

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL  
CENTRO DE RECURSOS HIDRAULICOS

**CRECIDAS SUBITAS Y CORRIENTES DE DETRITOS  
OCURRIDAS EL 18 DE JUNIO DE 1991  
EN ANTOFAGASTA**

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS  
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

SANTIAGO-CHILE  
MAYO 1993

## **EQUIPO DE INVESTIGACION**

### **DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**Supervisión:** Fernando Vidal J.

**Trabajos de Terreno:** Luis Arancibia C. (D.G.A. II Región)  
Orlando Rocha M. (D.G.A. II Región)

### **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**Jefe de Proyecto:** Luis Ayala R. (Depto. Ingeniería Civil)

#### **Académicos Especialistas:**

**Hidrología:** Ximena Vargas M. (Depto. Ingeniería Civil)

**Hidráulica:** Luis Ayala R. (Depto. Ingeniería Civil)

**Meteorología:** José Rutilant C. (Depto. de Geofísica)

**Geología:** Juan Varela B. (Depto. de Geología)

#### **Ayudantes de Investigación**

**Hidrología e  
Hidráulica:** Felipe Aguirre W. (Depto. Ingeniería Civil)  
Mesenia Atenas V. (Depto. Ingeniería Civil)  
Mario Balbontin B. (Depto. Ingeniería Civil)

**Meteorología:** René Garreaud S. (Depto. de Geofísica)

**Secretaria:** Alejandra Aliaga S. (Depto. Ingeniería Civil)

# INDICE

	Págs.
<b>CAPITULO 1</b>	<b>Introducción.</b>
1.1	Marco General..... 1- 3
1.2	Objetivos y Alcance del Estudio.....1- 4
1.3	Organización y Contenido del Informe..... 1- 5
1.4	Agradecimientos..... 1- 5
<b>CAPITULO 2</b>	<b>Antecedentes sobre los Movimientos en Masa y los Flujos de Detritos.</b>
2.1	Introducción..... 2- 3
2.2	Fenómenos de Movimiento en Masa y Flujos..... 2- 4
2.3	Flujos o Corrientes de Detritos y Barro..... 2- 7
	2.3.1 Definiciones y Terminología..... 2- 7
	2.3.2 Principales Características de las Corrientes..... 2- 9
2.4	Antecedentes Cualitativos y Cuantitativos de las Corrientes de Detritos y de Barro
	2.4.1 Observaciones de Fenómenos Ocurridos en el Mundo..... 2-11
	2.4.2 Antecedentes de Corrientes de Detrito y Barro en Chile.....2-20
2.5	Cuantificación y Modelación de las Corrientes de Detritos..... 2-22
	2.5.1 Comportamiento Mecánico..... 2-22
	2.5.2 Modelos Matemáticos y Relaciones de Cálculo..... 2-29
<b>CAPITULO 3</b>	<b>Antecedentes sobre el Fenómeno Ocurrido el 18 de Junio de 1991 en Antofagasta.</b>
3.1	Introducción..... 3- 3

	Págs.	
3.2	Antecedentes sobre el Area de Estudio.....	3- 3
	3.2.1 Aspectos Generales.....	3- 3
	3.2.2 Clima.....	3- 3
	3.2.3 Relieve.....	3- 5
	3.2.4 Antofagasta.....	3- 6
3.3	Estudios sobre la Tormenta y Corrientes de Detritos del 18 de Junio de 1991.....	3- 6
	3.3.1 Antecedentes Históricos.....	3- 6
	3.3.2 Características del Fenómeno.....	3- 8
	3.3.3 Recomendaciones Principales de los Estudios.....	3-16
3.4	Recopilación de Antecedentes Básicos.....	3-17
	3.4.1 Cartografía.....	3-17
	3.4.2 Aerofotogrametría.....	3-18
	3.4.3 Antecedentes Meteorológicos.....	3-19
	3.4.4 Campaña de Terreno.....	3-20

#### **CAPITULO 4**      Caracterización Meteorológica del Fenómeno.

4.1	Introducción.....	4- 1
4.2	Descripción del Tiempo Local en Superficie (Hojas de Ruta).....	4- 1
	4.2.1 Antofagasta (Cerro Moreno).....	4- 1
	4.2.2 Otras Localidades.....	4- 2
4.3	Datos Aerológicos de Cerro Moreno.....	4- 2
	4.3.1 Inversión Térmica.....	4- 2
	4.3.2 Vientos en Altura.....	4- 7
4.4	Características Generales de la Circulación Atmosférica en Torno al Cono Sur de Sudamérica.....	4- 7
4.5	Cartas Sinópticas de Superficie y 500 hPa (DMC).....	4-10
4.6	Cartas de Tropopausa y Viento Máximo.....	4-13
4.7	Imágenes de Satélites (NOAA:AVHRR y GOES:VISSR).....	4-13
4.8	Comentarios Finales.....	4-17

<b>CAPITULO 5</b>	<b>Caracterización Geológica-Geomorfológica del Fenómeno.</b>	
5.1	Introducción.....	5- 3
5.2	Métodos de Estudio y Antecedentes.....	5- 3
5.3	Marco Geológico.....	5- 4
5.4	Apreciación General sobre las Características de los Flujos y Depósitos.....	5- 4
5.5	Comentarios Finales.....	5-18
<b>CAPITULO 6</b>	<b>Análisis Hidrológico e Hidráulico.</b>	
6.1	Introducción.....	6- 3
6.2	Metodología.....	6- 3
	6.2.1 Generalidades.....	6- 4
	6.2.2 Análisis Hidrológico.....	6- 5
	6.2.3 Análisis Hidráulico.....	6- 6
6.3	Características de las Cuencas.....	6- 6
	6.3.1 Generalidades.....	6- 6
	6.3.2 Definición y Características Fisiográficas.....	6- 7
6.4	Estudio de las Precipitaciones.....	6- 8
	6.4.1 Generalidades.....	6- 8
	6.4.2 Análisis de Información Histórica Disponible.....	6-10
	6.4.3 Análisis de la Tormenta del 18/6/91.....	6-14
	6.4.4 Análisis de Frecuencias.....	6-21
6.5	Estimación de los Caudales para el Evento del 18 de Junio de 1991.....	6-28
	6.5.1 Introducción.....	6-28
	6.5.2 Métodos de Cálculos Hidráulico.....	6-29
	6.5.3 Análisis de Caudales, Concentraciones y Coeficientes de Escorrentía.....	6-30
	6.5.4 Estimación de los Caudales Detríticos y Líquidos a la Salida de las Quebradas para el evento del 18 de Junio de 1991.....	6-46
6.6	Estimación de Caudales para Eventos Futuros.....	6-50

**CAPITULO 7**      Conclusiones y Recomendaciones.

7.1	Principales Conclusiones.....	7- 3
7.2	Recomendaciones.....	7-10

**REVISION BIBLIOGRAFICA**

**ANEXO I. GRANULOMETRIA DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA**

**ANEXO II. ANALISIS FOTOGEOLOGICO**

**ANEXO III. INFORMACION PLUVIOMETRICA**

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCION**

## 1.1 Marco General.

Durante las últimas horas del 17 de Junio de 1991 y primeras horas del siguiente día, la II Región se vió afectada por un temporal de viento y lluvia asociado a un sistema frontal que se propagó desde el sur del país, el cual tuvo consecuencias verdaderamente catastróficas para la ciudad de Antofagasta y sus alrededores.

La gran intensidad que alcanzó la lluvia en la zona costera, dió origen a torrentes de agua y barro que escurrieron por las múltiples y empinadas quebradas de los faldeos occidentales y planicie litoral, donde precisamente se enclava la ciudad de Antofagasta. Al dejar sus cauces encajonados, y como consecuencia de su gran velocidad y alto contenido de sedimentos, estos torrentes descargaron con gran violencia masas de agua y material sólido a la ciudad, a través de las calles y espacios abiertos, arrasando a su paso poblaciones, obras de infraestructura e instalaciones industriales, militares y otras existentes en distintos puntos de la ciudad.

Un temporal de las características del ocurrido aparece comparable en este siglo sólo con los que azotaron a gran parte de la región a mediados de Agosto de 1930 y Junio de 1940. Sin embargo, sus consecuencias no tienen parangón en la historia de la ciudad, tanto por la magnitud de los daños como por las pérdidas de vidas humanas que causó. En efecto, los torrentes de agua y sedimento a su paso por la ciudad y zonas suburbanas, provocaron más de un centenar de víctimas fatales, varios miles de damnificados, daños a cerca de cinco mil viviendas, destrucción de numerosas calles y construcciones, cortes de caminos de acceso a Antofagasta y de la vía férrea del ferrocarril de Antofagasta a Bolivia, e interrupción del abastecimiento de agua potable a causa de la rotura de una de las matrices de la red. La catástrofe sumió a la los antofagastinos en un caos que mantuvo por semanas paralizadas importantes actividades de la ciudad.

Apenas superadas las etapas más críticas de la emergencia, surgieron entre las autoridades, técnicos y académicos de la región naturales inquietudes que llevaron prontamente a realizar evaluaciones de diversos aspectos de la situación vivida. Entre ellas, destacó la preocupación por establecer el origen y principales características de este inusual evento hidrometeorológico, lo que motivó la realización de diversos estudios técnicos especializados.

En estos estudios quedaron consignados algunos de los aspectos más relevantes del fenómeno acaecido, así como de sus dramáticas consecuencias. Basados en la experiencia y antecedentes recogidos, en algunos de ellos se avanzaron soluciones orientadas a aminorar los efectos devastadores que a futuro pudiesen tener contingencias similares. Las soluciones estructurales propuestas significan la

construcción de numerosas obras de ingeniería de menor y mediana envergadura e inversiones cuantiosas que superarían los 5.000 millones de pesos expresados en moneda de fines del año 1991.

Considerando las funciones y atribuciones que en materias de recursos hídricos le confiere el Código de Aguas a la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, y que dentro de estas materias un tema básico lo constituye no sólo la medición y cuantificación de dichos recursos sino también la realización de estudios e investigaciones relacionadas con los diversos procesos hidrometeorológicos que ocurren en las cuencas del territorio nacional, y teniendo en cuenta además, el relativo desconocimiento existente en nuestro país sobre los aspectos hidrológicos e hidráulicos vinculados a la generación y características que tienen eventos como el ocurrido en Antofagasta los días 17 y 18 de Junio de 1991, dicha Dirección propuso al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, bajo los términos de convenio de cooperación, la realización de un estudio específico destinado a caracterizar las crecidas y corrientes de agua y detritos súbitas ocurridas en la zona costera de la II Región.

## **1.2 Objetivos y Alcance del Estudio.**

Dentro del marco arriba planteado, el Centro de Recursos Hidráulicos del Departamento de Ingeniería Civil, abordó el desarrollo de una investigación orientada a recopilar, procesar y analizar la información disponible referente al fenómeno ocurrido en Antofagasta y zonas costeras de la II Región con el propósito de caracterizar hidrológica e hidráulicamente tanto las crecidas como las corrientes de detritos que se produjeron en las principales quebradas. La Dirección General de Aguas, por su parte, aportó el financiamiento de los costos directos demandados por el estudio y los trabajos de terreno requeridos para el mismo.

Debido a que se contó principalmente con información de lo ocurrido en Antofagasta, ya que en el resto de la zona costera el fenómeno fue escasamente documentado, se decidió centrar el estudio específicamente en esta ciudad. Por otra parte, en atención a la relativa escasez de antecedentes disponibles pero a la gran importancia que quedó de manifiesto tiene este tipo de fenómenos aquí, particularmente en lo que se refiere a estudiar y materializar medidas de mitigación para hacer frente con efectividad a eventos futuros de similares características, se consideró necesario realizar una complementación del estudio no prevista dentro de los alcances originalmente planteados.

Por los motivos explicados, como parte del estudio se realizó además una exhaustiva revisión bibliográfica, tipo "estado del arte", referente al conocimiento actual sobre los orígenes, características y procesos físicos más relevantes asociados

con los flujos de detritos que ocurren en zonas montañosas de otras partes del mundo. Los antecedentes recopilados, algunos de los cuales son de data tan reciente como el año pasado (1992), constituyen un marco de referencia bastante completo que orienta sobre la diversidad de condiciones bajo las cuales se generan estos fenómenos, así como de las características físicas que puede esperarse presenten las crecidas y corrientes de detritos a que dan origen.

A lo anterior se agregó también una caracterización geológica y otra meteorológica del evento que sirven de fundamento para explicar el origen y las características geo-hidro-meteorológicas generales que tuvo el fenómeno, todo lo cual permite en definitiva formular un diagnóstico más acabado y objetivo de la situación acaecida desde un punto de vista hidrológico e hidráulico.

Con el fin de dar alguna orientación acerca de situaciones futuras que podrían afectar a la ciudad de Antofagasta, el estudio incluye un pronóstico preliminar el cual permite adelantar cifras sobre caudales y volúmenes de detritos que puede esperarse se produzcan en las quebradas que descargan en la ciudad. Este pronóstico supone condiciones hidrometeorológicas más desfavorables que las del año 1991 y estimados, como referencia, para un período de retorno de 100 años, el cual se emplea usualmente en el diseño de obras de ingeniería de mediana envergadura o cuyo riesgo de colapso puede significar consecuencias graves que es necesario minimizar.

### 1.3 Organización y Contenido del Informe.

En el presente informe se sintetiza los antecedentes, procedimientos de cálculo y análisis, principales resultados, discusiones y conclusiones producto del estudio realizado, cuyo marco general y objetivos y alcance han sido descritos en los puntos precedentes.

Toda esta información se ha incluido en seis capítulos adicionales a este capítulo introductorio, siguiendo un ordenamiento de las materias tal que en los primeros se tratan los temas más generales o que constituyen el fundamento científico de los siguientes, que son los que se orientan específicamente hacia los aspectos de ingeniería de la investigación. Estos capítulos que constituyen el texto principal del informe, se acompañan además de anexos conteniendo información o datos particulares de interés empleados en el estudio.

A continuación se presenta una sinopsis del contenido de cada capítulo.

En el Capítulo 2 se resume la revisión y análisis bibliográfico acerca del tema general de los desastres naturales, dentro del cual se insertan los fenómenos de

remoción en masa y los flujos de detritos. Respecto de estos últimos, se entrega un conjunto completo de antecedentes provenientes de diversos estudios lo que permite formarse una idea de la amplia variedad de situaciones documentadas, así como de los enfoques y resultados obtenidos a lo largo de décadas de investigación de estos fenómenos en zonas montañosas de Asia Central, China, Japón, Nueva Zelandia, Canadá, Estados Unidos y algunos países europeos. También se incluye antecedentes limitados que aparecen consignados en estudios realizados en Chile y otros países de Latinoamérica. El capítulo concluye con una síntesis de métodos y fórmulas de cálculo hidráulico de corrientes de detritos y lahares, basadas en la experiencia que proviene directamente de las observaciones realizadas o de teorías formuladas.

En relación a los estudios e información específica del evento ocurrido en Antofagasta, en el Capítulo 3 se sintetiza el contenido de los informes evacuados por ingenieros y académicos que lo analizaron y documentaron en su oportunidad. Se incluye aquí también, los datos reunidos con ocasión del presente estudio y que sirvieron de base para realizar las evaluaciones que se presentan en otros capítulos.

El Capítulo 4 contiene la caracterización meteorológica del fenómeno, la que en una escala sinóptica provee de una visión global y más completa que permite explicar el origen primario del fenómeno y el carácter convectivo que tuvo en la zona. Ello constituye la base para interpretar la información pluviométrica local a partir de la cual se realiza el análisis hidrológico del fenómeno lo que forma parte de las materias tratadas en el Capítulo 6.

La caracterización geológica y geomorfológica del evento ha sido resumida en el Capítulo 5. Ella incluye la definición de un marco geológico general de la zona en estudio y un análisis fotogeológico, corroborado por una visita de reconocimiento de terreno con apreciaciones de las características que presentaron los flujos de detritos en las principales quebradas de la ciudad de Antofagasta, todo lo cual conduce a una descripción cualitativa del fenómeno.

En el Capítulo 6 se ha sintetizado los antecedentes, resultados y conclusiones a que conducen los análisis hidrológico e hidráulico del evento. El primero abarca la recopilación, procesamiento y análisis de la información pluviométrica disponible en las distintas estaciones de la zona. Ello permite establecer cuáles fueron las características de la tormenta en términos del monto de la precipitación, de su intensidad y de la distribución tanto temporal como espacial. Sobre la base de registros históricos, se completa este análisis estudiando las distribuciones de frecuencia con fines de pronóstico probabilístico de lluvias causantes de flujos de detritos.

En este mismo capítulo ha sido incorporado el análisis hidráulico de las corrientes detríticas, describiéndose la base de datos empleada, la metodología, los resultados y verificaciones de los mismos, y los rangos de caudales y volúmenes de sedimento que se estiman como los que más probablemente acompañaron al evento de Junio de 1991 en Antofagasta. Se trata de un análisis mixto hidráulico-hidrológico en que se confrontan resultados obtenidos por vías independientes a fin de asegurar que las estimaciones realizadas sean físicamente posibles y objetivamente realistas.

El Capítulo 6 concluye con la aplicación de la metodología desarrollada a nivel de diagnóstico, a un evento hidrometeorológico futuro cuyo período de retorno es compatible con el diseño de obras hidráulicas de tamaño e importancia mediana. De aquí resultan rangos de caudales líquidos, caudales totales de detritos y volúmenes de detritos que pueden servir de base para realizar prediseño de este tipo de obras o bien readecuarlos para otros tipos que requieren distintos períodos de retorno.

Finalmente, en el Capítulo 7 se resume las principales conclusiones y recomendaciones que se derivan del estudio realizado.

#### **1.4 Agradecimientos**

Se agradece la colaboración y el apoyo prestado por las siguientes personas:

- Sr. Orlando Bianchi, SEREMI de Obras Públicas de la II Región.
- Sra. Mirna Araneda, Jefe del Dpto. de Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile.
- Sr. Claudio Barrios, Sectorialista de Infraestructura SERPLAC II Región.
- Sr. Director de Aguas de la II Región y personal de la Dirección General de Aguas de la II Región.
- Sr. Victorino Araya, Ingeniero Civil.