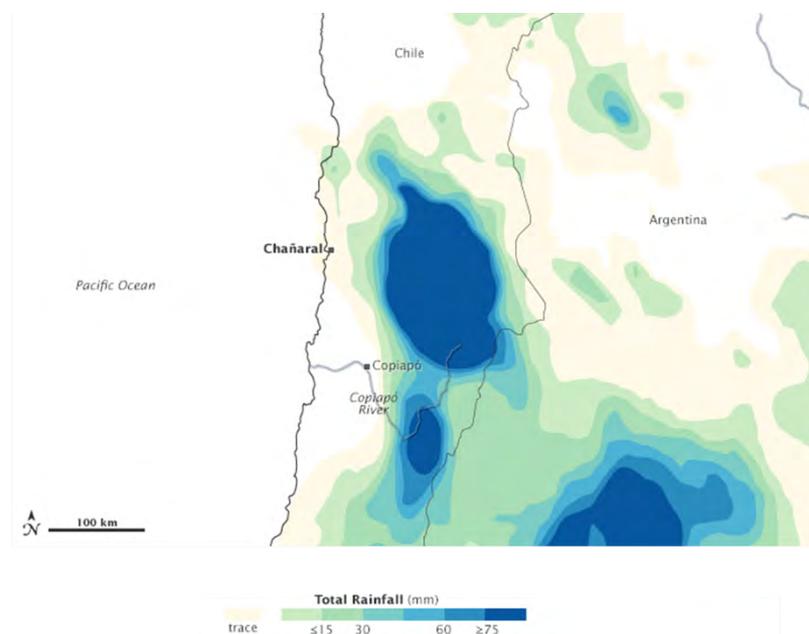


Figura 53 Distribución espacial de la precipitación del evento del 24-27 de marzo. Fuente: Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG), Global Precipitation Measurement

Impactos en Chañaral

1. El flujo aluvional se concentró en el cauce principal del río Salado e ingresó a la ciudad de Chañaral a través de su cauce original, desaguando en la playa de la ciudad. Se observa que aguas arriba de Chañaral, cercano al cruce entre la Ruta 5 Norte y la Ruta C-13 (Camino a Diego de Almagro), el flujo de agua ocupó todo el ancho del valle (210 m de ancho máximo).
2. El sedimento aportado por el flujo aluvional consistió en arena gruesa y grava, que formó un relleno compacto de unos 2 m de espesor que cubrió gran parte de la zona baja de Chañaral, desde la estación Copec hacia el poniente. Se trata de flujos hiperconcentrados.
3. La mayoría de las casas y edificaciones destruidas por el flujo aluvional se concentran en el cauce de la Quebrada del Salado y en la desembocadura del mismo, donde se formó un delta de grandes proporciones.
4. Las formas de erosión que se formaron en la línea de la costa consisten en cuencas erosivas de hasta 15 m de profundidad, con paredes subverticales que cortaron la ruta 5. El mar actualmente ha penetrado en estas zonas y la línea de costa ha avanzado hacia el continente hasta por lo menos 700 m tierra adentro.
5. El evento afectó particularmente los predios existentes alrededor del curso inferior y desembocadura del río. Se estima que aproximadamente un 10% del total (439) de predios urbanos de la ciudad fueron afectados por la inundación, equivalentes a una superficie en terreno de 340.108 metros cuadrados (m²)
6. Exposición respecto del área inundada:
 - De los 439 predios afectados, el uso de suelo más expuesto es el habitacional con 259 predios (6,72% del total de predios habitacionales), seguido por los predios de uso comercial con 71 predios (39,44% del total de predios comerciales).
 - 1/13 equipamientos educacionales (Escuela Básica Gabriela Mistral) expuestos
 - 1/2 centros médicos (Centro de Salud Familiar Dr. Luis Herrera) expuestos.
 - 3/3 organismos de emergencias (Bomberos, Carabineros, PDI) expuestos
 - 2/3 instituciones públicas (Municipalidad y Juzgado de Policía Local) expuestos.

Impactos en El Salado

1. El evento ocurrido en marzo de 2015 afectó particularmente a la localidad de El Salado. Se estima que aproximadamente un 24,83% del total (108) de predios urbanos de la ciudad fueron afectados por la inundación, equivalentes a una superficie en terreno de 36.793 metros cuadrados (m²)
2. El flujo aluvional dividió la localidad en 2 y gran parte de las fuentes de trabajo de la localidad desaparecieron al ser destruido el centro comercial y funcional, ubicadas en el histórico lecho del río, además de todas las casas ubicadas en el cauce del río.
3. Exposición respecto del área inundada:
 - De los 108 predios afectados, el uso de suelo más expuesto es el habitacional con 73 predios (25,98% del total de predios habitacionales), seguido por los predios de uso Otros con 13 predios (81,25% del total de predios uso Otros).
 - 1/2 equipamientos educacionales (Jardín Infantil Arco Iris – JUNJI) expuestos
 - 2/2 organismos de emergencia (Bomberos y Carabineros) expuestos
 - 1/2 centros comunitarios expuestos

Impactos en Diego de Almagro

1. El flujo aluvional inundó la ciudad por distintos frentes, siendo el cauce sur el que causó más daño, generando zanjas de más de tres metros en la zona urbana
2. La inspección aguas arriba permitió reconocer la presencia de relaves, rellenos y desechos mineros. Sin embargo, se puede deducir que el volumen más significativo de los aluviones proviene de la acumulación de agua y barro en las zonas altas de la cuenca.
3. El aluvión hacia el oriente se observó a ambos lados de la carretera, identificándose puntos en que el flujo principal cambia de norte a sur. La gran disponibilidad de sedimentos y la magnitud del caudal permitió un flujo en varios brazos que se desplazaron durante el evento, formando una morfología de trenza.
4. En la zona urbana se identificó una obra de encauzamiento de unos 200 m de largo asociadas al nuevo puente construido por vialidad que sobrevivió, pero su diseño proyectado la hizo insuficiente para mitigar el impacto del aluvión. Se observó erosión y ensanchamiento del cauce antes y después de la obra de encauzamiento.
5. Los cruces viales sobre los causes fueron sobrepasados por el flujo aluvional, al igual que las estructuras de drenaje, que se taparon principalmente con escombros y basura transportada por el flujo.
6. El agua y el barro afectaron aproximadamente un 50% del territorio urbanizado de la ciudad, principalmente en las zonas aledañas al antiguo cauce.
7. Se estima que aproximadamente un 64,02% del total (1.973) de predios de la ciudad fueron afectados por la inundación, equivalentes a una superficie en terreno de 2.753.809 metros cuadrados (m²).
8. Exposición respecto del área inundada:
 - De los 1.973 predios afectados, el uso de suelo más expuesto a la amenaza es el habitacional con 1.655 predios (63,92% del total de predios habitacionales existentes en la ciudad), seguido por los predios de uso comercio con 93 predios (72,09% del total de predios comerciales). Lo anterior es particularmente grave en el sentido que, en primer lugar, más de la mitad de las personas que habitan la ciudad se encuentran localizadas en el área de amenaza de inundación, siendo un indicio de la insuficiente planificación riesgo-sustentable de Diego de Almagro con las consecuencias en términos de pérdidas humanas y materiales. En segundo lugar, una importante cantidad del escaso equipamiento comercial y servicios existente en la ciudad se encuentra expuesto.
 - 4/8 equipamientos educacionales (Esc. De Lenguaje Creponia, Esc. Básica Sara Cortés, Liceo Manuel Magalhaes) expuestos
 - 1/1 centros médicos (Hospital Florencio Vargas) expuesto
 - 2/2 organismos de emergencias (Bomberos y Carabineros) expuestos
 - 3/3 instituciones públicas (Municipalidad, Juzgado de Policía Local y Registro Civil) expuestos.

4. Caracterización de las amenazas

4.1 Estudio fundado de amenaza por amplificación sísmica

El estudio de la amenaza de Amplificación Sísmica consistió en la elaboración de una microzonificación sísmica que divide la zona de estudio en áreas de distinta susceptibilidad de experimentar estos efectos de amplificación, y por lo tanto un movimiento sísmico de distinto nivel de intensidad para las construcciones existentes en cada una de estas zonas. El estudio fue delimitado por las zonas urbanas de las ciudades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro.

La metodología seguida para la definición de estas zonas consistió en el desarrollo de una campaña geofísica y otra geotécnica. El análisis geofísico contempló 45 perfiles de onda de corte (V_s) versus profundidad, los que fueron determinados mediante el uso de arreglos instrumentales de geófonos y posteriormente analizados con metodologías de microvibraciones: ESPAC, F-K activo y F-K pasivo. Otra metodología utilizada fue la obtención del periodo predominante del suelo mediante la técnica de razón espectral H/V, donde se obtuvo el más probable periodo de vibrar de un sitio durante un eventual sismo. Por otro lado, con el objetivo de validar dicha información obtenida mediante técnicas indirectas, se realizaron 14 ensayos de penetración in-situ CPTu, midiendo la resistencia de punta, fuste y la presión de poros.

Apoyados en los resultados de ambas campañas, junto con los antecedentes geológicos disponibles, se elaboró una propuesta de microzonificación sísmica.

La microzonificación se definió según el D.S N°61, que ordena ascendentemente la susceptibilidad a experimentar efectos de amplificación sísmica. Es así como se definieron de forma general las zonas A, B y C las cuales a su vez pueden subdividirse en 1 y 2 para representar las tipologías distintas de los suelos, sobre todo en relación al espesor de sedimentos. De esta forma, mediante el uso de los parámetros como la onda de corte para los primeros 30 metros, la profundidad a la roca ingenieril ($V_s > 800 \text{ m/s}$) y el periodo predominante, se definieron cuatro zonas para la ciudad de Chañaral, cuatro zonas para El Salado y dos zonas para Diego de Almagro.

Conclusiones

De acuerdo a la metodología anteriormente descrita, se pudo concluir que:

- En Chañaral el área más susceptible a efectos de sitio, es el borde costero caracterizado por depósitos aluviales y de playa de 20 a 35 metros de espesor aproximado.
- En El Salado, la zona de mayor susceptibilidad a la amplificación sísmica se ubica en la rivera Norte del río Salado, donde predominan depósitos aluviales y coluviales de profundidad intermedia. También se detectó una zona de menor extensión en la ribera sur que podría tener una susceptibilidad similar a la de la ribera norte.
- En Diego de Almagro, los depósitos son mucho más rígidos y se detectó una costra salina de espesor importante bajo la superficie. En este caso, la susceptibilidad a los efectos de sitio es más bien uniforme en toda la localidad.

4.2 Estudio fundado de amenaza por remoción en masa por sismo

El presente informe sintetiza el trabajo realizado para la evaluación cualitativa del potencial de deslizamientos inducidos por sismo en las laderas del área de estudio, con la finalidad de generar mapas de susceptibilidad frente a la ocurrencia de deslizamientos.

La metodología utilizada combina la recolección de datos en terreno con el posterior análisis y procesamiento mediante herramientas provenientes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Así en primer lugar, se identifican, localizan y describen las laderas, para posteriormente calcular un Índice de Susceptibilidad (IS) para cada una de ellas y elaborar mapas de susceptibilidad a la remoción en masa por sismos.

Campaña en terreno

La toma de datos en terreno fue efectuada los días 12 y 13 de noviembre de 2015, en las localidades de Barquito, Chañaral, El Salado, y Diego de Almagro. Las laderas con evidencia de desprendimientos locales recientes fueron registradas mediante el uso de GPS navegador, además de ser fotografiadas y descritas para su posterior análisis.

Mapas de susceptibilidad

Los mapas de susceptibilidad frente a la ocurrencia de deslizamientos de suelo inducidos por sismo fueron construidos utilizando la metodología detallada en Lara (2007). En esta metodología cada grupo de factor condicionante de deslizamientos en suelo tiene un peso (en porcentaje) que define su grado de importancia en la generación del evento, considerando que las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas son las más relevantes en este aspecto. Las tablas que se presentan más adelante muestran estas relaciones.

El Índice de Susceptibilidad (IS) para cada unidad geomorfológica se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IS_{DS} = \left(\sum_{i=1}^9 f_i \right) \cdot f_{10}$$

Barquito y Chañaral

A partir del cálculo del Índice de susceptibilidad (IS) a deslizamientos inducidos por sismos, se obtuvo un mapa de susceptibilidad para la ciudad de Chañaral y el sector de Barquito.

En él, se observa que la ladera más susceptible es la existente en el extremo este de Barquito, en el sector de Estanques Blancos (Mapa 6.1 a), lugar en el que se combinan diferentes factores condicionantes de deslizamientos (pendientes elevadas, características geológicas-geotécnicas favorables y desestabilización artificial de laderas), presentando de forma mayoritaria índices de susceptibilidad evaluados como medios-altos. Este sector presenta un depósito inestable de suelos arenosos, los que han sido acumulados artificialmente por acción humana como consecuencia de las actividades económicas existentes ligadas principalmente a la minería (dichos estanques son propiedad de AGENOR S.A y contienen Ácido Sulfúrico); esta situación aumenta las posibilidades de producirse un deslizamiento en caso de un movimiento sísmico. No obstante, el sector no presenta asentamientos humanos que pudieran estar expuestos a un evento de estas características.

Otra ladera susceptible es la existente hacia el acceso poniente a la ciudad de Chañaral, en el sector donde se localiza la Armada (Mapa 6.1 b). Particularmente, esta condición está influenciada por una elevada pendiente.

En las inmediaciones del Faro de Chañaral (Mapa 6.1 b) se observa una ladera con una susceptibilidad de media a alta, a cuyos pies se encuentran viviendas unifamiliares, las que se podrían ser potencialmente afectadas por deslizamientos inducidos por sismos. No obstante, tal como se ha señalado, la estimación del deslizamiento de mayores volúmenes de suelo (remoción por potenciales fallas) requiere estudios a mayor detalle.

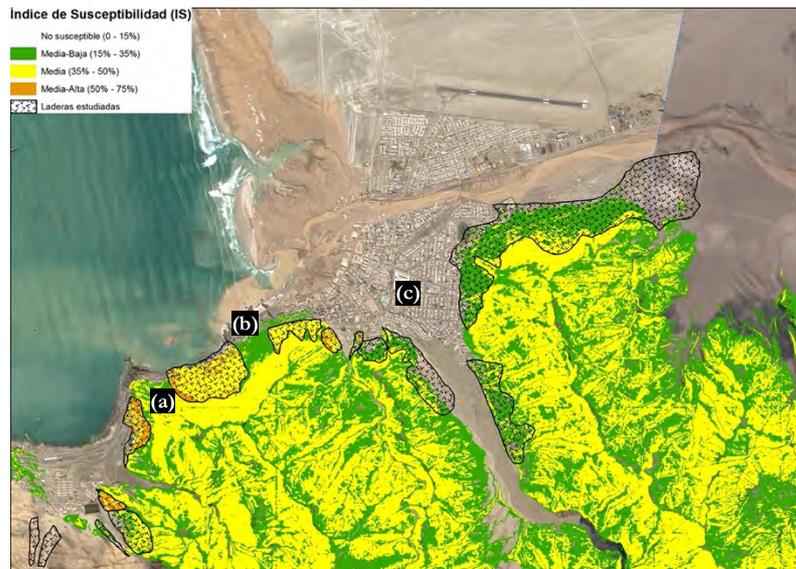


Figura 54 Niveles de susceptibilidad a deslizamientos en Chañaral. Fuente: Elaboración propia.

El Salado

La situación en El Salado, en términos de susceptibilidad de deslizamientos, es más favorable que la observada en las laderas de Chañaral y Barquito. A partir del cálculo del Índice de Susceptibilidad (IS), se establece que en la localidad existe un susceptibilidad media-baja y media de ocurrencia de deslizamientos; dicha condición más favorable, en relación a Chañaral, proviene de las características geológicas-geotécnicas más estables de dichas laderas, ya que igualmente existen pendientes elevadas en el lugar.

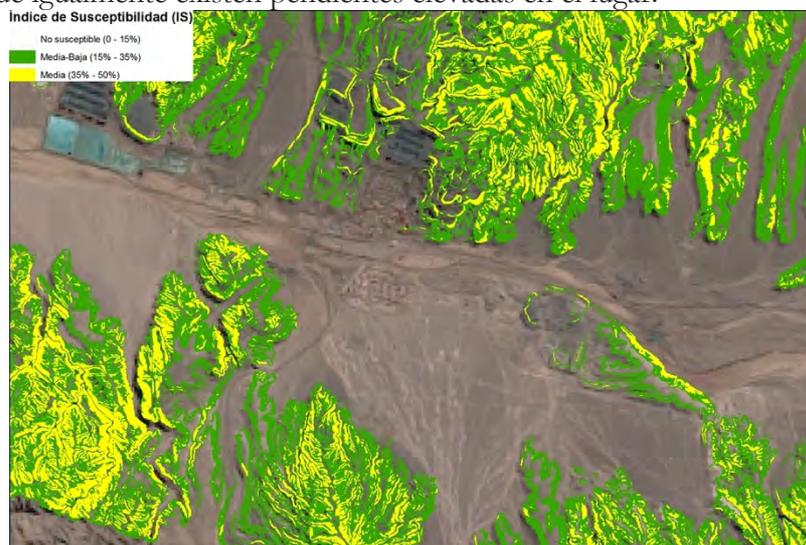


Figura 55 Niveles de susceptibilidad a deslizamientos en El Salado. Fuente: Elaboración propia.

Diego de Almagro

Al igual que El Salado, la ciudad de Diego de Almagro presenta condiciones menos favorables para la ocurrencia de deslizamientos. Como se observa en el Mapa 6.3, gran parte de las laderas de la ciudad presentan una susceptibilidad de media a baja. Las laderas más susceptibles son del cerro sur acceso poniente (Mapa 6.3 a), cerro sur acceso poniente (Mapa 6.3 b) y cerros en borde norte del acceso oriente (Mapa 6.3 c). De forma similar a El Salado, las características geológicas y geotécnicas (mayoritariamente taludes rocosos) configuran laderas menos favorables a la ocurrencia de potenciales deslizamientos. Por último, cabe señalar, que las áreas más susceptibles de la ciudad se encuentran alejadas del desarrollo urbano.

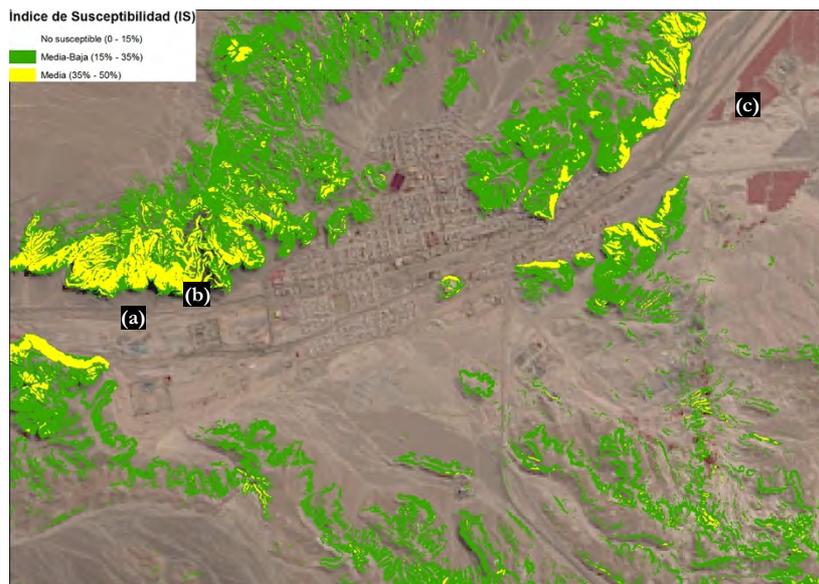


Figura 56 Niveles de susceptibilidad a deslizamientos en Diego de Almagro. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los mapas de susceptibilidad frente a la ocurrencia de deslizamientos de suelo inducidos por sismo, fueron construidos con la metodología detallada en Lara (2007), en la cual cada grupo de factor condicionante de deslizamientos en suelo tiene un peso (en porcentaje) que define su grado de importancia en la generación del evento, considerando que las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas son las más relevantes en este aspecto. En este caso, las características más relevantes fueron aquellas asociadas a la topografía de las localidades, a las características geológicas-geotécnicas del material superficial, y a la potencial desestabilización artificial de laderas.

Como resultado de la aplicación de esta metodología, cada sector queda con un valor porcentual asignado, entre 0% y 100%, el que posteriormente fue categorizado en cinco grados de susceptibilidad para la generación de los mapas respectivos (las laderas con pendientes menores o iguales a 15° se consideraron como no susceptibles a experimentar deslizamiento de suelo inducido por sismos). Como resultado, se estima que las laderas de las localidades de Diego de Almagro y de El Salado tienen un grado de susceptibilidad medio-bajo (en la mayoría de los casos) a medio (en algunas zonas) de experimentar deslizamientos inducidos por sismos.

En Chañaral, este grado varió entre medio-bajo y medio-alto, similar a lo obtenido para la localidad de Barquito. En cualquier caso, el tipo de deslizamiento que eventualmente podría ocurrir en estas localidades se estima que sería de material más bien superficial, aunque se requieren más estudios para descartar la potencial falla (remoción) de mayores volúmenes de suelo.

4.3 Estudio fundado de amenaza de licuefacción inducida por sismo

El presente informe sintetiza el trabajo realizado para la identificación de suelos potencialmente licuables en las localidades estudiadas. Para que ocurra licuefacción o licuación de suelos se requiere, además de un terremoto suficientemente severo, de que los suelos sean principalmente granulares, que se encuentren en condición suelta y que, además, se encuentren en condición saturada.

La metodología utilizada consideró los resultados de una campaña en terreno en la que se ejecutaron 52 ensayos de penetración de cono (CPT, Cone Penetration Test): 25 en Barquito y Chañaral, 15 en El Salado y 12 en Diego de Almagro, además de mediciones de ondas de corte (Vs).

De los ensayos realizados, el que entrega información respecto a la ubicación de la napa freática es el ensayo CPT. De todos los ensayos CPT realizados, sólo uno mostró la presencia de nivel freático a las profundidades exploradas (las profundidades que no pudieron ser exploradas corresponden a estratos de suelos demasiado densos como para ser considerados licuables). En síntesis, y en base a la información recopilada, el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de licuación de suelos por sismos en las localidades de Diego de Almagro y El Salado es considerado nulo. Esta conclusión es igualmente cierta para la localidad de Chañaral, con la excepción del punto específico indicado más adelante. Los perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) versus profundidad, vienen a corroborar lo obtenido mediante los ensayos CPT. Vale decir, verifican en profundidad la presencia de estratos muy rígidos, los que pueden considerarse como no-licuables.

Respecto del punto específico que mostró presencia de agua fue el identificado como C4-B, cerca de la playa actual, donde el nivel freático aparece a ~5.5 metros de profundidad, tal como muestra en el Figura 57. Si se considera un sismo de diseño similar al utilizado en normas de diseño nacionales como la NCh433 (para edificios), con una magnitud de momento $M_w=8.0$ y una aceleración máxima en superficie de $0.4g$, se obtiene que ocurriría licuefacción del suelo que está entre los 5.5 metros y 6.5 metros de profundidad, aproximadamente (ver Figura 57), lo que induciría asentamientos en superficie del orden de los dos a tres centímetros.

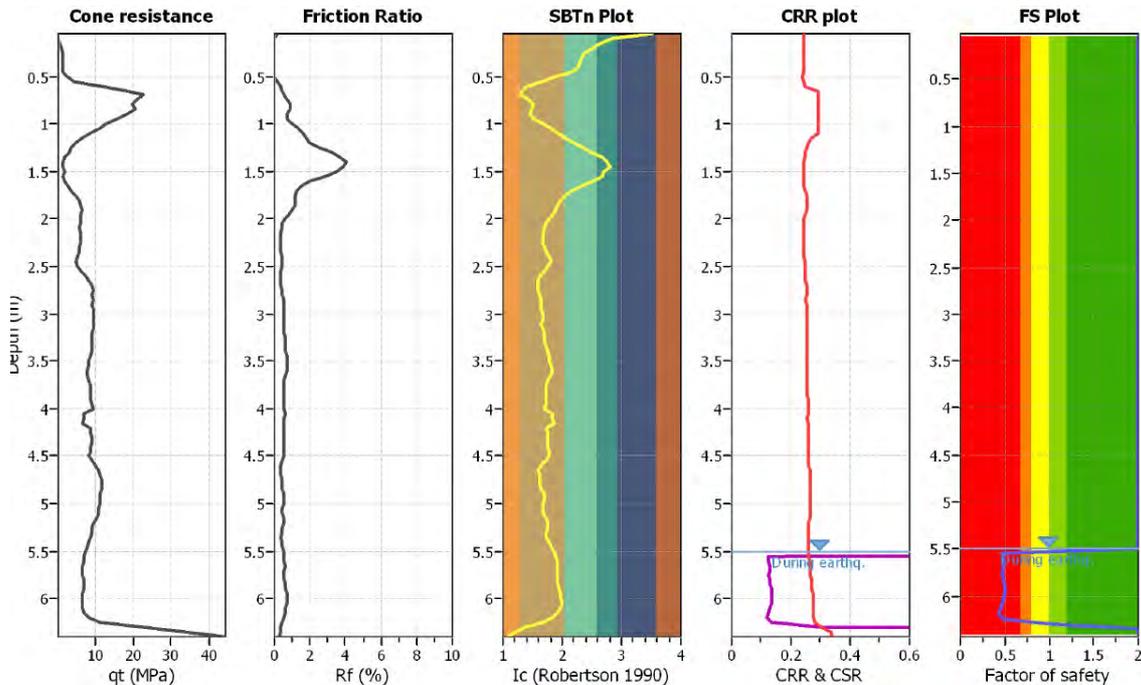


Figura 57 CPT medido en el punto C4-B en la localidad de Chañaral. Fuente: Elaboración propia

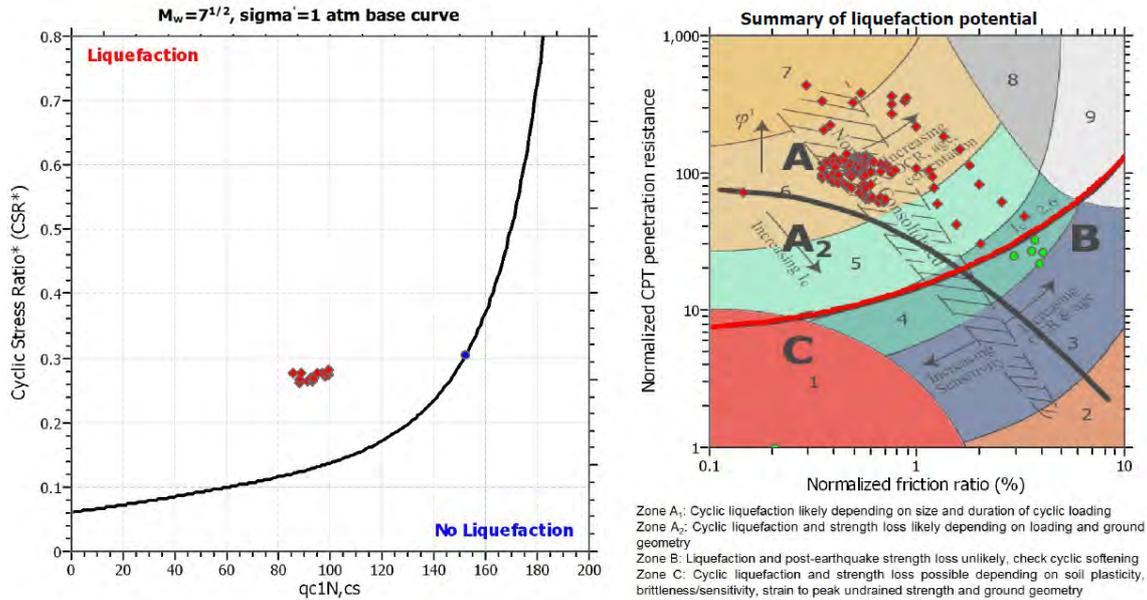


Figura 58 Potencial de licuación en el punto CA-B de la localidad de Chañaral. Fuente: Elaboración propia

En los otros puntos de la localidad de Chañaral donde se ejecutaron ensayos CPT no fue posible encontrar la presencia de napa freática por lo que, en base a estos resultados, el resto de la localidad puede ser considerado con un grado de susceptibilidad nulo respecto a la ocurrencia de licuación de suelos inducidos por sismo.

Conclusiones

La campaña geotécnica en terreno de este estudio consideró la ejecución de una serie de ensayos de penetración de cono (CPT, Cone Penetration Test), y de medición de ondas de corte (V_s) en los primeros 30 metros de profundidad. De los ensayos realizados el que entrega información respecto a la ubicación de la napa freática (condición necesaria para que ocurra licuefacción de suelos) es el ensayo CPT. De todos los ensayos CPT ejecutados, sólo uno mostró la presencia de nivel freático a las profundidades exploradas (las profundidades que no pudieron ser exploradas corresponden a estratos de suelos demasiado densos como para ser considerados licuables). En base a la información recopilada, el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de licuación o licuefacción de suelos por sismos en las localidades de Diego de Almagro y El Salado es considerado nulo. Esta conclusión es igualmente cierta para la localidad de Chañaral, con la excepción del sector específico que se señala en el mapa respectivo, donde existe riesgo de licuefacción, pero acotado al estrato que se ubica entre los 5.5 metros y 6.5 metros de profundidad, aproximadamente.

4.4 Estudio fundado de amenaza de inundación por tsunami

En este estudio se presentan los resultados de la modelación de tsunamis para Chañaral, de modo de caracterizar la amenaza existente frente a este tipo de fenómenos naturales. De acuerdo con la metodología propuesta, se han planteado ocho escenarios de tsunami, tomando en consideración los casos históricos y su sensibilización. En vista de la gran incertidumbre asociada al conocimiento sismo-tectónico y a la imposibilidad de plantear escenarios determinísticos con una base de amplio respaldo teórico, se han evaluado escenarios de terremotos de subducción de localizados frente a la zona de estudio con magnitudes que varían entre 8 Mw y 9 Mw. Entre ellos se han seleccionado para la confección de los mapas de amenaza una combinación de 4 escenarios que entregan las peores condiciones para la inundación de tsunami en la ciudad de Chañaral. La propagación de tsunamis y la estimación de la inundación se ha realizado con las mejores herramientas e información topo-batimétrica disponibles para este estudio, produciendo mapas de inundación y sus variables asociadas (profundidad de agua, *run-up* máximos, y velocidades) con una resolución de 3 metros.

Modelo Numérico

Se utilizó el modelo GeoClaw para realizar las simulaciones, desarrollado por LeVeque et al. (2011) y Berger et al. (2011), código validado (Arcos & LeVeque, 2015; González et al., 2011) y aprobado por el United States Tsunami Hazard Mitigation Program (NTHMP) como herramienta de modelación de amenazas (MacInnes et al., 2013).

Topo-batimetría

Se utilizó la topografía y batimetría de la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (Becker et al., 2009; Smith & Sandwell, 1997) para la propagación en aguas profundas. En la Figura 6.4 se presenta el área utilizada para la propagación local, la malla se generó a partir de datos de GEBCO junto con las Cartas Náuticas del SHOA.

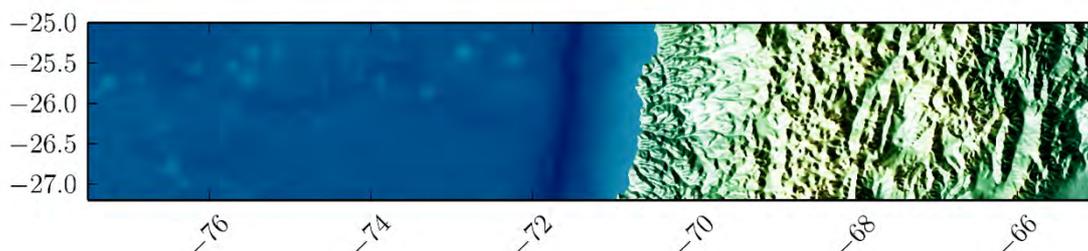


Figura 59 Batimetría usada a nivel regional Fuente: Elaboración propia

Mientras que para la inundación en Chañaral, se utilizaron datos ASTER Global Digital Elevation Map (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>), de las Cartas Náuticas del SHOA, del ASTER, de la Dirección de Obras Portuarias, de la Municipalidad y datos LIDAR con resolución de 4 metros en Chañaral obtenidos por el Servicio Aero Fotogramétrico de la Fuerza Aérea (SAF) (Figura 2.4).

Resumen de escenarios

En la Figura 6.5 se presentan los niveles de susceptibilidad a la inundación por tsunami en Chañaral.

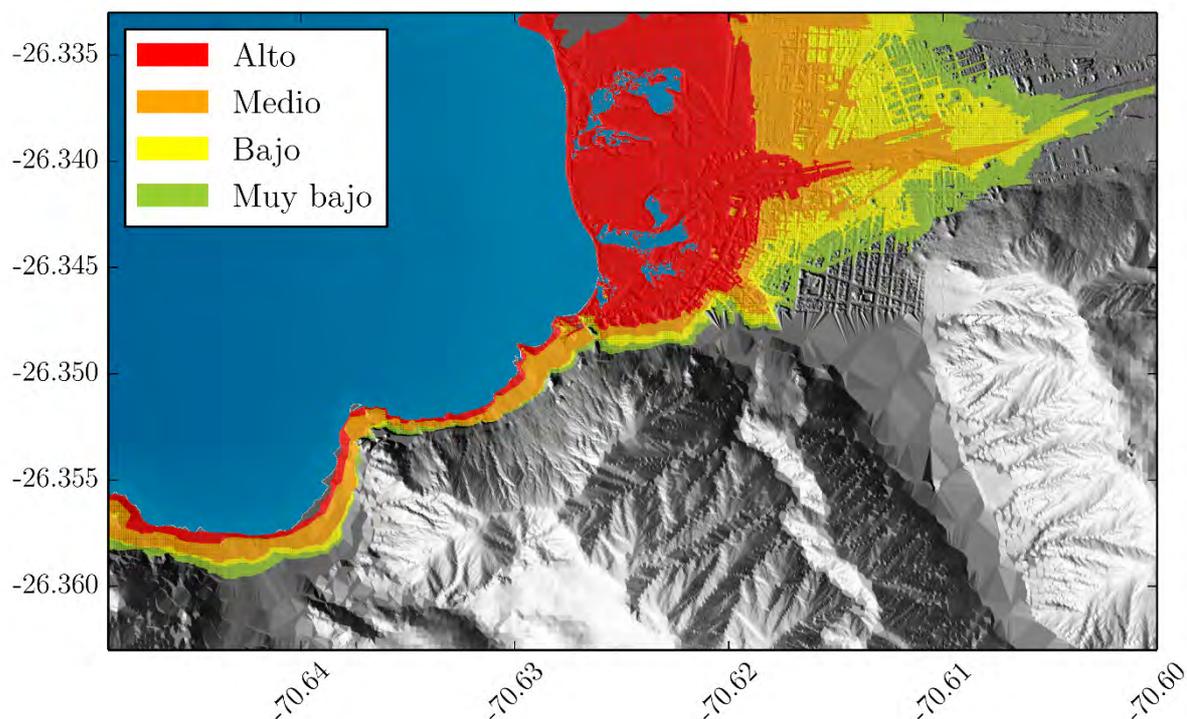


Figura 60 Niveles de susceptibilidad a la inundación por tsunami. Fuente: Elaboración propia

4.5 Estudio fundado de amenaza de inundación fluvial

La cuenca del Río Salado se encuentra en la región de Atacama y tiene una superficie de 7528.4 Km² y una longitud del cauce de 175 Km. Si bien esta cuenca es extremadamente árida, está sujeta a la ocurrencia esporádica de tormentas fuertes, que pueden generar fuerte crecidas y eventos aluvionales cada cierto tiempo en la zona. Un ejemplo de estas crecidas es la que ocurrió entre el 24 y el 26 de marzo del 2015, la que afectó enormemente a la población e infraestructura pública y privada de las localidades de Chañaral, Salado y Diego de Almagro. Durante este evento complejas interacciones entre el clima, las características geomorfológicas de la región, y la intervención humana, generaron un gran volumen de agua y sedimentos. La naturaleza de esta crecida sin embargo es difícil de evaluar, ya que sólo hay información cuantitativa básica disponible para caracterizar el régimen hidrológico en esta zona del desierto. La falta de datos hidrometeorológicos y resolución espacial y temporal insuficiente de los registros de precipitación aumenta la incertidumbre en la estimación de los caudales de los ríos afectados por la tormenta.

Este estudio busca caracterizar el riesgo por crecidas en las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro. Con tal propósito se utiliza como información base el evento de marzo de 2015. A partir de esta información, y considerando la incertidumbre en la concentración de sedimentos en suspensión y la resistencia al flujo, se reconstruye el caudal máximo instantáneo de la crecida en Chañaral. Paralelamente se construyó un modelo hidrológico semidistribuido para toda la cuenca en SWMM, el cual se calibró para reproducir este caudal máximo estimado. Luego el modelo calibrado se utilizó para estimar el caudal máximo en las localidades de El Salado y Diego de Almagro. Estos caudales corresponden entonces a la condición de amenaza de inundación fluvial para las tres localidades. Finalmente, el área de inundación y las condiciones de flujo se estiman mediante un modelo 1D (Hec-Ras) en Chañaral y el Salado, y un modelo 2D en Diego de Almagro.

El análisis hidráulico de los caudales para las tres localidades requirió de una caracterización de alta resolución del lecho del río y la planicie de inundación. Esta caracterización se realizó a partir de una combinación de fuentes de información topográfica y batimétrica, incluyendo aerofotogrametría (SAF, Julio 2015) y mediciones realizadas en terreno del 3 al 6 de noviembre de 2015. Esta campaña de terreno consistió principalmente en medir la batimetría del Río Salado con alta precisión en las zonas de estudio, empleando un GPS diferencial (DGPS). Adicionalmente se midieron las dimensiones de la infraestructura principal en el cauce, i.e. puentes y pasos peatonales que pueden producir cambios en la velocidad y profundidad del flujo durante el evento de crecida.

Los resultados de la modelación indican que para la localidad de Chañaral el flujo pasa mayormente por el cauce principal, el cual fue modificado posterior al evento de marzo de 2015, aumentando significativamente su capacidad. Así entonces el análisis verifica los impactos positivos de esta modificación y muestran que las consecuencias observadas durante el evento de marzo no se repetirían si la misma crecida volviese a ocurrir..

En el caso del El Salado, es posible apreciar que a diferencia de lo ocurrido el 25 de marzo de 2015, la misma crecida produce un flujo que se propaga hacia la dirección Sur de la ciudad, generando profundidades de inundación cercanas a 1 m. Este cambio se debe a la modificación en la topografía luego de la crecida, específicamente en el sector de la mina .

Finalmente para Diego de Almagro, más del 70% de la ciudad se ve afectada por sobre 1 m de altura de inundación y velocidades superiores a los 1,5 m/s. Esta combinación puede erosionar el lecho en múltiples sectores, principalmente en el eje principal de la ciudad definido por la ruta C-13, la que conecta Diego de Almagro con Chañaral.

Todos estos resultados se consolidaron en forma gráfica en planos de zonificación del riesgo que muestran las zonas en riesgo bajo distintas condiciones de susceptibilidad.

Es importante destacar que los resultados de la modelación hidráulica presentados en este informe responden a las condiciones actuales del río, y no pueden extrapolarse directamente a lo que puede ocurrir si estas nuevas modificaciones futuras toman lugar.

4.6 Estudio fundado de amenaza de remoción en masa por lluvia

El fenómeno de remoción en masa por precipitación corresponde al proceso, lento o rápido, de movilización descendente de una porción de terreno constituido por roca y/o suelo, por efecto de la gravedad. La remoción en masa se asocia a la interacción de factores condicionantes, los cuales generan una situación potencialmente inestable, y los factores desencadenantes o factores externos que ayudan a desencadenar el proceso. En el caso de la remoción por eventos de precipitación el factor desencadenante es la lluvia. Estos fenómenos generalmente provocan un gran deterioro en el relieve del lugar, comprometiendo el paisaje, la vegetación y el suelo, y son una de las amenazas geológicas de mayor importancia en Chile.

Este estudio busca caracterizar el riesgo por remoción en masa detonado por precipitación en las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro. Este problema es importante ya que no hay registros de fenómenos de este tipo en la zona, ni tampoco ocurrió nada durante la tormenta del 24-26 de marzo del 2015. Habitualmente el análisis de riesgo considera la inclusión de los factores tanto condicionantes como desencadenantes, así como la definición o cuantificación de la susceptibilidad de que ocurra el evento de remoción. Sin embargo resulta muy difíciles evaluar la variable desencadenante en la zona de estudio dada la poca frecuencia de precipitación. Por lo tanto, la metodología adoptada es de carácter cualitativo y utiliza fundamentalmente la información topográfica detallada, y no así información geológica local o propiedades geotécnicas del suelo. En particular la metodología se basa en un análisis comparativo con lo ocurrido en Tocopilla, agosto de 2015, donde en tres zonas se produjeron eventos de remoción.

Posteriormente se identificaron 2 factores condicionantes relevantes propios de estas zonas: la pendiente en el área de remoción, el área acumulada aportante que recibe

precipitación. Para estos dos factores se identificaron valores críticos asociados con los 3 eventos de remoción, y posteriormente se buscó la ocurrencia de estos valores en las 3 localidades del área de estudio. Aquellas zonas donde se presenta esta ocurrencia corresponden entonces a laderas con riesgo de remoción por precipitación.

A partir del análisis en Chañaral se identifican dos zonas ubicadas en la parte Sur de la ciudad que limitan con algunas de sus calles. En el caso de El Salado se identifican dos zonas ubicadas en la parte Norte de la localidad las cuales no alcanzan a afectar la zona residencial. Finalmente, para Diego de Almagro se identifican tres zonas ubicadas en la parte Nor-Este y Sur-Este, las cuales cubren parte de la zona urbana donde actualmente se presentan instalaciones de tipo industrial. Todos estos resultados se consolidaron en forma gráfica en planos de zonificación del riesgo que muestran las zonas bajo riesgo, y aquellas exentas de éste.

El análisis de fotografías aéreas históricas de las localidades en estudio muestra que no se han producido eventos de remoción en los últimos 10 años. Esto indica que otros factores condicionantes o detonantes no se presentaron al extremo de producirse la remoción. En particular la precipitación ha sido bastante menor en las localidades. Por lo tanto, el análisis acá presentado debe ser entendido como una primera aproximación muy cualitativa para identificar zonas de riesgo. La metodología propuesta identifica zonas que deben ser entendidas la luz de los supuestos utilizados. De este modo, las áreas marcadas como de riesgo corresponden más bien a zonas relativamente extensas, en cuyo interior se presentan condiciones que podrían propiciar una remoción frente a una precipitación importante. Estos eventos de remoción implicarían superficies menores a la zona completa de riesgo demarcada.

