

---

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS CAUDALES EN RÍO SALADO, DURANTE LOS  
EVENTOS DEL 24, 25 Y 26 DE MARZO DE 2015.**

**LUIS E. ESTELLÉ A.<sup>1</sup>**  
**LEONIDAS CHÁVEZ P.<sup>2</sup>**  
**RICARDO DÍAZ B.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

Los días 24, 25 y 26 de Marzo de 2015, las regiones de Antofagasta y Atacama se vieron afectadas por intensas lluvias, con elevadas temperaturas, que generaron importantes caudales de los ríos que descargan las cuencas de las regiones indicadas.

Específicamente, en la región de Atacama, el río Salado experimentó una gran crecida que provocó, en su paso por las zonas pobladas de Llanta, Diego de Almagro, Salado y Chañaral, pérdidas de vidas humanas y daños de consideración, tanto a la infraestructura pública como privada.

En este trabajo, se presentan estudios preliminares hidrológicos e hidráulicos, tendientes a caracterizar los caudales líquidos y sólidos (5% de concentración) (Ref.,1) que se presentaron en el río Salado durante este fenómeno aluvional.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, Dirección de Obras Hidráulicas – [luis.estelle@mop.gov.cl](mailto:luis.estelle@mop.gov.cl)

<sup>2</sup>Ingeniero Civil, Prisma Ingeniería – [info@prisma.cl](mailto:info@prisma.cl)

<sup>3</sup>Ingeniero Civil, Prisma Ingeniería – [info@prisma.cl](mailto:info@prisma.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los días 24, 25 y 26 de Marzo pasado, la Región de Atacama y las comunas de Antofagasta y Taltal, se vieron afectadas por fuertes precipitaciones con elevadas temperaturas, configurando una condición hidrometeorológica extrema, lo que produjo crecidas, derrumbes, avalanchas de lodo y desbordes del río Salado, con fatales consecuencias para personas, sus viviendas e infraestructura pública y privada de las localidades de Llanta, Diego de Almagro, Salado y Chañaral.

La catástrofe indicada no es un evento aislado, por el contrario es un problema recurrente en nuestro país. Basta con recordar los episodios ocurridos en la Quebrada de Macul (1993), Punta Arenas, Coihaique y en las mismas localidades de Antofagasta (1991), Taltal y Tocopilla.

Conocer más de estos fenómenos, en especial lograr caracterizar su magnitud (caudal), su probabilidad de ocurrencia (período de retorno) y la valorización de los daños que generó, son aspectos fundamentales para justificar la adopción de medidas no estructurales (ordenamiento del espacio urbano) y diseñar más y mejores obras de protección (medidas estructurales).

Sin embargo, producto de la necesidad de atender prontamente a la población afectada, estos antecedentes suelen perderse, o bien, no quedan correctamente registrados. En este escenario, no resulta raro tener que recurrir a registros de daños ocurridos en otras ciudades, con la finalidad de usar información que sirve como base de referencia para extrapolaciones al tipo y magnitud del daño que, por ejemplo, los fenómenos aluvionales generan. Por esta razón es de alta importancia, para la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), disponer de bases de datos adecuadas para permitir realizar análisis técnicos y definir las mejores medidas a adoptar en materia de protección civil contra estos fenómenos naturales.

En resumen, la información existente asociada a los fenómenos aluvionales, permite concluir que, si bien ella existe y confirma la ocurrencia periódica de fenómenos de este tipo en el territorio nacional, no existen antecedentes suficientes para evaluar su recurrencia y magnitud. Conscientes de esta carencia, la DOH no ha querido dejar pasar esta oportunidad para desarrollar un completo y temprano registro del fenómeno, para lo cual contrató cuatro consultorías, para analizar lo ocurrido en las ciudades y cuencas asociadas de Taltal, Chañaral, Copiapó y Vallenar.

En este trabajo, se presentan estudios preliminares hidrológicos e hidráulicos, tendientes a caracterizar los caudales que se presentaron en la cuenca del río Salado, durante este fenómeno aluvional.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Las áreas relacionadas con el presente estudio corresponden a los sectores de: Chañaral, El Salado, Diego de Almagro y Llanta, además del cauce del río Salado entre las localidades indicadas.

Las Figuras 1 a la 4 identifican los contornos de las zonas afectadas en sectores ribereños del río Salado, datos claves para definir los lugares necesarios de catastrar en terreno y definir la extensión de las zonas inundadas.



**Figura 1: Zonas afectadas de Campamento Llanta.**



**Figura 2: Zonas afectadas de Diego de Almagro.**



**Figura 3: Zonas afectadas de El Salado.**



**Figura 4: Zonas afectadas de Chañaral.**

### 3.- DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES DE CRECIDA

La estimación de los caudales de crecidas asociados al evento de precipitaciones registrados los días 25 y 26 de Marzo de 2015, en la cuenca del río Salado, al no disponer en la cuenca de estaciones fluviométricas, se efectuaron mediante la aplicación de métodos indirectos.

#### 3.1 Metodologías aplicadas

Para la estimación de los caudales de crecidas en el río Salado se utilizaron 3 metodologías de acuerdo a los antecedentes disponibles:

##### a. Velocidad Media:

Este método consiste en estimar un caudal en una sección de control aplicando la relación:

$$Q = V_m A \quad (1)$$

donde:

$Q$ = Caudal ( $m^3/s$ );

$V_m$ = Velocidad media del flujo ( $m/s$ );

$A$ = Área de la sección transversal del flujo ( $m^2$ )

La aplicación de este método requiere disponer de antecedentes de topografía de secciones transversales de río Salado y la estimación de una velocidad media del escurrimiento en crecida.

La velocidad del escurrimiento ( $V_m$ ) es calculada a partir del análisis de los videos recopilados que registraron el evento de la crecida, en sectores en los cuales es posible determinar una velocidad superficial del escurrimiento y a partir de este valor obtener una velocidad media del caudal en la sección seleccionada.

A partir de la identificación del lugar de toma del video seleccionado para el cálculo de la velocidad del escurrimiento, se procede a obtener de los antecedentes de topografía existentes en una sección del río Salado, la cual en conjunto con los antecedentes de anchos de inundación se determina el área de escurrimiento.

#### b. Eje Hidráulico:

Este método consulta el cálculo del eje hidráulico mediante HEC-RAS] del río Salado, en los sectores en que se dispone de perfiles transversales levantados post-crecidas con antecedentes de niveles de inundación medidos (trazas observadas).

Como condiciones de borde se utiliza las cotas de crecidas tomadas en terreno, adoptando un coeficiente de Manning para flujos aluvionales, de acuerdo a la literatura especializada y realizando un análisis de sensibilidad de este coeficiente a los resultados obtenidos.

#### c. HEC – HMS:

La aplicación del HEC-HMS permite generar los hidrogramas de crecidas del río Salado en las localidades de Diego de Almagro, El Salado y Chañaral, utilizando como base la información de lluvias proporcionada por Codelco y la DGA, para la cuenca del río Salado.

### 3.2 Cálculos y Resultados:

#### a. Velocidad Media:

De un análisis de la información de videos recopilados, se seleccionó un registro tomado el día 25 de Marzo de 2015, en calle 21 de Mayo de Chañaral. Este video muestra al río Salado en crecida y los detalles de las imágenes tomadas, permiten identificar elementos flotantes y puntos de control para la estimación de tiempos de traslado y de este modo estimar una velocidad media del escurrimiento.

En la siguiente imagen (Figura 5), obtenida del video, se muestra el momento de la crecida en el río Salado y a dos postes de alumbrado público utilizados como puntos de control.



**Figura 5: Imagen del video y localización del sector de grabación.**

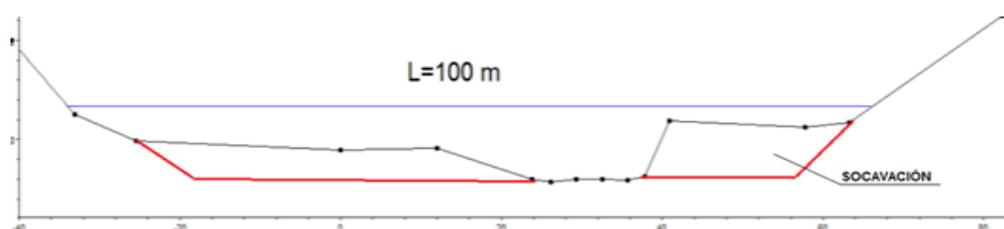
Identificados los puntos de control (postes del alumbrado público) en la imagen Google Earth del sector de calle 21 de Mayo, se determinó que la distancia entre estos postes es de 20 m. Por otra parte del análisis de los objetos flotantes detectados en el video se obtuvo un tiempo de traslado promedio entre postes de 3 segundos. De este modo el escurrimiento analizado presenta una velocidad superficial ( $V_{ms}$ ) de 6,7 m/s y velocidad media ( $V_m$ ) de 5,3 m/s, adoptando un coeficiente de 0,80 para la relación entre  $V_m/V_{ms}$ . (Ref. 2)

De los antecedentes disponibles de topografía, obtenidos del Plan de Manejo del Río Salado, se obtuvo una sección del cauce para el sector de toma del video. El ancho de inundación se obtiene a partir de los antecedentes disponibles en Google Earth, que corresponde a 100 m. En las siguientes imágenes (Figura 6) se presentan los antecedentes recopilados del Google Earth y topografía del Plan de Manejo.



**Figura 6: Ancho de inundación y perfiles levantados.**

En la Figura 7 se muestra la sección del cauce del río Salado en el sector del puente 21 de Mayo y una estimación de la socavación del cauce de acuerdo a lo observado en terreno.



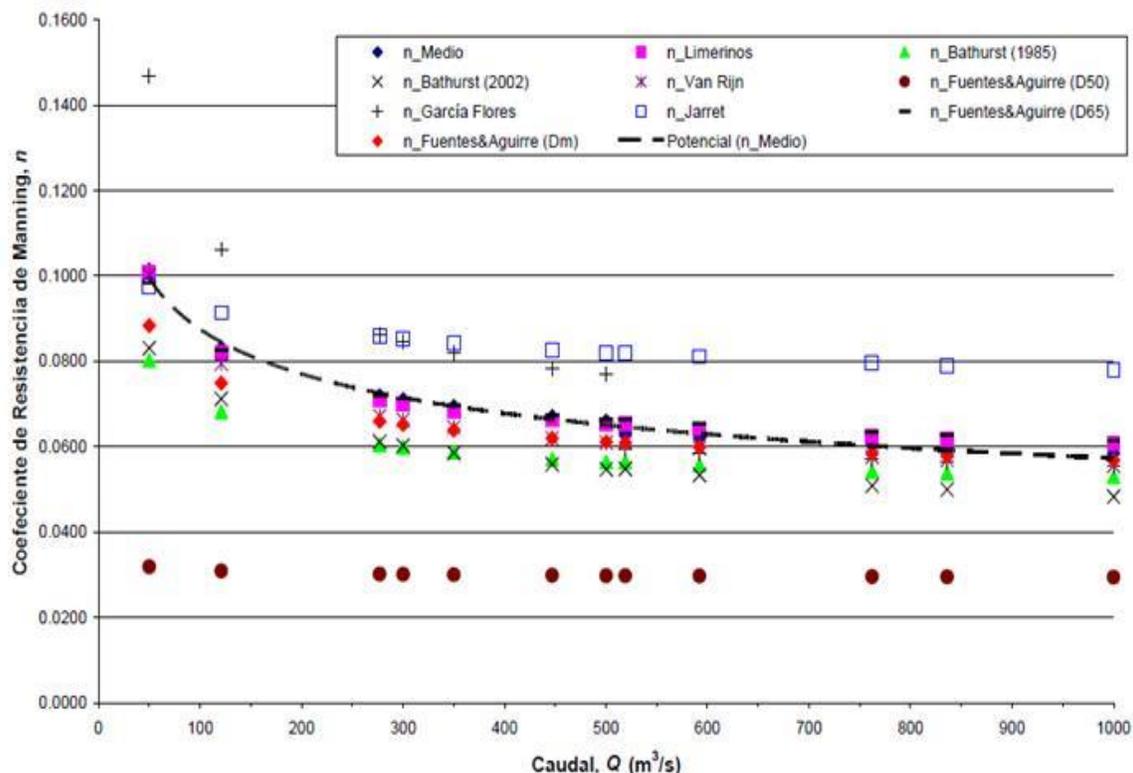
**Figura 7: Perfil con indicación de niveles de inundación y socavación.**

Considerando el nivel de la inundación en la sección analizada, se obtiene una sección de escurrimiento de  $134 \text{ m}^2$  y de este modo un caudal de  $728 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### **b. Eje Hidráulico:**

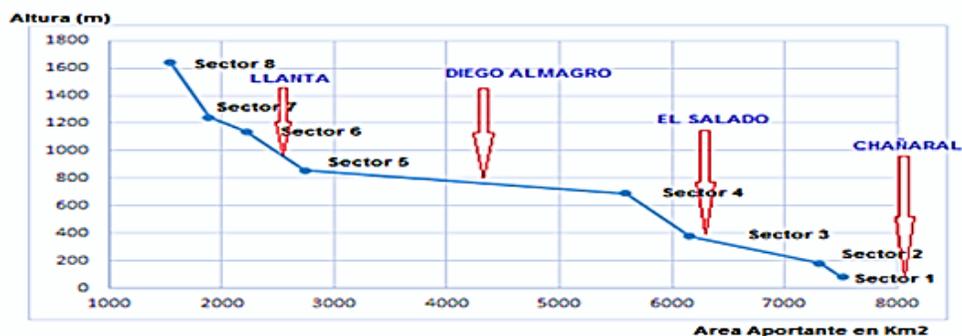
Para el área en estudio se levantaron un total de 32 perfiles transversales, postrecidas, con antecedentes de niveles de inundación registrados en cada perfil (trazas). Los

perfiles están agrupados de a 4 por sector. Estas zonas fueron elegidas de tal manera que aseguraran disponer de un escurrimiento lo más uniforme posible, evitando singularidades, secciones variables y elementos que distorsionaran el flujo.



**Figura 8 Variación de coeficiente de rugosidad de Manning con el caudal.**

En relación con el coeficiente de rugosidad de Manning, parámetro importante en el cálculo del caudal, para su determinación se utilizó antecedentes bibliográficos de escurrimientos con sedimento concentrado (concentraciones entre 5 a 50 %), en zonas similares al área del río Salado. En este sentido, se utilizó el trabajo presentado por las universidades Politécnica de Cartagena y Catalunya de España, en la I Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid, de 2009, obteniendo el valor de  $n = 0,06$  para el caso en estudio. En la Figura 9 se entrega la curva hipsométrica relacionada con los distintos sectores de análisis y localidades de interés a lo largo del río Salado.



**Figura 9: Curva hipsométrica de sectores en análisis.**

En las siguientes imágenes, obtenidas de Google Earth, se indica la localización de cada uno de los sectores levantados.



**Figura 10: Sectores 1 a 3 con topografía localizadas en Google Earth.**



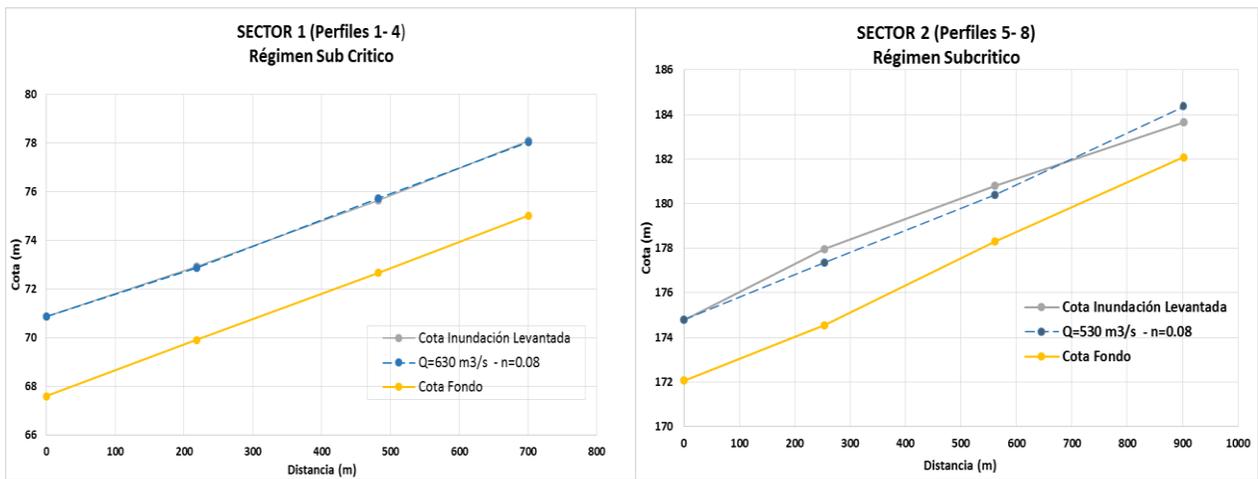
**Figura 11: Sectores 4 y 5 con topografía localizadas en Google Earth**



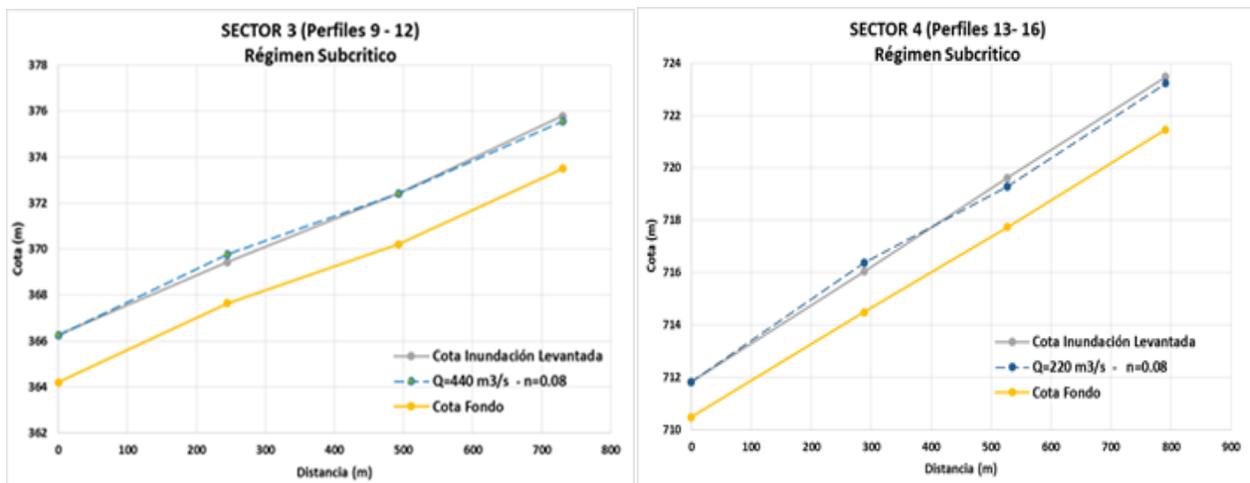
**Figura 12: Sectores 5 a 8 con topografías localizadas en Google Earth.**

Para cada sector se efectuó el cálculo del eje hidráulico para distintos caudales de manera que las cotas resultantes del eje hidráulico tengan el mejor ajuste con las cotas de inundación levantadas en terreno (trazas).

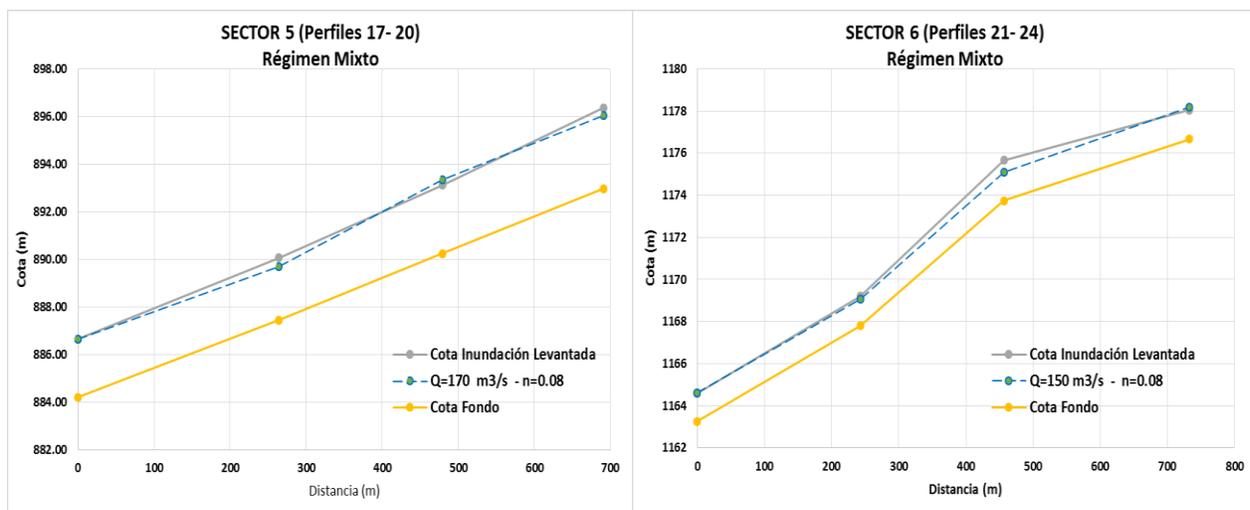
En las Figuras 13 a la 15 se presentan los resultados obtenidos para cada sector. En ellas se muestran los ejes hidráulicos calculados y su relación con las cotas de inundación levantadas (traza



**Figura 13: Eje hidráulico Sectores N° 1 y 2 (Chañaral y Aguas Arriba).**



**Figura 14: Eje hidráulico Sectores N° 3 y 4 (El Salado).**



**Figura 15: Eje hidráulico Sectores N° 5 y 6 (A. Arriba de D. de Almagro y Llanta).**

Adicionalmente, para cada sector, se efectuó un análisis de sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Manning adoptado, obteniendo los valores de caudales de crecida aluvionales que se indican en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
**Análisis de sensibilidad del caudal con respecto al coeficiente de Manning.**

Sector	Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
	n=0.060	n=0.080	n=0.100
1	820	630	500
2	720	530	430
3	590	440	350
4	280	220	170
5	250	170	140
6	200	150	120
7	200	150	120
8	180	140	120

**c. HEC – HMS:**

La aplicación del HEC-HMS para la cuenca del río Salado permitió la obtención de hidrogramas y caudales de crecidas para las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro, en función de las precipitaciones registradas en la cuenca para el evento del 25 de Marzo de 2015.

Las precipitaciones utilizadas correspondieron a la información proporcionada por CODELCO y DGA, que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**  
**Cuenca río Salado - Estaciones Pluviométricas utilizadas.**

Estación Pluviométrica	Institución Dependiente	P Max 24 [mm]
Cine Inca	Codelco	58.4
Cobresal	Codelco	56
Intelec	Codelco	59.5
Pampa Austral Norte	Codelco	39
Pampa Austral Sur	Codelco	38
Pobl. Aeropuerto Chañaral	Codelco	19.8
Capitanía de Puerto Chañaral	Codelco	19.7
Las vegas	DGA	50

Para las estaciones dependientes de CODELCO se dispuso además de su respectivo hidrograma, los cuales se muestran en las Figuras 16 a la 18.

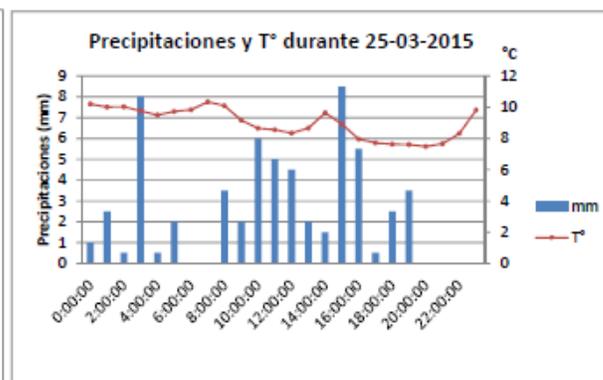
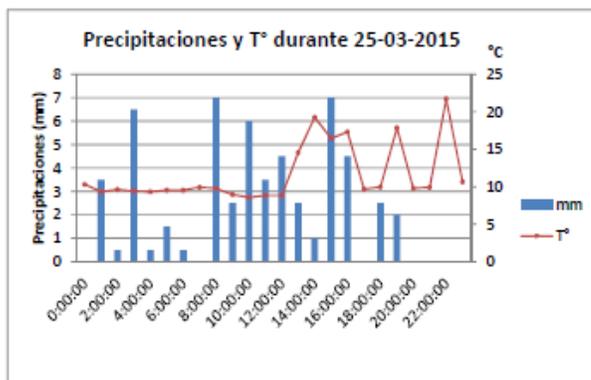
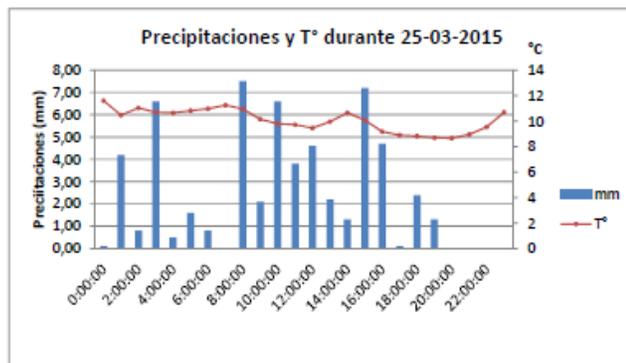


Figura 16: Hietograma Estaciones Cine Inca, Cobresal e Intelc (El Salvador).

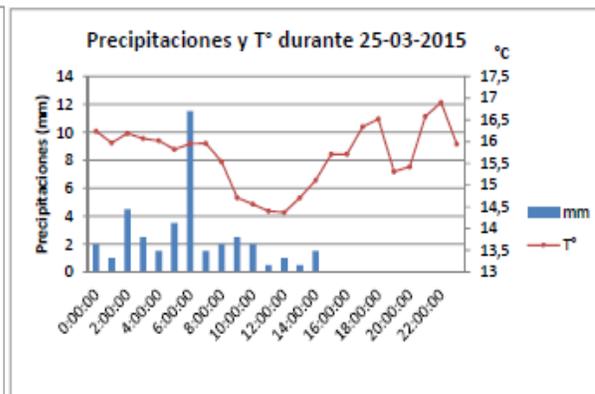
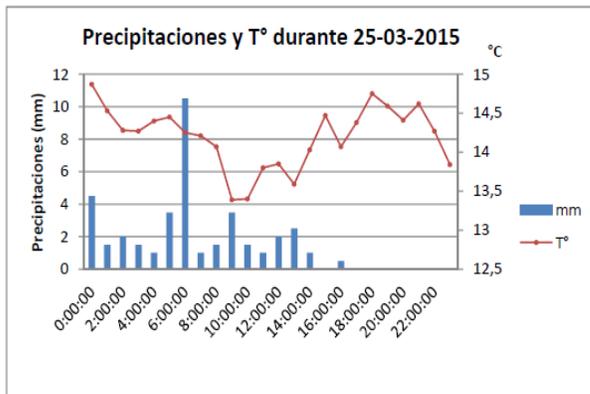
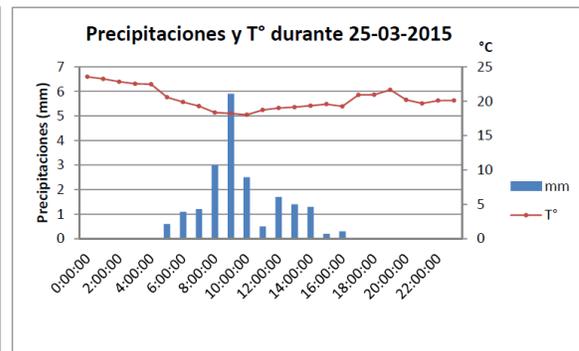
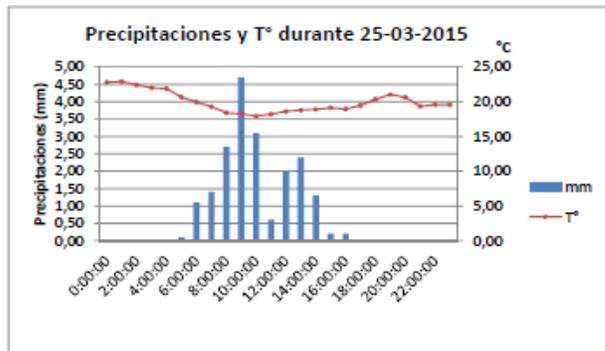
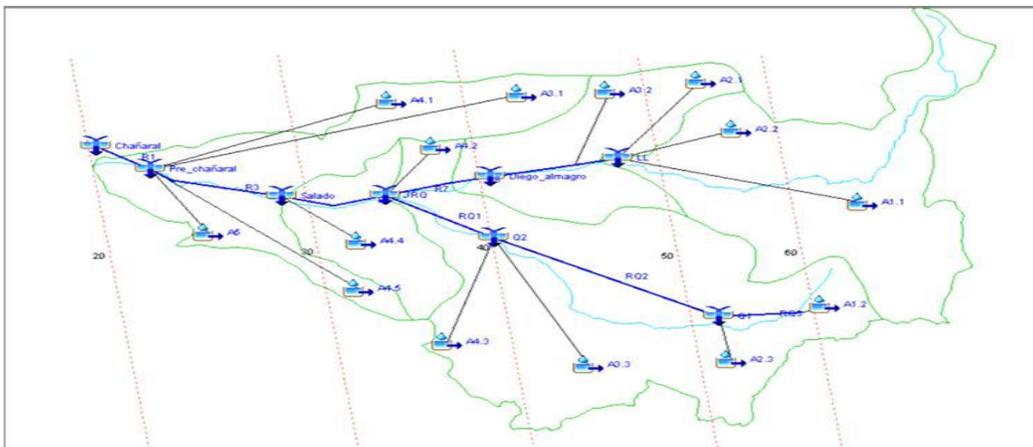


Figura 17: Hietograma Estaciones Pampa Austral Norte y Sur (Diego de Almagro).



**Figura 18: Hietograma Estaciones P. Aeropuerto y Capitanía de Puerto Chañaral).**

Para la generación de los hidrogramas se utilizó el método de SCS Unit Hydrograph y el tránsito de la crecida se efectuó mediante el método de la onda cinemática. Los análisis se efectuaron para 2 condiciones de rugosidad de Manning y sensibilizando los valores de la curva número (CN). La Figura 19 muestra la topología utilizada.



**Figura 19: Modelo HEC-HMS representación utilizada.**

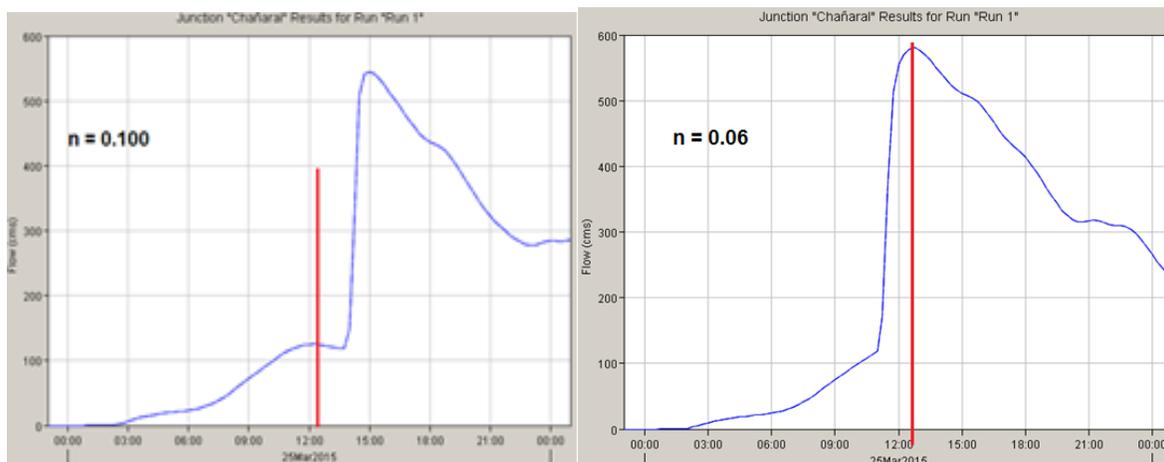
En relación de los hidrogramas de crecidas, en su determinación se tuvo especial cuidado en que los peak que estos presentan, estuvieran de acuerdo con los instantes de máximo flujo informados por la comunidad. Estos ajustes incidieron en forma importante en los valores de los parámetros adoptados para la curva número (CN), valores que junto con otros parámetros, como el tiempo de concentración (tc), se presentan en Tabla 3.

**Tabla 3**  
**Cuenca río Salado – Parámetros de modelación HEC-HMS.**

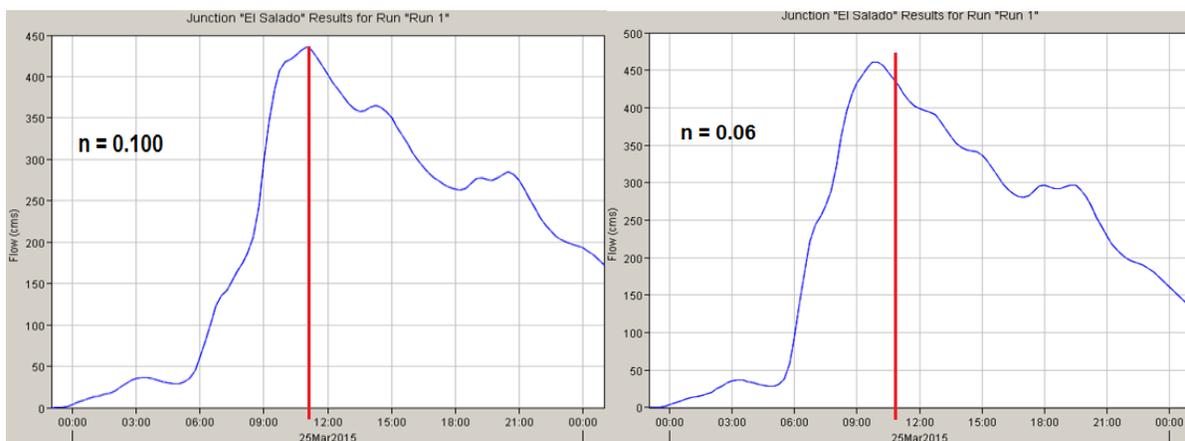
Área	Isoyeta [mm]	Distribución [estación]	CN	Área [km <sup>2</sup> ]	Desnivel [m]	Largo río [km]	tc USCC (hrs)	tc California (hrs)	tc Adoptado (hrs)	Lag time [0.6*tc] (hrs)
1.1	60	Intelec	55	1223	1900	66.79	7	9.3	8	288
1.2	60	Las Vegas	55	155	600	7.42	1	1	1	36
2.1	55	Inca-Cobresal	55	170	1500	33	3	4.6	3	108
2.2	55	Inca-Cobresal	55	641	350	22.56	4	3.1	3	108
2.3	55	Las Vegas	60	641	1000	22.9	2	3.2	2	72
3.1	45	Pampa Austral Norte	60	225	1300	64.77	7	9	8	288
3.2	45	Pampa Austral Norte	60	724	700	39.6	5	5.5	5	180
3.3	45	Las Vegas	60	1348	2100	44.47	4	6.2	5	180
4.1	35	Pampa Austral Norte	77	369	600	49.77	7	6.9	7	252
4.2	35	Pampa Austral NyS	77	160	200	15	3	2.1	2.5	90
4.3	35	Pampa Austral Sur	77	530	400	19.08	3	2.7	3	108
4.4	35	Pampa Austral Sur	77	509	150	15	3	2.1	2.5	90
4.5	35	Pampa Austral Sur	77	89	800	45	6	6.3	6	216
5	25	Chañaral	77	729	450	38.53	6	5.4	5.5	198

Dado que los caudales determinados mediante el modelo HEC-HMS corresponden a escurrimientos líquidos, se calcularon caudales totales (sólidos y líquidos) para distintas concentraciones. (Ref. 1)

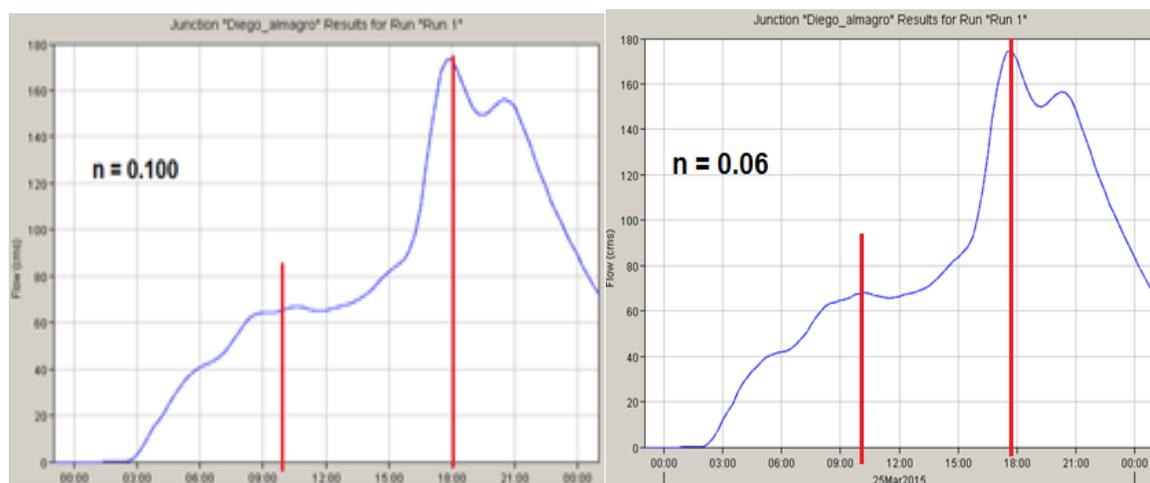
En las Figuras 20 a la 22 se presentan los hidrogramas obtenidos a través del HEC – HMS, de la crecida del día 25-03-2015, para las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro. La línea roja indica la hora de máximo flujo informada por los vecinos.



**Figura 20: Hidrograma - Río Salado en Chañaral.**



**Figura 21: Hidrograma - Río Salado en El Salado**



**Figura 22: Hidrograma - Río Salado en Diego de Almagro (n=0.10 y 0.06)**

En las Tablas 4 y 5 se entrega un resumen de los caudales de crecidas obtenidos para distintos valores del coeficiente de rugosidad de Manning y concentraciones.

**Tabla 4**  
Caudales de crecida según modelo HEC-HMS, para  $n= 0.10$  y distintas concentraciones

Localidad	5%	10 %	20 %
Chañaral	573	605	680
El Salado	459	485	545
Diego de Almagro	183	193	217

**Tabla 5**  
Caudales de crecida según modelo HEC-HMS, para  $n= 0.06$  y distintas concentraciones

Localidad	5%	10 %	20 %
Chañaral	611	645	726
El Salado	485	512	577
Diego de Almagro	184	194	218

Finalmente, la Tabla 6 presenta un resumen con los resultados obtenidos con los distintos métodos aplicados:

**Tabla 6**  
Río Salado, caudales máximos para los distintos métodos aplicados

Sector	Método Velocidad (m <sup>3</sup> /s)	Método Eje Hidráulico (m <sup>3</sup> /s)			Método HEC-HMS (m <sup>3</sup> /s)					
		n=0.060	n=0.080	n=0.100	n=0.060			n=0.100		
					5%	10 %	20 %	5%	10 %	20 %
Chañaral	728	820	630	500	611	645	726	573	605	680
El Salado	-	590	440	350	485	512	577	459	485	545
D. Almagro	-	280	220	170	184	194	218	183	193	217

#### 4.- CONCLUSIONES

1. Se aplicaron con éxito distintas metodologías (velocidad media, eje hidráulico que reproduce las trazas observadas y modelación hidrológica) para calcular el caudal máximo instantáneo que se presentó en el río Salado de la región de Atacama, durante los episodios de crecidas del día 25 de marzo de 2015.
2. Para aplicar el método denominado velocidad media, a falta de mejores antecedentes topográficos, fue necesario utilizar una sección topográfica previa a la crecida y suponer una socavación por el flujo. Este método, sólo fue posible aplicarlo en Chañaral.

3. Para el método denominado eje hidráulico, que reproduce las trazas observadas del flujo, los caudales definidos corresponden a los logrados con un coeficiente de rugosidad de Manning de  $n=0,06$ , obtenido de la revisión de la literatura técnica efectuada, para una condición de flujo con alta concentración de sedimentos.
4. La modelación hidrológica con el modelo HEC-HMS representó adecuadamente, no sólo el caudal máximo instantáneo observado, sino que también el volumen total escurrido y para la zona baja de la cuenca y el tiempo en el que se presentaron los escurrimientos máximos. No obstante, este método resultó bastante sensible a los valores de la Curva Número utilizados.
5. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos se propone adoptar como caudales de crecida para las localidades de la cuenca (Chañaral, El Salado y Diego de Almagro) el promedio entre los resultados que entregan los métodos de Eje Hidráulico y HEC-HMS, para un coeficiente de Manning de  $n=0,06$  y una concentración de un 5% (Ref. 1). En la siguiente tabla se entregan los caudales propuestos para las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro.

**Tabla 7**  
**Río Salado, caudales máximos propuestos.**

Sector	Q (m <sup>3</sup> /s)
Chañaral	720
El Salado	540
Diego de Almagro	235

## REFERENCIAS

1. Caracterización y Levantamiento de Información Debido a las Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Río Salado - Región de Atacama Para el Temporal del 25 y 26 de marzo de 2015. (en desarrollo) DOH-Prisma Ingeniería.
2. Dubuat, L. G. Principes d'hydraulique, 1, n. éd. París, 1816.
3. U. Politécnica de Cartagena y Catalunya, Madrid 2009. Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. I Jornadas de Ingeniería del Agua.
4. CODELCO División Salvador, Abril 2015. Gerencia de Sustentabilidad, Seguridad y Salud Ocupacional. Informe eventos meteorológicos 24-25-26 marzo 2015.