SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA TORMENTA 25M EN LA CUENCA DEL RÍO HUASCO: VALIDACIÓN DE CAUDALES USANDO DATOS SEDIMENTOLÓGICOS

TOMÁS GÓMEZ Z.[1]
JAVIER CEPEDA A.[2]
MIGUEL LAGOS Z.[3]
SANTIAGO MONTSERRAT M.[4]

RESUMEN

Durante los días 23, 24 y 25 de marzo del año 2015 se desarrolló una tormenta en el área norte del país, en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, que provocó una serie de daños debido a los flujos de detritos y barro y a las inundaciones generadas. En particular, en la parte superior de la cuenca del río Huasco, en las áreas de los ríos El Carmen y El Tránsito, un conjunto de quebradas se activaron y desarrollaron flujos aluvionales que afectaron a la población, dañando viviendas y zonas agrícolas.

En este trabajo se plantea un modelo hidrológico desagregado a escala de quebradas para la cuenca del río Huasco, obteniéndose estimaciones de los hidrogramas a la salida de distintas quebradas de la zona. Para esto, se plantea un modelo hidrológico basado en hidrogramas unitarios para cada elemento y contrastando con valores registrados en estaciones fluviométricas en la zona de cabecera. Utilizando información de volúmenes de sedimentos acumulados, se realiza un análisis de la credibilidad de los caudales estimados. Del análisis realizado, se concluye que a nivel macro la hidrología de la cuenca se logra representar adecuadamente. Sin embargo, a escala de quebradas los caudales pueden ser subestimados debido a efectos locales no considerados en la información de entrada al modelo. Para estos puntos se propone una metodología alternativa de estimación de caudales modificando parámeteos asociados a la infiltración.

[1] Ingeniero Civil, Centro Avanzado para la Minería, AMTC, Universidad de Chile. tgomez@ing.uchile.cl
[2] Ingeniero Civil, Universidad de Chile. j.cepeda.abad@gmail.com
[3] Ingeniero Civil, MSc., Centro Avanzado para la Minería, AMTC, Universidad de Chile. miguel.lagos@amtc.uchile.cl
[4] Investigador asociado, Ph.D, Centro Avanzado para la Minería, AMTC, Universidad de Chile. santiago.montserrat@amtc.uchile.cl

1 INTRODUCCIÓN

Entre los días 23 y 26 de marzo de 2015 ocurrió un evento de precipitaciones de gran intensidad, conocido como 25M, que afecto a las zonas norte y centro del país. El evento tuvo consecuencias desastrosas tanto para la población como para la infraestructura, debido a inundaciones y aluviones, que ya han sido estudiados en algunos sectores (Estellé et al, 2015; RyQ, 2015). En particular, en la parte montañosa de la cuenca del río Huasco, en los valles de los ríos El Carmen y El Tránsito, se produjeron distintos procesos aluvionales o de remociones en masa, que provocaron daños directos sobre la población y sus actividades, afectando principalmente viviendas, plantaciones agrícolas e infraestructura vial.

Debido a estas consecuencias, y con el fin de evitar daños similares a los ocurridos durante el 25M, es que se ha tomado interés en lograr representar adecuadamente las condiciones hidrológicas ocurridas durante dicho evento, para eventualmente implementar obras de defensa fluvial ante fenómenos hidrológicos y aluvionales similares.

En el presente trabajo se presenta una modelación de la cuenca definida por la estación Huasco en Chepica, considerando para esto distintas sub cuencas a escala de quebradas. El objetivo del estudio es obtener no solo una modelación general de la macro cuenca, sino también los hidrogramas asociados a quebradas laterales aportantes al cauce principal, donde ocurrieron mayormente los flujos aluvionales.

2 ANTECEDENTES

La zona de estudio corresponde a la parte alta de la cuenca del río Huasco, que se encuentra en la III región de Atacama. La zona se sitúa entre las latitudes 28°46’ a 29°58’S y longitudes desde los 70°28’ a 71°16’W. La definición de la cuenca queda dada por la estación fluviométrica río Huasco en Chepica, aguas arriba del embalse Santa Juana.

Hidrológicamente, el área de estudio corresponde a la macro-cuenca del río Huasco, con área total de 7242 km² aproximadamente. Los tramos comprendidos involucran:

a. El cauce del río Carmen hasta su confluencia con el río El Tránsito, así como la hoya hidrográfica aportantes.
b. Los cauces de los ríos Chollay y Conay hasta su confluencia, donde comienza el río El Tránsito. Estas cuencas presentan un área de 774.9 km² y 1794.1 km² respectivamente.
c. El cauce del río El Tránsito, que comienza en la confluencia de los ríos Conay y Chollay, hasta la confluencia con el río El Carmen, donde se inicia el río Huasco.
d. El tramo del cauce del río Huasco comprendido desde su origen (el punto de confluencia entre los ríos Carmen y Tránsito) hasta aproximadamente 12 kilómetros aguas abajo, donde se encuentra el embalse Santa Juana.

Las estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas en este estudio se presentan en la Tabla 1, mientras que en la Figura 1 se presenta un esquema de la zona de estudio.

Tabla 1 Estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas para el estudio.

Estación	Cota	Latitud	Longitud	Variable
Portezuelo El Gaucho	4000	-28.6231	-70.045	T
Vallenar DGA	420	-28.5861	-70.7397	Pp
Santa Juana	560	-28.6672	-70.6625	Pp, T
Rio Huasco En Algodones	750	-28.7306	-70.5067	Pp
Junta Del Carmen	770	-28.7539	-70.4817	Pp
El Transito	1100	-28.8731	-70.2822	Pp, T
San Félix	1150	-28.9311	-70.4614	Pp, T
Conay En Albaricoque	1600	-28.9519	-70.1106	Pp, T
Domeiko	780	-28.9544	-70.8936	Pp
Conay	1450	-28.975	-70.1533	Pp, T
El Parral	1400	-28.9797	-70.1986	Pp
El Corral	1820	-29.1383	-70.3778	Pp
Rio Conay en Las Lozas	1560	-28.9490°	-70.1033°	Q
Rio Carmen En El Corral	2000	-28.75369	-70.48496	Q

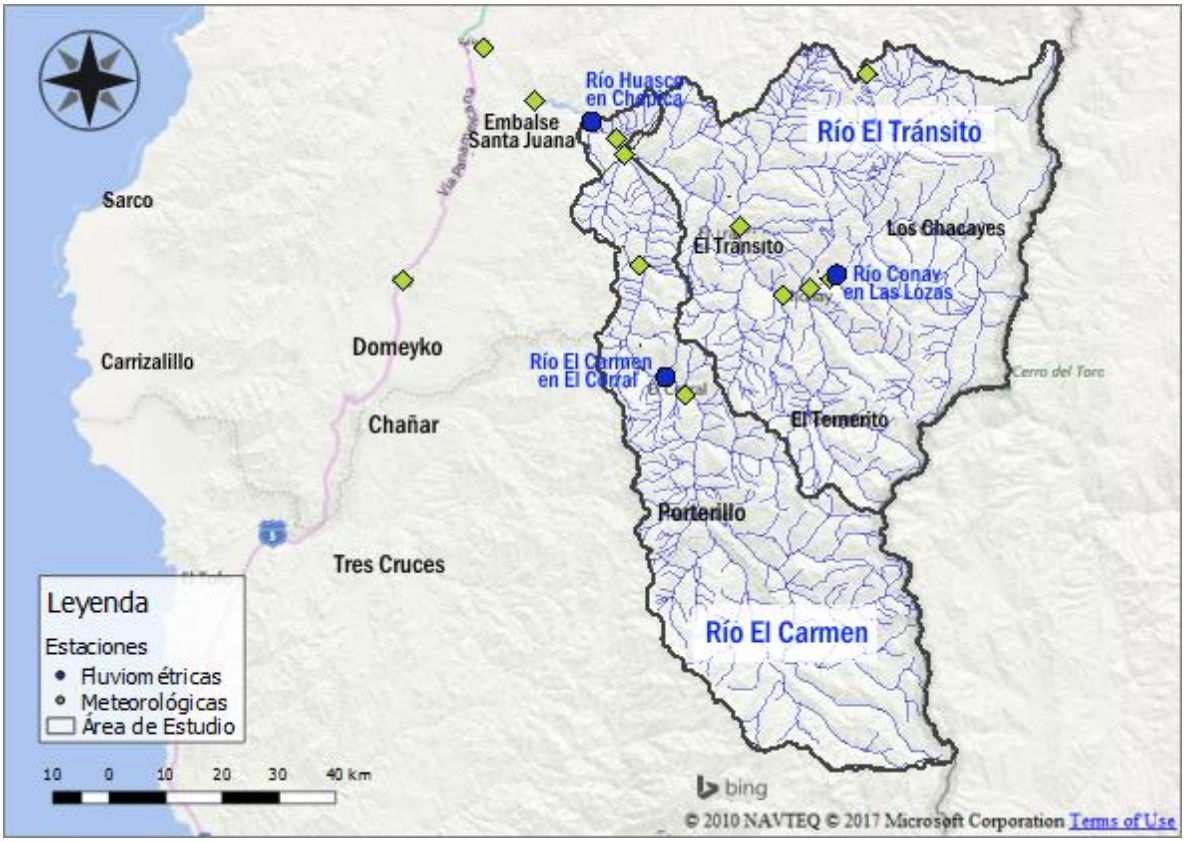

Figura 1 mapa general del área de estudio. Se muestran separadas las cuencas de los principales afluentes del río Huasco: río El Carmen (cuenca sur) y río El Tránsito (cuenca norte).

Un elemento importante a considerar es la presencia del embalse Santa Juana, que en el evento del 25M independizó completamente los sistemas hídricos aguas arriba y aguas abajo de él, dado que presentaba un gran volumen disponible antes del evento. Esto permitió que el embalse contuviera todos los flujos de crecida provenientes de la cuenca en estudio. El embalse se ubica 10 kms. aguas abajo de la estación río Huasco en Chepica.

Estudios geológicos previos (Aguilar, 2015; Fredes, 2016) trabajaron sobre un conjunto de quebradas con el fin de identificar la susceptibilidad de generar aluviones y compararlas con aquellas activadas durante el 25M. Este procedimiento fue realizado en base a la observación de los depósitos observados durante una campaña de terreno realizada en abril del 2015, utilizando imágenes satelitales posteriores al evento provenientes del satélite *RapidEye*[5]. La información de volúmenes depositados resulta útil para evaluar el desempeño del modelo hidrológico en las quebradas laterales afluentes a los cauces fluviales donde no se tiene información. En base a esto, se cuenta con información de un total de 74 quebradas respecto a si se activó o no. En caso de que se activó, se cuenta con el volumen de sedimentos depositados en el cono aluvional a la salida de la quebrada.

3 METODOLOGÍA

3.1 MODELO HIDROLÓGICO

El objetivo principal de este trabajo es replicar la hidrología de los caudales observados en el evento 25M a lo largo de los cauces principales de río, así como también realizar estimaciones para las quebradas aportantes a estos. Para esto, se utilizara el modelo HEC-HMS[6], que corresponde a la familia de los modelos precipitación-escorrentía. Dicho modelo permite representar una macro-cuenca a través de la interacción de elementos, entre los cuales destacan particularmente para este trabajo los elementos de subcuenca, río y confluencia.

Un elemento de subcuenca permite representar cualquier hoya hidrográfica, según sean las necesidades. Es posible utilizar estos nodos para representar cuencas completas en tan solo un elemento, o la compatibilización de múltiples nodos para representar una red dendrítica apropiadamente. Cada quebrada, cuenca intermedia o cuenca de cabecera se representa entonces con un elemento de subcuenca. Esto permite obtener la respuesta hidrológica a la precipitación para cada área representada. Los resultados de cada uno de ellos son compatibilizados y transitados a través de elementos de confluencia y de río, de manera que se obtiene el hidrograma en los cauces principales en puntos especificados en la definición del modelo.

La escorrentía en cada elemento es calculada usando un hidrograma unitario sintético del tipo propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS, 1972). La utilización de este método requiere tener información geomorfológica del área de estudio, la que se obtuvo mediante imágenes satelitales provistas por la misión ALOS-PALSAR (Rosenqvist et al, 2007), que entregan un modelo de elevación digital (*DEM*, por sus siglas en inglés), con una resolución espacial de 12.5 x 12.5 m por pixel, con la cual se realiza la definición de las quebradas. Se delimitaron un total de 125 elementos entre quebradas laterales y cuencas de cabecera, y 36 cuencas intermedias en el área de estudio, con superficies que varían desde 0.04 km² a 2446 km².

---

[5] http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/rapideye/
[6] http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/

El caudal máximo instantáneo unitario se obtiene mediante la ecuación (2), utilizando el valor de tiempo t_p calculado según la ecuación (1). La distribución temporal del hidrograma se realiza usando un *Peak Rate Factor* 300, debido a ajustes que se deben realizar por la pendiente media del área de estudio.

$$t_p = 0.5 * D + 0.6 * t_c \tag{1}$$

$$q_p = \frac{A * 0.208}{t_p} \tag{2}$$

Dónde:

t_p	=	Tiempo de retardo en horas.
D	=	Duración de la precipitación efectiva en horas.
t_c	=	Tiempo de concentración en horas.
q_p	=	Valor máximo del hidrograma unitario de una lluvia efectiva de 1mm en l/s/km^2.
A	=	Superficie de la cuenca en km^2.

El tiempo de concentración representa el tiempo que tarda una cuenca para que la totalidad de ella se encuentre aportando directamente al caudal. Dado que las formulaciones para su cálculo se basan usualmente en relaciones empíricas, se opta por utilizar el promedio de dos fórmulas: Texas Highway y la formulación de la Norma Española. Sus fórmulas se presentan en las ecuaciones (3) y (4) respectivamente.

$$T_c = \frac{L_1}{3.6 * V} \tag{3}$$

$$T_c = 18 * \frac{L_1^{0.76}}{S^{0.19}} \tag{4}$$

Dónde:

T_c = tiempo de concentración en horas
L_1 = corresponde a la longitud del cauce principal en kilómetros.
V = Velocidad del flujo, asociado a la cubierta y a la pendiente media de la cuenca, según valores de referencia de NRC, 1980.
S = pendiente media en metros por metro

3.2 CONDICIONES HIDRO-METEOROLÓGICAS

Planteado el modelo HEC-HMS, se requiere simular las condiciones hidrometeorológicas del 25M para representar los caudales al interior de la cuenca. Se procesa :

i. Precipitación: distribución espacial. Utilizando el valor total del evento de precipitación registrada en cada estación meteorológica, se realiza una ponderación por inverso de distancia para cada pixel del DEM. Estos son atribuidos a cada cuenca por medio de procesamientos geoespaciales. La elección de esta metodología de distribución de precipitación se basa en que dentro de la zona de estudio las tormentas siguen usualmente un comportamiento convectivo. Por medio de esta metodología se logra representar la distribución del evento.

ii. En el caso de la distribución temporal, todas las estaciones disponibles, con excepción de la estación Alto del Carmen, registran precipitación diaria. La estación Alto del Carmen, perteneciente a la red AGROMET, es la única que reporta precipitación horaria, por lo que se supone válida la distribución horaria registrada en esta estación para toda el área de estudio (Figura 2)**.**

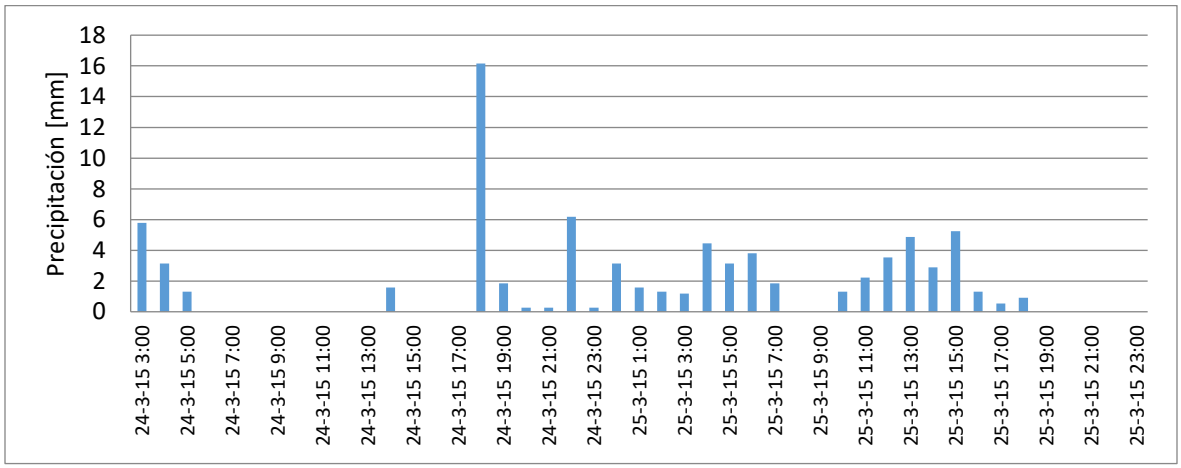

Figura 2 Hietograma de diseño utilizado para la tormenta.

iii. El área pluvial efectiva de cada quebrada se encuentra relacionada directamente con la cota de la línea de nieve. La cota particular de este evento se estima por medio del método de temperatura índice. Estos valores fueron verificados por medio de la utilización de imágenes MODIS.

iv. La infiltración se representa a través de la metodología de curva número (NRCS, 2004), debido a la falta de información que permita una metodología más sofisticada. Como primera aproximación se estima un valor variable entre 72 y 77, debido a la variabilidad de la cobertura vegetal. Este rango concuerda con valores de CN obtenidos con la ecuación (6), metodología planteada en DGA, 1995, basada en la latitud. Sin embargo, previo al evento no se habían registrado precipitaciones desde hace medio año por lo que se realiza un ajuste del parámetro a CN(I) (usando la ecuación (7)), para representar las condiciones previas de humedad secas que se tenían en la zona. Esto resulta en valores del parámetro de CN entre 51.9 y 58.4. Nuevamente, este rango de valores concuerda con los valores obtenidos usando lo postulado en la ecuación (5). Se adoptan finalmente los valores de CN que corresponde al rango de CN(I), pero determinados por medio de la ecuación (5)

Tendencia Media Superior	$CN = 11.9 + 73.7 * LOG(Lat - 25°)$	(5)
Envolvente Superior	$CN = 29.9 + 73.7 * LOG(Lat - 25°)$	(6)
Adaptación a condiciones de humedad antecedente seca	$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)}$	(7)
Adaptación a condiciones de humedad antecedente húmeda	$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)}$	(8)

v. Un método de tránsito de crecida de los caudales. En el caso de las quebradas, se obtiene directamente el hidrograma. Para compatibilizar el tránsito a través de los cauces fluviales se utiliza una simple transmisión de la onda presumiendo una velocidad promedio del flujo.

4 RESULTADOS

El proceso de modelación de la cuenca definida por la estación río Huasco en Chepica, considerando los antecedes presentados en la sección 3, se considera exitosa a nivel general. Se obtiene un valor de Nash-Sutcliffe de 0.78 en la validación de caudales de la estación río El Carmen en El Corral, mientras que para la calibración en río Conay en Las Lozas se tiene un valor de NS de 0.64. El volumen de agua afluente al embalse Santa Juana entregado por la modelación del evento es de alrededor de 6 Mm^3, valor similar a los registros de aumento en el volumen observado del embalse, el cual al día 28 de marzo habría aumentado su volumen en alrededor de 5 Mm^3. La diferencia entre estos valores podría explicarse debido a la infiltración a lo largo del lecho del río, habiendo antecedentes que las pérdidas por este tipo pueden ser entre 15 a 33% en zonas áridas (Lorenzo et al, 2007). El hidrograma a la salida de la cuenca, simulado en la estación río Huasco en Chepica, se presenta en la Figura 3. Se obtiene un valor máximo de caudal instantáneo simulado de 112 m^3/s.

Se puede concluir que, a nivel global, la representación de la cuenca resulta apropiada, a pesar del alto nivel de desagregación utilizado y la cantidad de variables con incertidumbre en la modelación. Sin embargo, al comparar los volúmenes de sólidos depositados a la salida de algunas quebradas que presentaron flujos aluvionales (Fredes, 2016) con los volúmenes de escorrentía líquida obtenidos de la modelación, se obtiene que las concentraciones medias de sedimento transportadas por la crecida exceden valores razonables (Tabla 1). En el conjunto de quebradas modeladas que fueron activadas efectivamente, de un total de 29 que presentaron depósitos de sedimentos a la salida, 13 de ellas presentan concentraciones medias de sólidos superiores a 60%, valor asociado a concentraciones máximas en flujos aluvionales (Iverson, 1997). Incluso se observan concentraciones superiores al 80%, imposibles de lograr en un flujo detrítico. Esta situación indica que si bien la modelación resulta satisfactoria a un nivel global, a un nivel desagregado, en algunas quebradas se tiende a subestimar los caudales de crecida. Estos valores de estimaciones de volúmenes de sedimentos depositados presentan un rango de incertidumbre medio, lo cual podría hacer variar los valores de concentración obtenida, que podrían estar siendo sobreestimados. Sin embargo, esto se compensa al considerar que los

volúmenes solo dan cuenta de los sedimentos depositados, y no se incluye en este cálculo aquella parte sedimentológica que es descargada al cauce.

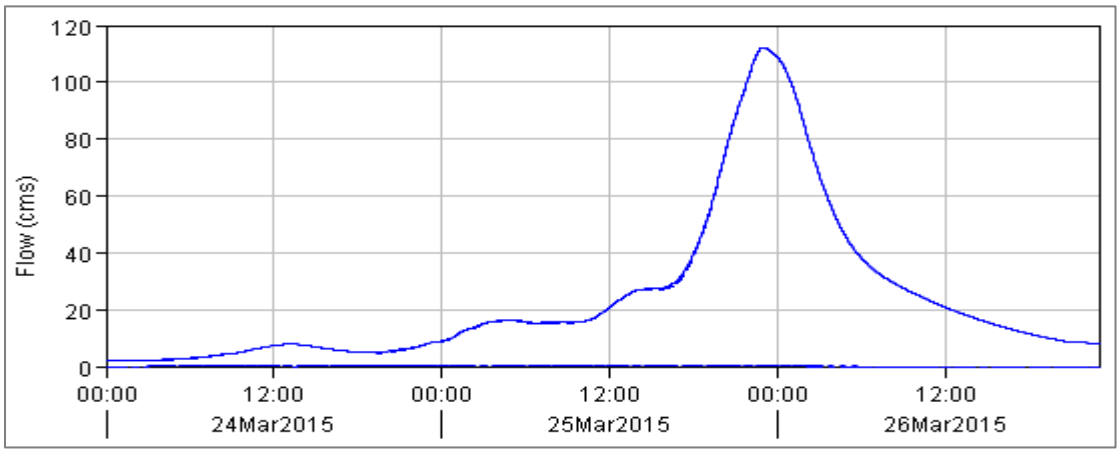

Figura 3 Hidrograma modelado a la salida de la cuenca en la estación fluviométrica río Huasco en Chépica. La estación no cuenta con registros confiables durante el evento del 25M.

Para entender el motivo de esto, se realiza un análisis crítico de la representación de los procesos hidrológicos dentro de la modelación. Los procesos de escorrentía superficial parecen ser representados apropiadamente considerando los resultados de las calibraciones. Sin embargo, los procesos de infiltración podrían estar siendo representados inadecuadamente, debido a la metodología de la curva número. Si bien dicho método logra capturar apropiadamente la magnitud de precipitación que puede infiltrar, presenta falencias en lo referente a representar adecuadamente procesos temporales, como por ejemplo, las restricciones impuestas por la conductividad hidráulica del suelo. Esta podría resultar en una limitación en caso de altos pulsos de intensidad de lluvia, como lo registrado a las 18:00 del día 24 de abril (Figura 2). Adicionalmente, resulta relevante considerar la naturaleza convectiva del evento, la cual se traduce en una distribución espacial y temporal heterogénea de las precipitaciones, lo cual no es factible representar. Dicha naturaleza se confirma al ver imágenes satelitales de estimaciones de precipitación en la zona de estudio a nivel horario durante el evento de la tormenta (Figura 4). Lamentablemente, estos productos satelitales no presentan una alternativa viable al estudio para determinar la magnitud de las precipitaciones debido al bajo desempeño que presentan en esta zona geográfica (Zambrano et al, 2017). Sin embargo, dan una noción de la heterogeneidad espacial y temporal de las precipitaciones ocurridas durante el evento. Esta naturaleza aleatoria de la precipitación y altamente localizada fue confirmada por los habitantes de la zona.

Una alternativa para representar estos procesos locales que no están siendo replicados adecuadamente por el modelo, es utilizar una condición de humedad antecedente mayor. Esto con el fin de emular las limitaciones de infiltración que presenta el método de la curva número. En la práctica, esto se traduce en utilizar un parámetro de CN tipo II o III (ecuación 8), los que podrían ser representativos durante una parte de la tormenta. Al recalcular los caudales asociados a cada quebrada, utilizando esta versión de los parámetros, solo una de las trece quebradas que presentaban concentraciones superiores a un 60% sigue con valores superiores a ese número considerando un valor de CN(II), bajando drásticamente las concentraciones en todas las otras quebradas, con disminuciones de incluso un 45%. Al utilizar CN(III), todas las quebradas modeladas que se activaron y presentaron flujos aluvionales presentan concentraciones medias

de sedimentos dentro de rango aceptables. Los resultados en detalle de las concentraciones medias de cada una de las quebradas, considerando valores de CN(II) y CN(III) se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Caudales instantáneos máximos y concentraciones asociadas de cada quebrada. Para estimar el volumen de sedimentos a partir del volumen de los depósitos, se consideró una porosidad de 40%.

Quebrada	Área	Caudal máximo instantáneo [m³/s]			Volumen de depósito de sedimento	Concentración considerando porosidad 40%		
	[km²]	CN(I)	CN(II)	CN(III)	[m³]	CN(I)	CN(II)	CN(III)
CA30B	21.1	0.1	0.7	1.2	100146.4	0.96	0.75	0.54
CA30A	4.8	0.0	0.2	0.3	9158.3	0.94	0.55	0.33
TR32	1.1	0.1	0.4	0.7	20169.8	0.87	0.48	0.29
TR41	1.2	0.0	0.4	0.7	10752.3	0.87	0.39	0.19
TR34C	1.2	0.1	0.4	0.7	13107.2	0.86	0.41	0.22
CA30D	17.2	0.1	0.5	1.0	12897	0.84	0.34	0.17
CA30E	13.4	0.1	0.4	0.8	7728.6	0.81	0.29	0.13
CA25	12.5	1.3	5.1	8.3	204100	0.80	0.42	0.25
TR25	1.7	0.2	0.7	1.1	19713.7	0.79	0.36	0.20
TR34A	0.8	0.1	0.3	0.5	5973.6	0.79	0.30	0.15
CA29	4.7	0.3	1.6	2.8	36298.4	0.74	0.30	0.16
CA31	2.5	0.1	0.7	1.3	11716.8	0.68	0.25	0.11
CA28A	37.5	0.2	1.3	2.3	13083.3	0.63	0.17	0.08
CA24	7.1	1.0	3.3	5.2	34697	0.50	0.16	0.08
TR34F	7.2	0.3	2.2	4.0	13367.8	0.49	0.11	0.05
TR31	13.6	1.3	5.3	8.8	46212.9	0.49	0.13	0.06
TR15	6.9	0.5	2.3	3.9	19951.2	0.47	0.13	0.06
TR28	74.9	7.6	26.8	42.8	333830.8	0.46	0.15	0.08
TR30	2.5	0.3	1.0	1.6	8545.8	0.44	0.14	0.07
TR43	6.5	0.2	1.7	3.3	6952.5	0.44	0.08	0.03
TR36	128.2	2.5	26.0	50.4	140190.7	0.40	0.07	0.03
CA23	5.7	0.9	2.8	4.4	17008.3	0.31	0.09	0.05
TR39	2.6	0.1	0.8	1.4	1591	0.29	0.04	0.02
CA32	3.4	0.1	1.0	1.9	1999.6	0.29	0.04	0.02
CA21	11.0	2.1	5.9	8.8	30144	0.27	0.08	0.04
CA33C	58.9	0.2	1.7	3.1	2332.8	0.18	0.03	0.01
TR34J	33.3	1.6	9.6	17.2	14555.2	0.16	0.02	0.01
CA17	13.0	2.8	7.4	10.9	16485	0.12	0.03	0.02
CA20	15.0	3.2	8.6	12.7	11304	0.08	0.02	0.01

El trabajo realizado mustra un buen cierre general de la hidrología de la cuenca pero un bajo desempeño en quebradas pequeñas, usualmente del orden de decenas de km², que presentaron flujos de remoción en masa. Se cree que los flujos aluvionales fueron inducidos principalmente por dos factores: la altura a la que se ubicó la cota de nieve e intensidades de precipitación local

muy altas que conllevan una saturación del suelo, facilitando así la escorrentía superficial y el arrastre de sedimentos.

En el primer caso, la cota de la línea de nieve, ubicada a 3200 según este estudio, se traduce en que todas las cuencas que fueron activadas presentaran un área pluvial equivalente a su área total. Esto tiene a su vez dos consecuencias: una mayor disponibilidad de sedimentos a ser arrastrados y una mayor área pluvial aportante y por tanto, mayor escorrentía. Al revisar los 15 eventos de tormentas más grandes de los últimos 20 años en la zona, se observa que menos del 50% de dichas quebradas se han comportado de forma completamente pluvial en al menos un tercio de esos eventos.
En el segundo caso, de la influencia que ejercen pulsos de corta duración pero alta intensidad de precipitaciones sobre las quebradas y como se relaciona esto con la activación de las mismas, no se tienen mediciones directas pero sí es posible inferior esto en base a la cantidad de sedimentos despositados tras el evento.

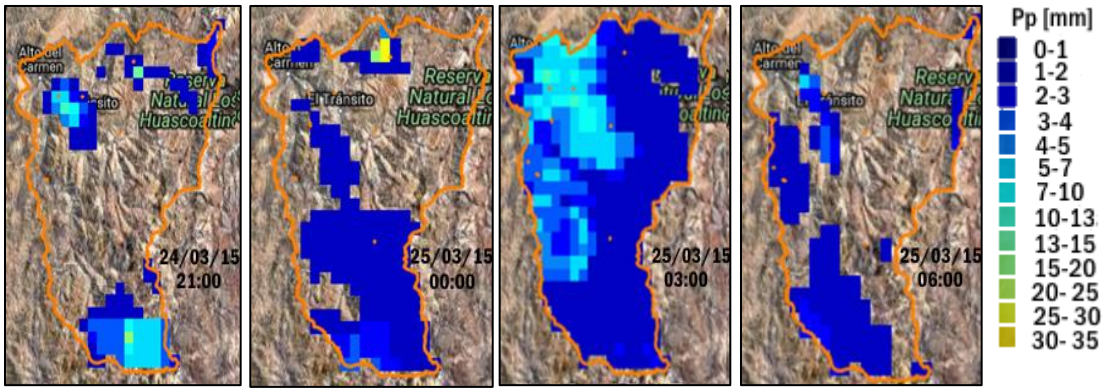

Figura 4 Distribución espacial de la precipitación según PERSIAN-CCS[7], en distintos horarios.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo a los antecedentes presentados es posible concluir lo siguiente:

- Se logra representar adecuadamente la hidrología general de la zona en el evento 25M, considerando todas las limitaciones de información que se tienen. Esto se basa en los valores similares de volumen afluente al embalse Santa Juana y a las calibraciones realizadas en las estaciones fluviométricas en las cuencas de cabecera.
- A nivel micro, se requiere de un mayor nivel de información para representar adecuadamente las quebradas que fueron activadas y desarrollaron aluviones. Se propone utilizar, como medida compensatoria en el caso de que se desarrollen simulaciones de las quebradas, adaptaciones locales de los parámetros de infiltración en caso de usar el método de Curva Número.
- Los vólumenes de sedimentos estimados a la salida de las quebradas permiten mejorar, de manera indirecta, la estimación de los caudales ocurridos en las quebradas. Estos constituyen una fuente de información adicional que suple en parte la falta de información hidrometeorológica disponible en la zona.

[7] http://chrsdata.eng.uci.edu/

- A pesar de la recomendación anterior, la macro cuenca presenta un comportamiento de CN(I) con respecto a los procesos de infiltración.
- Existe una gran necesidad de desarrollar alternativas que permitan obtener información más detallada a nivel local. Ya sea por medio de la implementación de redes de medición con mayor cobertura y de mejor calidad, o mejoramiento de técnicas de percepción remota.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al centro de investigación para la minería, AMTC, y al centro de investigación, desarrollo e innovación de estructuras y materiales, IDIEM, de la Universidad de Chile y a la dirección de obras hidráulicas, DOH, del Ministerio de Obras Públicas (MOP) por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo. También se agradece a los revisores anónimos por sus comentarios este trabajo, que ayudaron a mejorar la calidad del mismo.

REFERENCIAS

Aguilar, G., Cabré, A., Guaita, C., González, F., Ortega, F., Carretier, S., Riquelme, R., Comte, D. (2015). Denudación por flujos de detritos durante las lluvias torrenciales de marzo de 2015 en Atacama.

Comité Científico Técnico, ONEMI, 2015, Informe Anual, Análisis Multisectorial Eventos 2015.

Estellé, L., Chávez, L., Díaz, R., 2015, Caracterización de los caudales en río Salado durante los eventos del 24, 25 y 26 de marzo de 2015, XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago.

Fredes, V., 2016, Evaluación estadísticas de factores generadores de flujos de detritos durante el el evento del 25M en la cuenca del valle Huasco, Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile

Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000

Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. Reviews of geophysics, 35(3), 245-296.

Lorenzo, A., Dahan, O., Medialdea, A., & Benito, G. (2007) Estimación de la recarga en lechos fluviales mediante sondas TDR flexibles durante eventos de avenida (río Andarax, Almería)

MOP (1995). Manual para estimación de caudales máximos y mínimos en cuencas sin información.

National Research Council, Washington D.C., Junio 1980, Design of Sedimentation Basing

NRCS (National Resources Conservation Service), 2004, Hydrology National Engineering Handbook.

Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. and Watanabe, M., 2007. ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *45*(11), pp.3307-3316.

RyQ, (2015). Caracterización y levantamiento de información debido a las crecidas aluvionales en la cuenca del Huasco – Región de Atacama para el temporal del 25 y 26 de marzo de 2015.

SCS, 1972 - (Soil Conservation Service). National Engineering Handbook, Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., & Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(2), 1295.