

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

CRH 93-81-I

SANTIAGO-CHILE
MAYO 1993



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 Rutllant 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.
CAPITULO 1	Introducción.
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
CAPITULO 2	Antecedentes sobre los Movimientos en Masa y los Flujos de Detritos.
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

	Págs.
CAPITULO 5	Caracterización Geológica-Geomorfológica del Fenómeno.
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
CAPITULO 6	Análisis Hidrológico e Hidráulico.
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

Págs.

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-hidroológico 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 Aravena, 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.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES SOBRE LOS MOVIMIENTOS

EN MASA Y LOS FLUJOS DE DETRITOS

2.1 Introducción

Los fenómenos relacionados con el movimiento en masa de sedimentos, dentro de los cuales se incluyen los deslizamientos, las avalanchas o los aludes y las corrientes de detritos y de barro, tienen interés académico no sólo como parte del amplio tema de los procesos físicos que modelan el paisaje y determinan la geomorfología de una región, sino también porque a menudo ocasionan catástrofes causando grandes daños y pérdidas de numerosas vidas humanas.

Estos fenómenos naturales, lo mismo que los terremotos, las inundaciones, los tsunamis y las erupciones volcánicas, generan una serie de riesgos al ser humano ya que afectan tanto su integridad física como sus actividades, y por lo mismo, se les incluye dentro del grupo de los denominados riesgos geológicos-hidrológicos o riesgos geofísicos.

Es un hecho conocido que en la medida que un país crece y se desarrolla, aumentan sus pérdidas anuales medias y los riesgos de ocurrencia de catástrofes naturales por cuanto se tiende a ir ocupando zonas del territorio cada vez menos seguras: zonas ribereñas costeras desprotegidas y más expuestas a acciones marítimas devastadoras, sectores altos y de mayores pendientes más propensos a los movimientos en masa de sedimentos, y zonas remotas expuestas al efecto eventual de erupciones volcánicas. También se tiende a ocupar áreas bajas inundables, conos de deyección y zonas de suelos de mala calidad geomecánica.

Como lo señala Hays (1981), la adecuada planificación y toma de decisiones para la ocupación de un territorio compromete a prácticamente todos los niveles de una nación. Ella requiere de una información científico-técnica adecuada acerca de la diversidad de procesos físicos que explican la ocurrencia de estos fenómenos naturales, de modo de conciliar las a menudo contrapuestas metas de seguridad ciudadana con las necesidades habitacionales o de desarrollo económico de una comunidad.

Por medio de la adopción de diversas acciones, como las que se detallan a continuación, en opinión de Hays puede conseguirse aumentar significativamente la seguridad pública, y al mismo tiempo, lograr un mejor estándar de vida, aceptando que los planificadores y técnicos puedan ponerse de acuerdo para analizar e identificar en conjunto soluciones técnicas factibles:

Evitar la ocupación de áreas donde las probabilidades de ocurrencia de un fenómeno natural sean medianas o altas.

Zonificar el suelo para normar el uso del terreno con ciertos fines específicos o emplear sólo edificaciones adecuadas dependiendo del grado de riesgo existente.

Materializar medidas estructurales relacionadas con el diseño y construcción de obras que posibiliten reducir los riesgos.

Materializar medidas económicas orientadas a redistribuir las potenciales pérdidas económicas por medio de seguros u otros instrumentos financieros.

Resulta obvio pensar que el planteamiento y materialización de acciones como las arriba enumeradas, sólo puede conseguirse en la medida que el conocimiento científico y técnico de los distintos fenómenos naturales, que ocurren en cada región geográfica del país, alcance un nivel mínimo adecuado compatible con estos objetivos. Para ello resulta imprescindible hacer consciente a las autoridades y a las instancias de decisión política de la complejidad que conllevan estos problemas así como sus soluciones, lo cual necesariamente exige orientar esfuerzos y recursos económicos en forma permanente hacia programas de investigación sistemáticos sostenibles en el tiempo. En el ámbito administrativo-institucional, también es necesario sentar las bases para la creación de una instancia técnica que centralice y coordine este tipo de programas y las acciones de prevención de los desastres naturales.

2.2 Fenómenos de Movimiento en Masa y Flujos

Estos fenómenos agrupan una variedad amplia de procesos que conducen a la remoción y traslado masivo de suelo, hacia lugares más bajos y lejanos de su área de origen. Existen diversas formas de clasificar estos fenómenos, dependiendo de la ciencia o disciplina que los haya estudiado.

La Federal Emergency Management Agency (FEMA, 1989) incluye dentro del término genérico "Landslide", que traducido literalmente significa "deslizamiento de tierra" a todo movimiento perceptible de suelo, roca y vegetación bajo influencia gravitacional, sea ésta de origen natural o antrópico. El deslizamiento se asocia con la falla de laderas ó taludes inestables producto de la acción humana o de factores naturales tales como el clima, la erosión, la meteorización, los movimientos sísmicos, la sedimentación brusca en áreas deltaicas, las olas y las depresiones bruscas de niveles en ríos y estuarios, éstas últimas condicionadas principalmente por la acción de las mareas.

Dentro de la Geología también, el ya clásico trabajo de Varnes (1978), proporciona definiciones que permiten clasificar los movimientos en masa, en las siguientes categorías:

- (1) Movimientos súbitos o fallas de tierra, dentro de los cuales se incluyen los derrumbes, los desplomes o desprendimientos y los deslizamientos (rotacionales, traslacionales y en bloque).
- (2) Los esparcimientos laterales de terreno debido a la licuefacción de suelos saturados no-cohesivos (arenas y limos) por efecto de movimientos sísmicos o cambios en la composición química en el agua contenida en los poros y constituyentes minerales del suelo.
- (3) Los movimientos bajo las formas de flujos, escurrimientos o corrientes, dentro de los cuales se incluyen la reptación (movimiento imperceptiblemente lento de una ladera), los flujos o corrientes de detritos, las avalanchas de detritos, las corrientes de suelo o tierra, las corrientes de barro, los lahares y los deslizamientos de tierra subacuados.

Desde un punto de vista agronómico-medio ambiental y más específicamente, del uso y conservación de suelos como recurso natural, el INDERENA (Ayala, 1984), proporciona una clasificación general de estos fenómenos dentro del contexto más amplio de los procesos de erosión y pérdida de suelos, a partir de la identificación de los agentes y factores condicionantes de estos procesos.

Dentro de los agentes están incluidos los elementos del medio físico que causan directamente la remoción, transporte y depositación de las partículas y conglomerados de suelo: la gravedad, el agua y el viento; también, otros agentes como el hielo y los microorganismos. Cuando predomina la gravedad y el agua como agentes del fenómeno, se habla propiamente de fenómenos de "remoción en masa".

La acción de los agentes puede ser incrementada o reducida por diversos factores que aceleran o retardan la ocurrencia de los fenómenos: clima (precipitaciones, intensidad de las lluvias, frecuencia, duración y distribución de las estaciones secas y lluviosas), suelo (estabilidad estructural, permeabilidad, porosidad, composición granulométrica, propiedades físico-químicas del suelo, etc), relieve (pendiente, longitud de las laderas, forma y exposición de las mismas, etc), formaciones geológicas en superficie (afloramientos rocosos, depósitos), cobertura vegetal y el factor humano.

Según el mecanismo predominante que genera el movimiento de los suelos, se habla de fenómenos de tipo físico o de tipo químico, y según los agentes que predominan, de erosión hídrica, eólica y de fenómenos de remoción en masa, dominando en estos últimos el efecto de la gravedad y del agua.

De acuerdo con la velocidad de generación, los movimientos se clasifican en flujos rápidos y lentos. Son flujos rápidos, los desplomes o desprendimientos, los deslizamientos, y los derrumbes, estos últimos variando desde secos (producen escombros de avalanchas) hasta húmedos o saturados (escombros aluviales). Los flujos lentos incluyen la reptación, la soliflucción y las terracetas o "caminos de ganado o patas de vaca".

Atendiendo al comportamiento mecánico, Takahashi (1981), define los movimientos masivos de sedimentos como caídas, deslizamientos y flujos de conglomerados ó de sedimentos dipersos. Tienen en común el que tanto las partículas sólidas como el fluido intersticial son movidos por la gravedad, de modo tal que la velocidad relativa entre la fase sólida y fluida en la dirección del desplazamiento de la masa, juega sólo un papel secundario. Por contraste, en el flujo de un fluido propiamente tal, las fuerzas hidrodinámicas de sustentación y arrastre, debido a la existencia de velocidades relativas, son fundamentales para el transporte de las partículas sólidas individualmente.

Atendiendo al mecanismo dominante del movimiento, a las propiedades del fluido intersticial, a la velocidad de desplazamiento y a la distancia de recorrido, Takahashi distingue cuatro categorías de movimiento en masa de sedimentos:

- 1) Desprendimientos o caídas, deslizamientos y flujos de reptación en los cuales el movimiento se realiza con pequeña deformación interna, es decir, con un comportamiento más cercano a un sólido que a un fluido.
- 2) Sturztrom o corrientes detríticas catastróficas o deslizamientos catastróficos en los cuales ocurre una desintegración inicial de la masa y los detritos escurren a lo largo de un valle casi horizontal a velocidades enormes.
- 3) Flujos piroclásticos provocados por erupciones volcánicas.
- 4) Flujos de detritos en los cuales las partículas son dispersadas dentro de una masa de agua o pulpa definidos. Las tres últimas categorías quedan incluidas dentro del grupo que denomina del "flujo gravitacional de sedimentos". En la Tabla 2.1 se resume la clasificación propuesta por Takahashi.

TABLA 2.1 CLASIFICACION DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA SEGUN TAKAHASHI (1985)

Tipo de Flujo	Mecanismo de Soporte del sedimento	Fluido Intersticial	Velocidad	Distancia Recorrida
Caídas, deslizamientos y reptación	Caída, salto, rodamiento, deslizamiento	Aire y agua	De caída libre a ~ 2 mm/año	2 veces altura
Sturzstrom	¿Interacción de partículas? ¿Fluidización?	Aire (vacío)	< 50 m/s	200 m a ~ 10 km
Flujo Piroclástico	Fluidización ¿Interacción de partículas?	Aire caliente Gas volcánico	< 50 m/s	< 60 km
Flujo de Detritos	¿Interacción de partículas? Resistencia de la matriz Flotación	Agua Pulpa arcillosa	200 m/s a ~ 0,5 m/s	200 m a ~ 10 km

2.3 Flujos o Corrientes de Detritos y Barro

2.3.1 Definiciones y Terminología

De acuerdo con la clasificación de Varnes, (1978) los flujos de detritos ("debris flow") constituyen una forma de movimiento en masa rápido en el cual suelo suelto, fragmentos de roca y materia orgánica diversa, se mezclan con aire atrapado en poros y agua dando origen a una pulpa o concentrado líquido-sólido que escurre pendiente abajo. Es usual que los flujos de detritos estén vinculados a la presencia de quebradas o surcos de fuerte pendiente siendo sus zonas de depositación áreas más planas y lateralmente extendidas con la forma de abanicos o conos de detritos.

Un flujo de detritos rápido o muy rápido es definido por Varnes como avalancha de detritos. El movimiento de materiales de granulometría más fina o rocas con contenidos significativos de arcilla, secos o saturados, se define como flujo o corriente de tierra ("earthflow"). La característica más relevante de una corriente de tierra es su forma de reloj de arena, en que la cabeza la constituye una depresión redondeada o circo; en él inicialmente se junta el material inestable para luego fluir por una garganta más angosta hasta descargar y depositarse finalmente al pie de la ladera en el piso del valle, conformando un depósito redondeado semi-circular.

Cuando una corriente de tierra contiene material suficientemente húmedo como para escurrir en forma rápida y este material está constituido al menos por un 50%

en peso de partículas del tamaño de arena, lino y arcilla, se habla de corriente o colada de barro ("mudflow").

El lahar es una forma especial de corriente de detritos o colada de barro que se origina en las laderas de un volcán como consecuencia de la remoción y acarreo de depósitos volcánicos producido por lluvias intensas, derretimiento brusco de nieve o hielo o vaciamiento súbito de agua debido a la ruptura de represamientos causados por glaciares, lagos-cráteres o lava de anteriores erupciones. Según Mac Phail (1973) el término lahar fue introducido en la literatura de las Ciencias de la Tierra en 1929 por Scrivenor y utilizado por Bernmelen en 1949 para describir las corrientes de barro volcánica y detritos que ocurren con frecuencia en Java, sin que necesariamente se considere que el material removido sea el resultado directo de volcanismo.

VanDine (1984) define lo que denomina un "torrente de detritos" como un movimiento en masa que involucra a un flujo de agua cargado predominantemente por material inorgánico de granulometría gruesa y materia orgánica, muy rápido que se produce en cauces existentes confinados y de pendiente pronunciada.

Según este autor, otros términos que han sido utilizados y que siguen en uso para describir fenómenos de características similares son: corrientes alpinas de barro ("alpine mudflows"), corrientes confinadas en valles ("valley-confined flows"); flujos canalizados de detritos ("channelized debris flows"); corrientes de detritos de montaña ("mountain debris flows") o simplemente flujos de detritos ("debris flows") como lo emplean Varnes y Takahashi.

La terminología que se usa en hispanoamérica para identificar y describir los rápidos movimientos masivos de material sólido y agua es bastante amplia y ambigua. Carrillo (1987) describe los que en Perú son llamados "huaycos" (palabra quechua que significa quebrada): "los huaycos peruanos se definen como grandes volúmenes movidos bajo la forma de flujos rápidos de aguas turbias, cargadas de clastos, bloques de roca, vegetación, troncos, nieve, etc., como materiales consolidados en superficie que al humedecerse adquieren gran movilidad, desplazándose a través de quebradas de régimen hídrico temporal o seco que sufren grandes precipitaciones pluviales en forma intermitente y tienen pendientes empinadas y escasez de vegetación". Carrillo utiliza también la palabra "aluvión" para describir las corrientes de detritos producidas por aludes y avalanchas provocadas por derrumbes de montañas, encauzados a alta velocidad por quebradas y ríos con fuertes pendientes.

Golubev (1973) define avalancha o rodado como la masa de nieve que desliza por la superficie inclinada de una pendiente de montaña. Este autor utiliza también indistintamente la palabra "alud". Por otro lado, describe las "corrientes de barro (mud

stream, mud flow o debris flow en inglés; lave, lave torrentielle, avalanche boueuse en francés; mure, murgrang, ruff, ruffe en alemán) como una mezcla sólido-líquida que no siempre es barro: "La mezcla puede contener, además, detritos de varios tamaños que van desde cantos rodados a limos finos. El porcentaje de material detrítico puede alcanzar 50% del volumen total de la corriente".

El Diccionario de la Lengua de la Real Academia Española (Vigésima Edición, 1984) define aluvión como "avenida fuerte de agua, inundación" y también da las acepciones siguientes: "accesión paulatina, perceptible en el tiempo, que en beneficio de un predio ribereño va causando el lento arrastre de la corriente"; "dícese de los terrenos que quedan al descubierto después de las avenidas y de los que se forman lentamente por los desvíos o las variaciones en el curso de los ríos". Como se aprecia, el significado de aluvión es muy amplio y por lo mismo, inadecuado como término técnico para describir una corriente de detritos.

2.3.2 Principales Características de las Corrientes

Según Golubev (1973), las corrientes de detritos y barro, que como ya se ha señalado, contienen hasta un 50% de material detrítico con respecto al volumen total, tienen una duración breve que generalmente no sobrepasa sino algunas horas. Bajo estas condiciones la corriente se comporta como un líquido cuyo peso volumétrico alcanza 1,8 ton/m³. Cuando el porcentaje de detritos supera el 50%, la corriente se hace "coherente", comportándose como una masa pegajosa debido a la gran cantidad de barro; cuando se detiene, el agua no se separa del conjunto. Por su consistencia, las corrientes de detrito y barro se dividen en dos categorías: las no coherentes, que tienen un movimiento turbulento, y los coherentes, que se mueven como un cuerpo plástico. Las no coherentes se dividen a su vez en corrientes pedregosas, de piedra y barro, y de barro propiamente tal, aumentando en este orden su peso volumétrico desde 1,15 ton/m³ hasta 1,50 ton/m³ y más. Debido a su gran peso, volumen y velocidad (pueden transportar bloques de roca de cientos de toneladas, acarrear varios millones de metros cúbicos de material y tener velocidades que exceden los 5 m/s), las corrientes poseen una enorme fuerza destructiva, produciéndose la mayoría de ellas en zonas montañosas, sobre todo en las de clima árido.

Para la generación de una corriente de detritos, se requieren básicamente tres condiciones:

La cuenca debe contener mucho material detrítico, el cual constituye la fase sólida de la corriente.

Gran cantidad de agua de lluvia, de fusión de nieve o hielo, o agua proveniente del vaciado súbito de embalses naturales o artificiales, la que forman la fase líquida de la corriente.

El lecho de la hoya debe tener pendientes empinadas para asegurar que por efecto gravitacional se mueva la masa.

Según este autor, la falta de lluvia explica la escasez o poca frecuencia de corrientes detríticas en el Norte de Chile, y en el Sur, la carencia de material detrítico y la importancia de la cubierta arbórea son factores que minimizan la ocurrencia de estos fenómenos.

En la literatura técnica más reciente (última década) se encuentran diversos trabajos orientados a aclarar desde un punto de vista más cuantitativo ciertos aspectos relevantes característicos de las corrientes naturales de agua y sedimento. Ello principalmente con el fin de clasificarlas de acuerdo con ciertos parámetros físicos significativos que permitan en último término avanzar hacia una mejor descripción de los procesos individuales que llevan asociados y en su modelación.

Así por ejemplo, en opinión de Bradley y Cutcheon (1985), no obstante la gran cantidad de investigaciones realizadas, las más recientes de las cuales han sido hechas en Japón y China, subsisten todavía diferencias entre ingenieros, geólogos, geomorfólogos e investigadores en general, en cuanto a la clasificación de las corrientes hiperconcentradas y detríticas. Se señala por ejemplo, cuáles han sido los aspectos más significativos tenidos en cuenta en los distintos trabajos realizados para clasificar este aspecto:

Mecanismo desencadenante. De acuerdo con la forma en que se genera una corriente se habla de lahares, corrientes de barro de regiones montañosas, semi-áridas y alpinas, corrientes morrénicas o cercanas a glaciares.

Composición de sedimentos. Bajo el 20% de concentración de sólidos en volumen es el agua el factor determinante del comportamiento de la corriente, pero la división entre flujos hiperconcentrados y flujos detríticos es todavía esencialmente materia de desacuerdo. Los flujos que se observan en Japón son, por ejemplo, básicamente detríticos en tanto los de China que contienen material más fino, son posiblemente hiperconcentrados o corrientes de barro.

Comportamiento reológico. Dado que los modelos newtonianos no pueden considerar adecuadamente los efectos de cohesión ni de fricción interna, se han propuesto modelos alternativos como el del plástico ideal o de Bingham para

pulpas compuestas de arcillas o finos, el modelo pseudoplástico o dilatante, etc.

Propiedades físicas del fluido. La densidad y viscosidad dependen básicamente de la concentración de sólidos, pero el parámetro de Bingham de fluidos de comportamiento plástico, depende además de la granulometría, tamaño de las partículas y forma de ellas.

Costa (1988) por su parte, analiza y describe aspectos reológicos-hidrodinámicos, geomorfológicos y sedimentológicos que en su opinión permiten diferenciar en términos cuantitativos a estos flujos, proponiendo tres categorías: crecidas o avenidas fluviales turbias, corrientes hiperconcentradas de sedimento y flujos de detritos.

Desde el punto de vista reológico-hidrodinámico los flujos detríticos se consideran no-newtonianos (viscoplásticos) con concentraciones volumétricas de sólidos entre 47 y 77%, densidades entre 1,8 y 2,3 gr/cm³, viscosidades dinámicas que superan a la del agua en más de 20.000 veces por lo cual su régimen es laminar. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen que permite comparar según este autor los de tres tipos de corrientes.

Desde el punto de vista geomorfológico-sedimentológico, los depósitos y su estructura y composición sedimentaria permiten también distinguir entre los diferentes tipos de flujo. En la Tabla 2.3 se incluye las diferencias más significativas presentadas por Costa.

2.4 Antecedentes Cualitativos y Cuantitativos Característicos de las Corrientes de Detritos y de Barro

2.4.1 Observaciones de Fenómenos Ocurridos en el Mundo

Mucho del conocimiento actual acerca de los procesos físicos y características que presentan los flujos detríticos, proviene básicamente de observaciones puntuales o sistemáticas realizadas en diversas partes del mundo. También existe alguna información obtenida de fenómenos ocurridos en hispanoamérica y en Chile que resulta útil conocer para caracterizar algunos aspectos más relevantes de estos flujos.

TABLA 2.2 CARACTERIZACION REOLOGICA-HIDRODINAMICA DE CORRIENTES LIQUIDO-SOLIDAS SEGUN COSTA (1988)

Parámetro	Crecidas Fluviales	Flujos Hiperconcentados	Flujos de Detritos
Concentración Volumétrica (%)	0.4-20	20-47	47-77
Densidad de la Mezcla (gr/cm ³)	1.01-1.33	1.33-1.80	1.80-2.30
Resistencia al Corte (dinas/cm ²)	0-100	100-400	> 400
Clasificación Reológica	Newtoniano	Bingham	Viscoplástico
Viscosidad Dinámica (poise)	0.01-20	20-47	>> 200
Velocidad de Sedimentación (% agua)	100-33	33-0	0
Distribución Vertical de la Concentración	No Uniforme	No Uniforme a Uniforme	Uniforme
Régimen Predominante	Turbulento	Transición Turb/Laminar	Laminar

En el Capítulo 3 del libro "Physical Processes in Geology" de Johnson (1970) se describe dos casos de flujos detríticos ocurridos en Wrightwood, California y en Parker, Arizona. El 20 de Mayo de 1969, cerca del poblado de Wrightwood, en el sur de California, E.E.U.U, a aproximadamente los 08:00 AM se produjeron flujos intermitentes en el cauce cada 20 a 30 minutos. Estos flujos ocurrían como ondas sobre una corriente barrosa más o menos continua de unas pocas pulgadas (5 a 10 cm) de profundidad y tres a cuatro pies (1 a 1,2 m) de ancho, produciendo un aumento significativo de las alturas de agua. Las ondas aparecían precedidas de un ruido sordo y su frente típicamente estaba constituido principalmente por clastos de tamaños entre 15 cm y 60 cm, pero ocasionalmente hasta 1 a 1,5 m. Detrás del frente, unos 3 a 5 m de distancia los clastos aparecían más disgregados e inmersos en una matriz de material fino y barro. Las ondas se extendían varias decenas de metros y a veces alcanzaban hasta 100 m de largo. Esta corriente se generó aparentemente por un rápido derretimiento de nieve después del lluvioso invierno de 1969 en que se acumuló un manto inusualmente grueso de nieve en las montañas de San Bernardino, cerca del poblado. El agua de fusión de la nieve saturó una zona de detritos inestables provocando deslizamientos masivos de laderas.

TABLA 2.3 CARACTERIZACION GEOMORFOLOGICA-SEDIMENTOLOGICA DE CORRIENTES LIQUIDO-SOLIDAS SEGUN COSTA (1988)

Tipo de Corriente	Depósitos y Formas	Estructura Sedimentaria	Características Granulométricas
Crecidas Fluviales Turbias	Barros, abanicos, laminar; cauces con razones ancho-profundidad grandes.	Estratificación horizontal o inclinada; imbricación fuerte a leve; estructura de corte y relleno; uniforme a graduado.	Distribución normal, clastos redondeados con amplio rango de tamaños.
Corrientes Hiperconcentradas	Similares a las anteriores	Alguna estratificación horizontal a masiva; imbricación leve; lentes de gravas delgadas; graduación normal a inversa.	Predominio de arenas gruesas
Flujos de Detritos	Sin estratificación; Bordes de depósitos; lóbulos terminales; cauces trapeziales o en forma de U	Poca o ninguna imbricación; graduación inversa en la base y normal arriba	Rango extremo de tamaños contiene o puede contener megaclastos.

El fenómeno ocurrido en Parker, Arizona, fue de mayor magnitud dando origen a una onda de frente vertical de unos 10 a 11 m de altura que arrastró bloques de roca hasta unos 9 m a lo largo del cañón. Los depósitos detríticos formaron, a la salida del cañón, un cono de unos 1500 m de longitud con un frente muy abrupto de unos 4 a 5 m de altura.

Por su parte, Takahashi (1991) en su libro "Debris Flow", introduce el tema describiendo casos similares ocurridos en Japón, China y Nueva Zelandia. A continuación se resume los antecedentes presentados por este investigador:

Observaciones realizadas en la Quebrada Kamikahorizawa-Volcán Monte Takedake, Japón.

En este sistema se han realizado estudios sistemáticos que datan desde 1975, orientados a investigar la generación, flujo y depositación de las periódicas corrientes detríticas que se producen allí. Así se señala que los fenómenos están vinculados a tormentas de intensidades, que superan los 4 a 7 mm en 10 min (24 a 42 mm/hr en promedio), y no a las condiciones de precipitación

antecedente. Las ondas son prácticamente de frente vertical desplazándose entre velocidades de 3 y 4 m/s en pendientes del orden del 7 al 10%, aunque hay flujos que superan los 10 m/s. La densidad del flujo se estima entre 1,40 y 1,85 gr/cm³, y el material más grueso (sobre 10 cm) presente en la corriente proviene básicamente de la degradación que experimenta el lecho. La depositación del material, una vez alcanzado el valle, tiene la forma de un abanico de unas 2 a 3 veces el ancho de la quebrada. Durante el proceso de depositación se produce una segregación del material que deja bloques de roca de 2 a 5 m de diámetro a medio camino, quedando en el frente del abanico bloques y piedras de tamaño inferior a 1 m. Los volúmenes del flujo varían considerablemente, yendo los extremadamente grandes hasta 15.000 m³ y los más pequeños a cifras inferiores a 1000 m³.

Observaciones en el Río Name, Japón.

El área de la hoya en este caso es de 3,46 km². La corriente de detritos que se describe, tuvo un frente pedregoso que se desplazó a velocidades cercanas a los 6 m/s para tramos de pendientes similares al de la quebrada Kamikahorizawa. Sin embargo, las velocidades medias de la corriente misma varían con el contenido de sólidos y la profundidad de la corriente alcanzando valores superiores a 16 m/s. El caudal peak resultó de 884 m³/s, unas 60 veces mayor que el peak estimado suponiendo una crecida de agua (14,7 m³/s).

Observaciones en Quebradas del Volcán Sakunajima, Japón.

Las corrientes de detritos se vinculan a la ocurrencia de lluvias que exceden los 3 a 4 mm en 10 min (18-24 mm/hr promedio). Su duración no excede de 10 a 20 min. En un sector donde el cauce se encuentra canalizado, se han determinado concentraciones volumétricas de la corriente en el rango de 45 a 66%, independientes del caudal.

Observaciones en la cuenca experimental Shuramizodani del observatorio de Sedimentación de Hodaka, Japón.

En esta cuenca se producen frecuentes corrientes de detritos; las ocurridas el 21 de Julio de 1985 tuvieron las características de dos ondas con caudales de 40 m³/s y 120 m³/s, respectivamente. Sus duraciones fueron estimadas en 8 min la primera y 13 min la segunda.

Observaciones en el Mt Thomas, Canterbury del Norte, Nueva Zelanda.

Se describe los flujos sucedidos el 20 de Abril de 1978 que tuvieron una duración de 3 días y que se caracterizaron por presentarse bajo la forma de ondas o pulsos a intervalos de 10 a 20 min. Entre estas ondas el flujo era muy barroso, como pulpa, con consistencia de aceite de motor, turbulento y ondulatorio. Una de las ondas que ocurrió el 22 de Abril, fue de unos 3 m de altura la que fue seguida por un rápido ascenso del caudal (de 0,5 a 1,0 m³/s) acompañado de un notable aumento en la viscosidad dando la impresión de hormigón plástico. La velocidad creció de 1 a 2-3 m/s manteniendo el número de Froude valores cercanos a 1.0. El paso del peak, sin embargo, fue en régimen supercrítico llegando la velocidad hasta unos 5 m/s. La densidad varió entre 1,6 gr/cm³ a 2,1 gr/cm³ durante el flujo y las concentraciones de los sólidos fueron entre 33 y 66% en volumen. Durante el paso de las ondas, el material sólido tenía tamaño mediano de unos 16 mm, con fracciones sobre 2 mm superiores al 70% en peso; el resto era 20% de arena, 6% de limo y 4% de arcilla. Entre los frentes de onda la granulometría se hacía más fina, teniendo la siguiente composición: 20% grava, 54% arena, 15% limo y 11% arcilla.

Takahashi (1991) reporta también los antecedentes obtenidos de las investigaciones realizadas en una quebrada de la hoya del Jiang-Jia en China, cuya área aportante es de 48,6 km² variando en cota desde 1088 msnm hasta los 3269 msnm, con un curso principal de 13,9 km de longitud. En esta quebrada se suceden flujos con una periodicidad de unos 10 a 20 al año, lo que justificó la instalación de la estación experimental del Instituto Dongchuan de Investigación de Flujos de Detritos y Barro (Academia China de Ciencias - Distrito Dongchuan - Provincia de Yunnan, China).

Davies et al. (1992) analizan y describen los principales procesos observados en Jian-Jia, pretendiendo dar una visión integrada de estos fenómenos. Desde el punto de vista geomorfológico, son a su juicio tres las unidades que intervienen en el proceso completo:

- 1 una ladera o talud en fase activa de erosión.
- 2 una quebrada angosta y empinada en fase de degradación.
- 3 un cauce o valle más amplio y extendido cuyo lecho lo conforman sedimentos aluviales.

Los procesos individuales que se identifican son los siguientes:

Los procesos en laderas sin vegetación y con taludes pronunciados (40° - 90°) producto de la incisión de los lechos de las quebradas, que se activan durante las lluvias. El material suelto o planchones pequeños, se desprende cayendo a la quebrada formando una masa saturada o pulpa de material fino y piedras. Estos aportes son intermitentes, significando volúmenes de unos pocos a cientos de m^3 que se incorporan a la quebrada en diferentes puntos a lo largo de su cauce y en distintos tiempos.

Los procesos en quebradas cuyas pendientes superan por lo general el 18%, con fondos muy rugosos donde se acumula paulatinamente material hasta que producto de lluvias intensas es removido y transportado hacia aguas abajo. Es frecuente que estos bloqueos transitorios se revienten súbitamente provocando trenes de ondas compuestos por frentes pedregosos o con bloques de rocas y colas de material más fino. Entre frente y frente escurre un flujo hiperconcentrado conteniendo un alto porcentaje de finos.

Los procesos en el valle que aparecen precedidos por flujos líquidos ($5 m^3/s$) luego de lo cual se inicia el paso de pequeños trenes de ondas inicialmente constituidos por lodos muy fluidos que recubren el lecho. A lo anterior siguen grandes y veloces olas (varios metros de alto y velocidades de unos $10 m/s$) que contienen masas muy densas ($2 ton/m^3$) con la apariencia de hormigón fluido. Los intervalos entre olas varían entre 1 y 5 min. Los clastos angulares gruesos (varían desde 1 mm hasta 1 m) están contenidos en una pulpa espesa de finos lo que le da al fluido una característica reológica propia, distinta de la de uno newtoniano. La concentración volumétrica de los sólidos puede llegar hasta el 70% a 80% y el peso volumétrico de la mezcla alcanzar hasta $2 ton/m^3$.

Otras investigaciones realizadas en China, Rusia, Alemania, Italia, Canadá, etc. permiten formarse una idea de otros aspectos característicos de estos fenómenos como son los hidrometeorológicos.

Cai Ze-Yi (1992) reporta los resultados de estudios realizados en las provincias de Sichuan y Shaanxi (China) que apuntan a establecer las condiciones hidrometeorológicas que generan corrientes de detrito-barro. Se describe los eventos ocurridos en Julio y Agosto de 1981 que aparecen vinculados en estas dos regiones con precipitaciones frontales o convectivas del orden de $100 mm/día$. Wang Zuo-Shu (1992) analiza las relaciones que existen entre 10 eventos severos de corrientes detríticas ocurridos en China entre 1940 y 1950, y precipitaciones anormales

asociadas a fenómenos de circulación atmosférica a escalas de tiempo de 1 mes y varios cientos de kilómetros en extensión. Wei Wenshow y Gao Cunhai (1992), reportan los antecedentes de estudios realizados en las cadenas montañosas de Tain Shan occidental donde los flujos detríticos, de carácter macro-viscoso aparecen vinculados principalmente a la saturación y desestabilización de una gruesa capa de depósitos del Cuaternario provocada por la rápida fusión de nieve y hielo.

Salikhova y Liahorvskaya (1992) detallan por su parte, los procedimientos empleados para predecir eventos de corrientes detríticas en regiones montañosas del Asia Central (Tadjikistany, Kopetdeg) por el Centro Hidrometeorológico de Asia Central, áreas que muestran una gran propensión a la ocurrencia de este tipo de fenómenos. Los métodos de pronóstico desarrollados se basan en el hecho que aquí las corrientes de detritos son originadas por lluvias diarias que exceden los 20 a 30 mm, con precipitaciones antecedentes de 3 días de 9 a 15 mm.

Sobre los aspectos geológicos y geomorfológicos que caracterizan estos fenómenos existe también una amplia documentación en la literatura técnica. Gori y Tonelli (1992), por ejemplo, analizan en base a interpretación fotogeológica la información de movimientos tipo corrientes detríticas en la zona centro-oriental de los Apeninos italianos cuyos suelos presentan la particularidad de estar constituidos por sedimentos finos arcillosos. Plantean que en general son dos los tipos de factores que explican la ocurrencia de estas corrientes de detritos:

- 1) Factores intrínsecos, los que incluyen el clima, la naturaleza y composición mineralógica de los sedimentos y los rasgos geotécnicos e hidrogeológicos.
- 2) Factores extrínsecos, entre los cuales se encuentran las características del valle, su ancho, forma, pendiente y profundidad, las zonas de recarga, descarga del material, etc.

En el área de estudio, se identificó 30 eventos, comprendiendo un lapso de 36 años, concluyéndose que las corrientes de detritos o de barro están determinadas principalmente por la presencia de arcillas plásticas (IP = 60%) o material expansible a lo cual parece agregarse también un factor antropogénico debido a la caída de lluvia ácida (pH = 4) que afecta la constitución físico-química del suelo.

En relación a la frecuencia de corrientes de detritos en Los Alpes del Sur, Strunk (1992) reporta un estudio en que reconstruye por medio de un análisis dendrogeomorfológico eventos que se remontan hasta el año 1500. Su investigación se basa en el estudio de los anillos de troncos de Abetos, sepultados o vivos, que aparecen alterados por acumulaciones de detritos lo que permite inferir por ejemplo, que entre

1884 y 1989 el período de recurrencia mediano de estos fenómenos en esta zona de Los Alpes es del orden de 9 años.

Otras investigaciones realizadas en diversas partes del mundo agregan antecedentes complementarios que demuestran la gran variabilidad y diversidad de situaciones que se presentan asociadas a la ocurrencia de corrientes de barro y detritos.

Para el torrente de Schmiedlaine, Sur de Alemania, Jong (1992), reporta los resultados de un estudio que comprende 1,8 km de un cauce de 8% de pendiente con ocasión del flujo detrítico ocurrido el 30 de Junio de 1990 durante una tormenta de 80 mm en 30 min (160 mm/hr promedio). El material arrastrado abarcó tamaños desde 50 mm hasta 1 m, con un tamaño medio cercano a los 200-250 mm. El caudal peak alcanzó 75 m³/s con Números de Froude de 0,5 a 0,6 y velocidades de unos 2 a 3 m/s.

Mirinova y Yablonskiy (1992) por su parte, aportan datos de un torrente de montaña llamado Kanusyak, perteneciente a los Carpatos Ucranianos y un torrente de la ciudad de Kiev. En el primero, el 8 de Junio de 1969, después de ocurrida una lluvia que superó los 200 mm en 24 hrs (8,3 mm/hr en promedio) se produjo una corriente detrítica formada por masas de suelo, piedras grava, arena, barro y arcilla, encauzada en una sección de unos 17 m de ancho y altura 8 m que se desplazó una distancia de unos 600 a 650 m. La densidad de la masa en la fuente fue estimada en 2,3 gr/cm³ y su caudal peak en 554 m³/s. El caso del Baby Yar fue una corriente detrítica provocada por la falla de un tranque de relaves, el día 13 de Marzo de 1961, que almacenaba cerca de 3,5x10⁶ m³ de suelos arenosos y arcillosos no-cohesivos saturados. La corriente movilizó 600.000 m³ de material a lo largo de 1600 m inundando unas 25 há de Kiev. Su densidad inicial fue estimada en 1,5 gr/cm³ y el caudal peak en 2200 m³/s.

Uno de los trabajos más completos y bien documentados sobre la iniciación y comportamiento de un flujo de detritos volcánicos o lahar lo constituye el presentado por Pierson (1985). Lo anterior en relación a los lahares del arroyo Pine Creek y río Muddy River, de la hoya del Mount St Helens en Washington (EEUU) con ocasión de la erupción volcánica ocurrida el 18 de Mayo de 1980. Entre los aspectos interesantes que cabe destacar en este trabajo están los rangos de velocidad de la corriente, de la profundidad, del número de Froude, de la concentración volumétrica y del peso volumétrico de la mezcla, determinados en distintas secciones de los cauces. Esta información aparece resumida en la Tabla 2.4

TABLA 2.4 RANGO DE PROPIEDADES HIDRAULICAS Y FISICAS DE LOS FLUJOS DETRITICOS EN CURSOS DE LA HOYA DEL MOUNT ST HELENS, (EEUU), 18 DE MAYO 1980 (Pierson, 1985)

Nombre del Curso	Velocidad Máxima m/s	Profundidad Media m	Pendiente Cauce %	Normas Froude	Concentración Volumétrica %	Densidad gr/cm ³
Pine-Muddy Fan	20-29	2- 5	6-12	3.7-4.1	78	2.28
Muddy River	6-40	2-21	0.6-14	0.4-4.0	64-78	2.1-2.3
Pine Creek	9-31	6-15	0.9-15	0.9-2.4	66-70	2.1-2.2

De acuerdo con lo reportado por Fink et al. (1981), las máximas viscosidades que tuvieron estas corrientes fueron entre 20.000 y 320.000 veces la viscosidad dinámica del agua pura (0,01 poise), lo que resulta menor de lo estimado para corrientes de detritos, cuyo rango es de 100.000-200.000 hasta 500.000 veces la del agua, pero comparables a los rangos obtenidos para pulpas arcillosas.

También es destacable el trabajo presentado por Van Dine (1985) en relación a los flujos de detritos y torrentes de detritos registrados en la Cordillera Sur de Canadá. Se consigna una estadística completa que abarca eventos ocurridos en las décadas del 60 al 90 en cadenas montañosas en Yukon, British Columbia y Alberta, señalando lugares, fechas y ciertos rasgos relevantes de los fenómenos y sus consecuencias. Se hace una diferenciación entre flujos de detritos, torrentes de detritos, corrientes de barro alpinas y corrientes de roca/barro; las causas de los eventos son principalmente lluvias intensas (p.e el torrente de detritos ocurrido en Queen Charlotte Islands, British Columbia fue causado por una lluvia de 250 mm en 36 hrs, en promedio 6,9 mm/hr de intensidad) y avalanchas de roca o detritos. Las áreas aportantes en la mayoría de los casos son pequeñas abarcando entre 1 y 2 km², en tanto los volúmenes de material movilizado y velocidades en cauces confinados se consignan en rangos de 10.000 a 100.000 m³ y de 5 a 10 m/s, respectivamente.

En el Perú, Carrillo (1986) describe una serie de catástrofes vinculadas a la ocurrencia de los "huaycos" o corrientes detríticas provocadas por aludes o desprendimientos de laderas en la Cordillera de Los Andes. Destacan los deslizamientos y corrientes de barro ocurridos en la cuenca del río Rímac (ciudad de Lima) y en la Cuenca del río Mantero donde la causa principal radica en factores climáticos y geomorfológicos que contribuyen a desestabilizar grandes masas de suelo principalmente por saturación de las mismas. Se presenta también el caso de aludes provocados por terremotos, destacándose el de Huascarán que sepultó, el 31 de Mayo de 1970, al pueblo de Yungay causando la muerte de más de 25.000 personas. La corriente de barro producida por el desprendimiento y caída de una gran masa de roca,

hielo y nieve de unos 10 millones de m³ desde una altura de unos 500 m, movilizó a través del río Llanganuco, a velocidades estimadas en 55 m/s, un volumen altamente viscoso de lodo calculado en 30 millones de m³. La ciudad de Yungay que se encontraba protegida por la dorsal que formaba el cerro Atma, fue sepultada por la gran masa de lodo unos 4 minutos después de ocurrido el desprendimiento, al rebasar la corriente esta defensa natural.

2.4.2 Antecedentes de Corrientes de Detrito y Barro en Chile

Aparte de la información que se ha obtenido con ocasión de las corrientes que afectaron la ciudad de Antofagasta y zonas vecinas el 18 de Junio de 1991, cuyo recuento se hace en diferentes informes, resumidos más adelante, existen algunos antecedentes proporcionados por diversos estudios de carácter fundamentalmente geológico que resulta interesante dejar consignados en el presente informe. Entre ellos destacan los trabajos de Segerstrom (1965), Golubev (1973) y Abele (1984).

Segerstrom (1965), analiza el origen de los depósitos del Cuaternario que rellenan los valles y cubren los interfluvios de la zona árida y desértica de la hoya del río Copiapó, III Región de Atacama.

Su análisis abarca la gran variedad de movimientos en masa que se aprecian en esta zona, que van desde los flujos de tierra y glaciares de roca en la cabecera de la hoya, hasta las corrientes de barro y deslizamientos detríticos en la zona inferior de la cuenca. En relación a las corrientes de barro, distingue tres tipos que son reconocibles dependiendo de la intensidad de tormentas de corta duración que las producen o del medio en que se desarrollan:

- 1) Corrientes que recubren los valles
- 2) Corrientes generadoras de abanicos aluviales
- 3) Corrientes líquidas en depósitos de arenas eólicas

Las corrientes que recubren los valles están asociadas a masas líquido-sólidas, de relativamente baja viscosidad, que escurren cuando la lluvia origina suficiente escorrentía para saturarlas y facilitar su desplazamiento gravitacional, sin que se produzca flujo líquido. El material constituyente de estas corrientes de barro abarca desde limos hasta gravilla. Por su parte, las corrientes que forman abanicos resultan de la confluencia y superposición de numerosos hilillos de lodo que van escurriendo a través de los años desde las laderas, desembocando en un tributario que descarga en el valle, durante lluvias cortas. Señala como ejemplo, el caso de la quebrada Cerrillos. Finalmente, los flujos líquidos que se originan por lluvias intensas, muy ocasionales, generan corrientes de lodo que arrastran principalmente arenas

depositadas por el viento en laderas y hondonadas, como lo apreció el autor en la ladera norte del cerro Bramador.

El tema de las avalanchas y corrientes de barro en Chile es abordado y descrito a partir de sus características principales por Golubev (1973). Señala que si bien estos fenómenos figuran entre los más destructivos, y a pesar de las víctimas y daños que causan, no existen a la fecha de realizado el trabajo, estudios especiales al respecto. En relación a las corrientes de barro, divide y zonifica el territorio en regiones homogéneas para la formación de ellas, atendiendo a indicadores tales como la cantidad de corrientes de barro por unidad de superficie o su frecuencia estimada para algunos barrancos específicos. En la II Región, desde Taltal o Tocopilla define una franja costera que corresponde a una región con "avalanchas y corrientes de barro probables"

Señala para la Cordillera de la Costa, entre los 20 y 27° de Latitud Sur: "Este sector tiene un clima tropical desértico, relieve regularmente desmembrado, ausencia de escurrimiento superficial y vegetación. La importancia de las acumulaciones detríticas y la inclinación de las pendientes occidentales de la Cordillera de la Costa, hacen suponer una alta posibilidad de corrientes de barro. Pero la ausencia de lluvias intensas inhibe totalmente este peligro. Recordemos, sin embargo, que justamente debajo de laderas potencialmente peligrosas, están los principales puertos del Norte Grande, como Antofagasta, Iquique, Tocopilla, etc."

Los fenómenos relacionados con el movimiento en masa de sedimentos producidos en los Andes Chilenos, también analizados desde un punto de vista geológico son presentados por Abele (1984). El trabajo abarca los aspectos más básicos que tienen que ver con el origen y génesis de los derrumbes de montañas y morrenas, poniendo énfasis en las características que permiten distinguirlos.

En cuanto a los aspectos hidrometeorológicos e hidráulicos de las corrientes de detritos y barro, existe relativamente escasa información en nuestro país y por lo mismo el tema en lo que toca a estos aspectos es prácticamente desconocido. Con ocasión del aluvión (corriente de barro) ocurrida el 29 de Noviembre de 1987 en la hoya superior del río Colorado, se reunió y analizó alguna información relacionada con los aspectos hidrológicos e hidráulicos del fenómeno (AC Ingenieros Consultores, 1988). La corriente de barro se originó en la cabecera de la cuenca del estero Parraguirre, afluente del río Colorado, en un sector localizado a una cota cercana a los 4.700 msnm y a unos 30 km de la zona denominada El Alfalfal. El fenómeno fue provocado por un violento deslizamiento de la ladera oriental del estero Parraguirre, en una zona que presenta un desnivel con el cauce del estero antes mencionado, de aproximadamente 1200 m. Se presume que el fenómeno tuvo su causa primera en el

aumento inusual del contenido de agua y presión de poros de una masa rocosa, altamente meteorizada y fracturada, debido a un rápido proceso de deshielo originado por las altas temperaturas del aire que se dieron en este período y/o a la excepcional acumulación de nieve del año 1987 que fue la segunda más importante de los últimos 50 años (Peña y Klohn, 1990). En efecto, la isoterma 0°C se situó en los días próximos a la ocurrencia de la corriente de barro, alrededor de la cota 5.100 msnm lo cual contrasta marcadamente con su ubicación normal de verano que es inferior a los 4.200 msnm. La corriente se habría generado al impactar violentamente el piso del valle, la masa desprendida de la ladera, y licuar y pulverizar la nieve y detritos. Esta masa habría ido incorporando en su recorrido, cantidades adicionales de agua y sedimentos. Según los antecedentes disponibles, los primeros 14 km del recorrido se desarrollaron en el estrecho valle del Parraguirre, con una pendiente del 7%, como una corriente de unos 10.000 m³/s y velocidades mayores a 15 m/s. Al incorporarse en este tramo abundante agua y material fino, el flujo se habría transformado hacia aguas abajo en hiperconcentrado. En la confluencia con el Colorado, la granulometría de los depósitos presentó un 50% de grava, 20% de arena y 30% de limos y arcilla. La corriente se habría manifestado en el curso medio del río Colorado como dos ondas sucesivas, siendo la segunda, la mayor y más destructiva. Las alturas que alcanzó el flujo fueron cercanas a 30 m en el tramo superior donde el cauce del río está más encajonado y las velocidades de 8 a 10 m/s. La concentración del flujo habría sido del orden del 60% en volumen, considerando un caudal peak posiblemente superior a 2.000 m³/s y un volumen de agua de unos 24 millones de m³.

2.5 Cuantificación y Modelación de las Corrientes de Detritos

2.5.1 Comportamiento Mecánico

a) Aspectos Generales

Como se ha señalado anteriormente, las corrientes de detritos están constituidas por una mezcla de agua y sólidos de granulometría variada y amplia la cual comprende fracciones finas del tipo de arcillas, limos y arena fina, fracciones intermedias como arena y grava fina hasta gravas y bolones y bloques de rocas de dimensiones variables.

La concentración de sólidos, medida como el peso o volumen de éstos en relación al total de la mezcla, varía conforme a la incidencia de los distintos factores que intervienen en la generación de la corriente. El peso específico o peso volumétrico de la masa depende de la concentración de los sólidos y del peso específico de la partículas y fragmentos rocosos.

Las mezclas sólido-líquidas puestas y mantenidas en movimiento por acción de la gravedad, presentan un comportamiento reológico caracterizado por una relación esfuerzo de corte-deformación, variable según el contenido de agua, contenido de sólidos, granulometría y tamaño de las partículas de sedimento, e incluso forma y angulosidad de las mismas. Estas mezclas pueden comportarse como materia fluida sin ofrecer resistencia al corte o como materia fluida plástica con una tensión de fluencia y alta viscosidad.

Según sus propiedades físicas y reológicas, un flujo de detritos puede presentar diferentes consistencias haciendo que aparezca como un movimiento turbulento en que el fluido y las partículas sólidas no muestran coherencia entre si, o bien, como un movimiento laminar o plástico de una masa líquida-sólida coherente. Estos flujos llevan asociados velocidades de unos pocos hasta varias decenas de m/s y volúmenes de material miles a cientos de miles de millones de m³. Son en general de corta duración (minutos a pocas horas) e intermitentes, pero son enormemente destructivos debido a la gran energía cinética que tienen.

b) **Propiedades Físicas y Reológicas**

Las propiedades que permiten caracterizar el comportamiento mecánico de las corrientes detríticas y de barro son básicamente, la concentración en peso o en volumen de los sólidos constitutivos de la mezcla, la densidad o peso específico global y la viscosidad; en ocasiones también se incluyen otros parámetros reológicos como el esfuerzo de corte de fluencia y el parámetro de Bingham para fluidos con comportamiento plástico.

b.1) **Concentraciones, Pesos Específicos y Densidades**

De acuerdo con los antecedentes que ya han sido proporcionados en este informe, las concentraciones volumétricas de las corrientes detríticas varían en el rango del 50% al 80%, teniendo normalmente los sólidos un peso específico en el orden de 2,4 a 2,7 ton/m³ (se adopta en general es 2,6-2,65 ton/m³). El peso específico de la mezcla varía entre 1,5 y 2,3 ton/m³, siendo frecuente que el rango sea más estrecho: entre 1,8 y 2,0 ton/m³.

La relación entre concentración volumétrica (c_v), peso específico del agua (γ), peso específico de los sólidos (γ_s) y peso específico global de la corriente detrítica (γ_d), está dada por la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \gamma (1 - c_v) + c_v \gamma_s \quad (2.1)$$

La razón entre el peso específico de la corriente detrítica y el peso específico de los sólidos, o equivalentemente entre las densidades respectivas se expresa de acuerdo a lo anterior por:

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_s} = \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{1}{s} (1 - c_v) + c_v \quad (2.2)$$

donde ρ_d y ρ_s son respectivamente las densidades de la mezcla y de los sólidos. La densidad o peso específico relativo de los sólidos es s .

La máxima concentración que puede llegar a tener una mezcla sólido-líquida, constituye un límite físico importante que toman en cuenta diversos modelos desarrollados para este tipo de corrientes. Esta máxima concentración se obtiene cuando las partículas se aglutinan en seco de modo de rellenar al máximo los huecos formando una estructura compacta como sucede cuando la masa sedimenta liberando la mayor parte del agua.

Kang Zhichenz y Wan Yuzhang (1992), determinaron una relación entre la concentración volumétrica de un flujo detrítico y la concentración volumétrica máxima para corrientes observadas en la cuenca del Jiangjia en China, encontrando la siguiente regresión:

$$c_v = 1,067 c_{v \max} - 0,129; r^2 = 0,998 \quad (2.3)$$

A partir de lo anterior proponen clasificar las corrientes en cuanto a estructura y movimiento utilizando la razón $c_v/c_{v \max}$, como se detalla en la Tabla 2.5.

TABLA 2.5 CLASIFICACION DE LAS CORRIENTES DE DETRITOS SEGUN ZHICHENZ y YUZHANG (1992)

$\frac{c_v}{c_{v \max}}$	Estado de Movimiento	Tipo de Flujo de Detritos
> 0.91	Estructurado	Altamente viscoso
0.87-0.91	Laminar	Viscoso
0.76-0.86	Transición	Sub-viscoso
0.62-0.75	Turbulento	Apenas-viscoso
< 0.62	Turbulento	Hiperconcentrado

b.2) Composición Granulométrica de los Sedimentos

Los sedimentos de un flujo de detritos en cuanto a las fracciones de tamaño que la componen es semejante al del material que constituye la fuente. En general, la masa de sedimentos que se fluidiza y se mueve pendiente abajo puede estar constituida por fragmentos de roca grandes y medianas, clastos, grava, grava fina, arena gruesa y media, y finos del tipo de arena media, limos y arcilla. La proporción de estos materiales varía ampliamente en distintos casos e incluso puede producirse una disminución o aumento de algunas o todas las fracciones granulométricas a lo largo del recorrido de las corrientes, afectando su comportamiento hidráulico.

Para dar una idea de las granulometrías que se presentan en las corrientes que ocurren en China y de su efecto sobre el comportamiento que ellas tienen sobre el flujo, Wang Ying y Zhov Bifan (1992) proponen la clasificación de flujos detríticos en función del contenido de diferentes fracciones de tamaño, detallada en la Tabla 2.6.

TABLA 2.6 CLASIFICACION DE LOS FLUJOS DE DETRITOS ATENDIENDO A LA DISTRIBUCION GRANULOMETRICA - CORRIENTES EN CHINA SEGUN YING Y BIFAN (1992)

Tipo de Corriente	% en Peso de cada Fracción			
	Fracción > 2 mm	2-0,05 mm	0,05-0,005 mm	< 0,005 mm
Crecida de Agua	0	3.5	44.5	52.0
Flujo de Detritos Diluido o Corriente de Barro	74.2	17.0	3.2	3.5
Flujo de Detritos en Estado Transicional	55.8	34.6	5.6	4.0
Flujo de Detritos Viscoso	60.1	22.0	11.0	8.6

Puede apreciarse que en estos flujos el contenido de finos bajo los 50 micrones es bastante alto e incluso las fracciones más finas bajo los 5 micrones son todavía significativas.

b.3) Propiedades Reológicas y Leyes Constitutivas

Según lo consigna Takahashi (1991), son numerosos las investigaciones realizadas para determinar las propiedades reológicas y leyes constitutivas de flujos

sólido-líquidos hiperconcentrados, desde que se llevara a cabo el trabajo pionero efectuado en 1954 por Bagnold.

Bagnold introdujo el concepto de esfuerzo dispersivo que representa los efectos de choque interno entre las partículas sólidas sobre el flujo. La resistencia al escurrimiento resulta en tal caso del efecto combinado de fricción interna del fluido, de la fricción entre las partículas de sólido y de los choques interparticulares.

A partir de la definición del grupo adimensional conocido como número de Bagnold, se ha establecido el comportamiento reológico generalizado de las mezclas sólido-líquidas, relacionándolo con un parámetro adimensional de esfuerzo, tal como se muestra en la Fig 2.1

El número de Bagnold es proporcional a la derivada de la velocidad en la dirección vertical, siendo definido como sigue:

$$N = \frac{\rho_s \cdot \lambda^{1/2} \cdot D}{\mu} \cdot \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (2.4)$$

donde:

- N : Número de Bagnold
- ρ_s : Densidad de las partículas sólidas
- λ : Concentración lineal de sólidos
- D : Diámetro de las partículas sólidas
- μ : Viscosidad dinámica del fluido intersticial
- (du/dZ): Gradiente vertical de la velocidad

La concentración lineal de partícula, se define en función de la concentración volumétrica máxima y la concentración volumétrica de la mezcla como sigue:

$$\lambda = \left(\left(\frac{C_{vmax}}{C_v} \right)^{1/2} - 1 \right)^{-1} \quad (2.5)$$

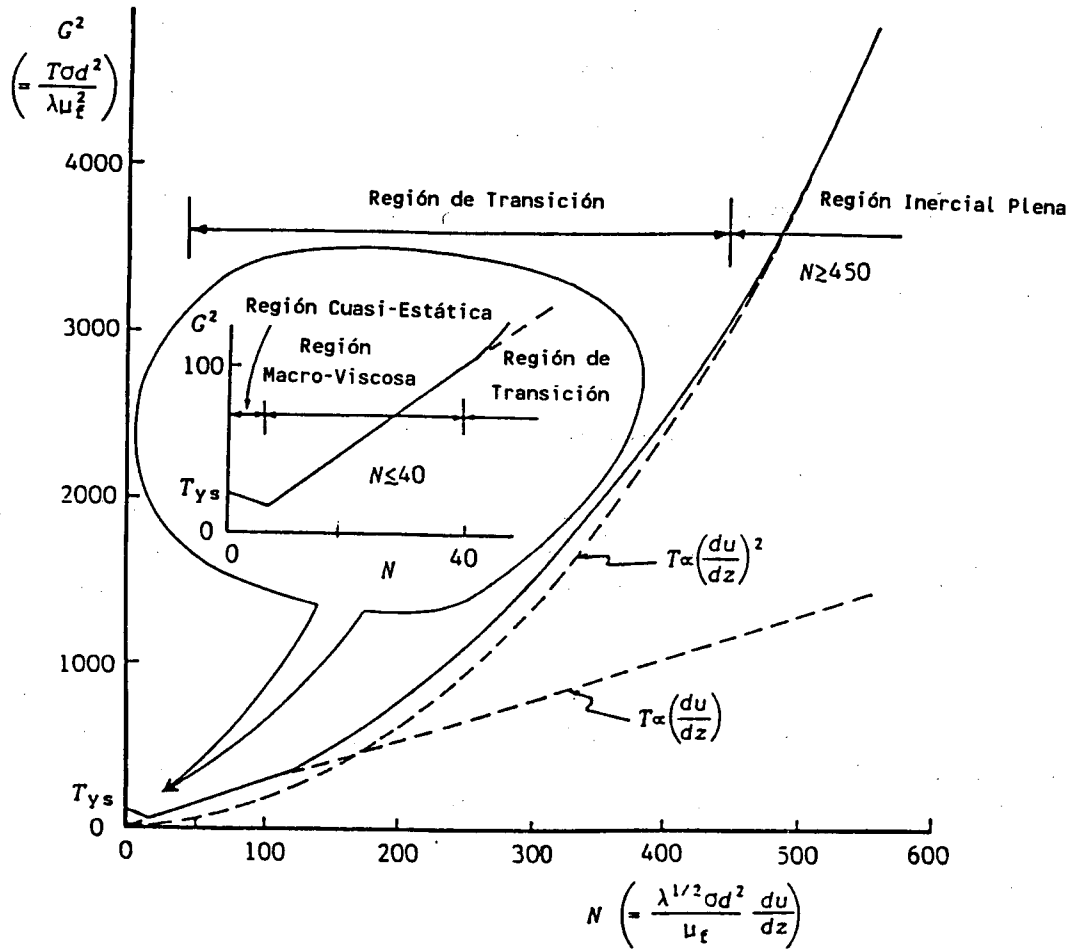


Fig 2.1 Relación Esfuerzo - Tasa de Deformación (Takahashi, 1991)

El parámetro adimensional de esfuerzo G^2 , se define en función del esfuerzo de corte total T (del fluido y de interacción de partículas sólidas) y de las propiedades del fluido y mezcla anteriormente detallados, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$G^2 = \frac{T \cdot \rho^2 \cdot D^2}{\lambda \cdot \mu^2} \quad (2.6)$$

La relación $G^2 = \phi(N)$ del gráfico de la Fig 2.1, permite clasificar las mezclas sólido-líquidas en los siguientes rangos:

Rango Cuasi - Estático	$N < 5$
Rango Macro - Viscoso	$5 < N < 40$
Rango de Transición	$40 < N < 450$
Rango Inercial Pleno	$N > 450$

Sólo en el rango macro-viscoso y zona inferior del rango de transición ($N < 120$), el fluido se comporta en forma newtoniana, es decir, con una relación esfuerzo-tasa de deformación lineal. En lo que resta del rango de transición y el rango inercial pleno ($N > 120$), el comportamiento mecánico se caracteriza por una relación esfuerzo-tasa de deformación no lineal que puede ser aproximada por una ley cuadrática.

El enfoque de Takahashi es uno de tantos que se han propuesto para caracterizar reológicamente este tipo de mezclas. Enos (1977), sin embargo, plantea la duda si acaso los ensayos experimentales y la teoría del flujo de pulpas en tuberías (de donde proviene gran parte del conocimiento actual del tema), es cuantitativamente extendible a flujos de detritos que incluyen también material granular grueso. Su contribución apunta a reunir y analizar antecedentes que permitan establecer las fronteras entre comportamientos laminares y turbulentos, aplicables a flujos de detritos con fines geológicos y aplicaciones prácticas. En el caso de fluidos newtonianos, existen criterios establecidos para distinguir uno y otro tipo de comportamiento sólo a partir del número de Reynolds. En los fluidos que se comportan como plásticos ideales, en cambio, la estabilidad del flujo depende también del número de Bingham y aparentemente de otros factores.

Bradley y Mc Cutcheons (1985), plantean que en atención a que los modelos del fluido newtoniano no toman adecuadamente en cuenta los efectos de cohesión y fricción entre partículas que colisionan, han sido diversos los modelos reológicos

propuestos para flujos de detritos, Entre ellos está el modelo pseudo-plástico o de la ley de potencia, y el modelo de Eyring aplicable principalmente a pulpas de sedimentos finos. El modelo de Takahashi, basado en la formulación de Bagnold es un modelo de fluido dilatante.

La viscosidad de mezclas sólidas líquidas ha sido también tema de numerosas investigaciones, partiendo del modelo de Einstein desarrollado para suspensiones diluidas:

$$\mu_d = \mu (1 + 2,5 c_v) \quad (2.7)$$

Para concentraciones superiores, pero que en todo caso no superan el 30%, Thomas, extendió la relación de Einstein haciéndola aplicable a partículas sólidas en el rango de tamaños de 0,1 a 20 micrones:

$$\mu_d = \mu (1 + 2,5C_v + 10,05c_v^2 + 0,062 \exp (\frac{1,875c_v}{1-1,595c_v})) \quad (2.8)$$

En esta expresión, una concentración límite de 30% conduce a una viscosidad de la mezcla equivalente a sólo 2,7 veces la del agua pura. Sin embargo, las estimaciones hechas por Whipple (1992) para flujos detríticos ocurridos en Black Canyon (Independence, California, EEUU), para concentraciones volumétricas entre el 66 y 74% llevan a una viscosidad de las mezclas, comprendidas entre 20.000 y 830.000 veces la del agua.

Costa (1988) plantea por su parte, que los flujos de detritos en general tienen viscosidades que superan largamente las 200 veces la del agua, con lo cual relaciones como las de Thomas verdaderamente no tendrían aplicación en los flujos de detritos.

2.5.2 Modelos Matemáticos y Relaciones de Cálculo

a) Clasificación Mecánica de los Flujos de Detritos

De acuerdo con los regímenes definidos por Takahashi (1991), previo a la formulación de modelos matemáticos que permitan describir el comportamiento mecánico de una corriente de detritos, resulta necesario establecer criterios para distinguir distintos tipos de flujo.

En el rango pleno plenamente inercial, el criterio de diferenciación lo constituye el parámetro δ :

$$\delta = \frac{\text{sen } \theta}{\rho_s/\rho - 1} = \frac{\text{sen } \theta}{s - 1} \quad (2.9)$$

donde θ es el ángulo de inclinación del lecho con respecto a la horizontal y si θ es pequeño, $\text{sen } \theta \approx \text{tg } \theta = i$, donde i es la pendiente.

Dependiendo del parámetro δ y de la profundidad relativa h/D , los flujos de detritos se dividen en las siguientes categorías:

Pedregosos	$\delta > 0.15$
Verticalmente Heterogéneos	$\delta < 0.15$
Flujos Turbulentos de Barro	
Flujos de Detritos Híbridos de Barro y Pedregosos	

Adoptando $s = 2.65$, los límites dados anteriormente para δ se transforman en límites aproximados de las pendientes del lecho siguientes:

$$\begin{array}{ll} \delta \geq 0.15 & i \geq 0.248 \\ \delta < 0.15 & i < 0.248 \end{array}$$

Con lo cual queda en claro que pendientes sobre el 25% aproximadamente tienden a generar flujos de detritos pedregosos. En todo caso, como se aprecia en la Fig 2.2, tanto este tipo de flujos como los verticalmente heterogéneos derivan hacia flujos híbridos barro-pedregosos y flujos de barro en la medida que h/D crece. En el rango de h/D de 10 a 100 se esperaría que los más frecuentes sean los flujos híbridos.

Para diferenciar los rangos plenamente inercial y macro-viscoso, Takahashi propone emplear las siguientes relaciones constitutivas.

$$G^2 = N \quad (2.10)$$

para el rango macro-viscoso,

$$G^2 = 0.020 N^2 \quad (2.11)$$

para el rango inercial pleno

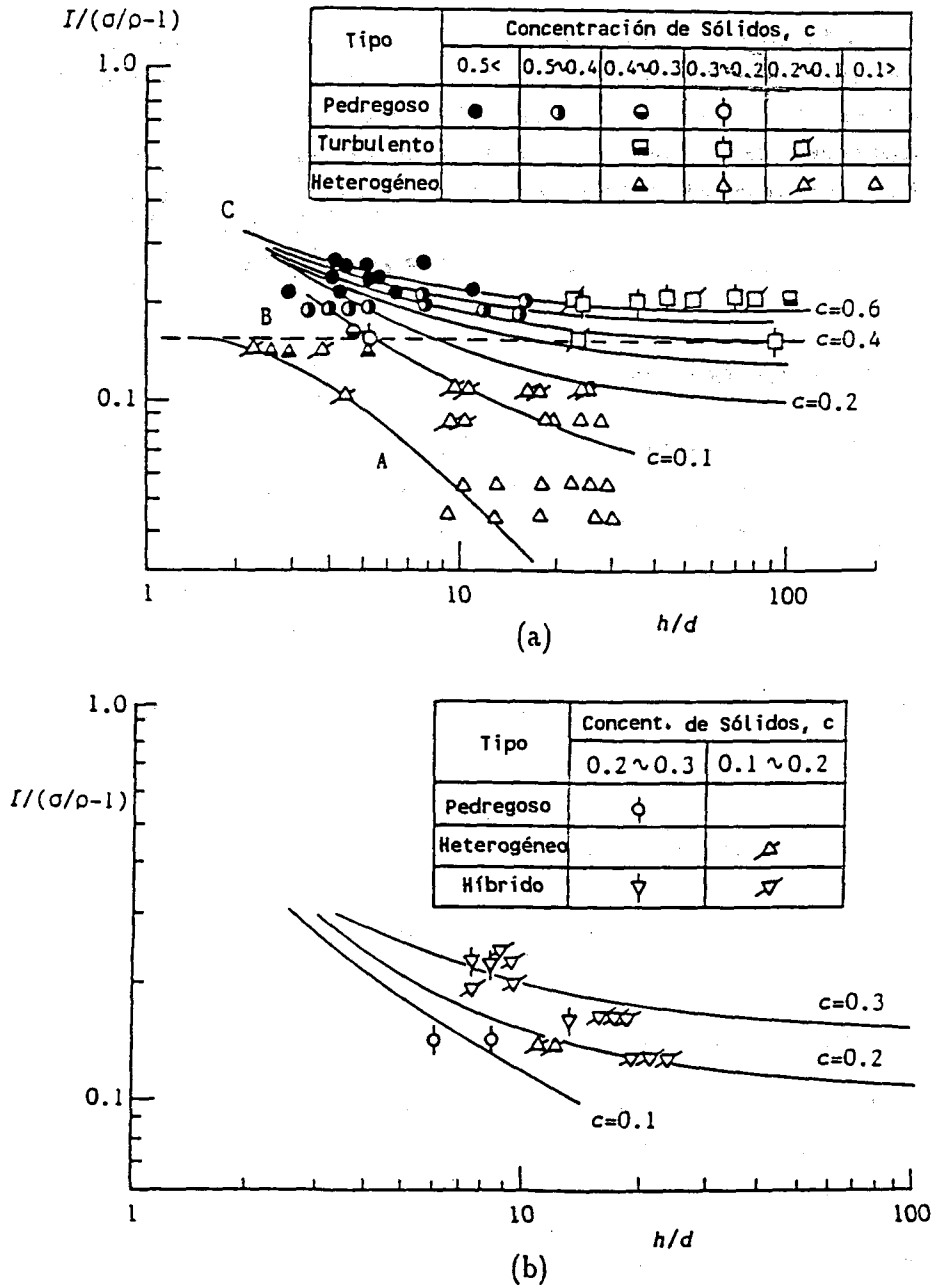


Fig 2.2 Clasificación Mecánica de Flujos de Detritos en el Rango Plenamente Inercial

b) Modelos Matemáticos

Takahashi (1991) presenta diversos modelos para describir el comportamiento hidráulico de las corrientes detríticas, aplicables a los rangos descritos anteriormente. Estos modelos se orientan a predecir distribuciones de velocidad, velocidades medias o equivalentemente leyes de pérdida de carga. A continuación se presentan algunas de las ecuaciones propuestas por este autor para describir la pérdida de carga, lo cual permite posteriormente compararlas con expresiones empíricas desarrolladas por otros investigadores a partir de observaciones realizadas a escala de prototipo.

b.1) Flujos de detritos pedregosos

Sobre la base de las ecuaciones del movimiento basadas en el modelo de fluido dilatante de Bagnold y ensayos experimentales, Takahashi ha desarrollado relaciones para determinar la pérdida de carga en casos en que el lecho es no-erosionable y erosionable.

En el caso de lecho rígido se supone que éste no ha alcanzado un grado de saturación de modo que la infiltración de agua hacia el lecho seco actúa como un factor reductor de la velocidad media. Para este caso, la relación deducida es:

$$\frac{U_d}{u_*} = \frac{2}{5} \left[\frac{1}{a \operatorname{sen} \alpha} \cdot \frac{\rho_d}{\rho_s} \right]^{1/2} \left[\left(\frac{C_{vmax}}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right] \cdot \left(\frac{h}{D} \right) \quad (2.12)$$

donde:

U_d = velocidad media de la corriente de detritos

u_* = velocidad de fricción = $\sqrt{gh \operatorname{sen} \theta}$

ρ_d = densidad de la mezcla

ρ_s = densidad de la partículas, sólidas

C_{vmax} = concentración volumétrica máxima de sólidos

C_v = concentración volumétrica de sólidos

h = altura de escurrimiento

D = diámetro del sedimento

El término $a \cdot \text{sen } \alpha$ está relacionado con el esfuerzo de corte total en la mezcla y el esfuerzo dispersivo de Bagnold:

$$\tau = -P \cdot \text{tg } \alpha \quad (2.13)$$

donde $\text{tg } \alpha$ depende de número de Bagnold N .

La información experimental disponible muestra que es necesario considerar $\text{tg } \alpha = 0.060$ y $a = 0.042$ para lograr con la ec. (2.12) un buen ajuste del modelo dilatante a los datos medidos.

Para el caso de un lecho erosionable a través del cual ya no se infiltra agua, y donde el efecto de choques entre partículas domina, se deduce una expresión más sencilla cuya forma es similar a la ecuación de Manning:

$$U_d = \left(\frac{2}{5} \cdot K_0 \right) h^{3/2} \cdot \text{sen } \theta^{1/2} \quad (2.14)$$

donde U_d se expresa en m/s, h en m y $K_0 = 5,4 \text{ m}^{-1/2} \text{ seg}^{-1}$ es una constante calibrada con datos canadienses y japoneses para caudales unitarios superiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y alturas de escurrimiento mayores que 1 m.

La ecuación de Manning para $n=0.090$ (adoptado) tiende a subestimar apreciablemente las alturas de escurrimiento hasta caudales unitarios menores de $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

b.2) Flujos de detritos verticalmente heterogéneos

Estos flujos tienen la característica que bajo un cierto límite de concentración, la acción que resulta de las colisiones interpartículas es insuficiente para dispersar las partículas sólidas en toda la profundidad de la sección. Ello trae como resultado que los sólidos tiendan a concentrarse en la zona más próxima al lecho, dando origen a una distribución no-homogénea de la concentración en la vertical. El límite de concentraciones ha sido obtenido en forma experimental, siendo igual a $0,4 c_{v\text{max}}$.

La pérdida de carga en estos flujos está dada por la expresión simplificada siguiente:

$$\frac{U_d}{u_*} = K_1 \cdot \left(\frac{h}{D} \right) \quad (2.15)$$

donde $K_1 = 0,4$ o $0,5$, según ensayos experimentales.

b.3) Flujos turbulentos de barro

La experiencia demuestra que incluso en flujos de detritos tipo de corrientes de barro, el contenido de arcilla es a menudo menor por lo cual el efecto de las fuerzas de origen electroquímico es depreciable. En atención a ello, el tamaño representativo del sedimento para la mezcla completa es de varios milímetros y en todo caso nunca inferior a décimas de milímetros.

En este tipo de flujo, la teoría desarrollada parte del supuesto que debido a lo anterior, el efecto dominante en la pérdida de carga de la corriente es el de los choques entre partículas sólidas, siendo de menor importancia el efecto de fricción interna por contacto interparticular. Por tal motivo, el esfuerzo cortante total se determina como la suma de esfuerzos turbulentos de Reynolds y de esfuerzos dispersivos de Bagnold, aceptando que la concentración es uniforme en la vertical, lo que permite deducir la siguiente ecuación de pérdida de carga:

$$\frac{U_d}{u_*} = \frac{1}{k} [\phi_1 - \phi_2 + \phi_3] \quad (2.16)$$

siendo k la constante de von Karman y los términos retantes definidos como sigue:

$$\phi_1 = \text{Ln} \left(\frac{1 + \phi_2}{Z_0 + \sqrt{Z_0^2 + \phi_3^2}} \right)$$

$$\phi_2 = \sqrt{1 + \phi_3^2}$$

$$\phi_3 = \left(\frac{\lambda}{k} \right) \cdot \left(\frac{D}{h} \right) \cdot \sqrt{a \text{ sen} \alpha \cdot (\rho_s / \rho_d)}$$

En estas expresiones para paredes hidrodinámicamente rugosas, se cumple:

$$Z_0 = \frac{1}{30} \left(\frac{k_s}{h} \right)$$

en tanto, para paredes hidrodinámicamente lisas:

$$Z_0 = \frac{1}{9} \frac{\nu}{u_* h} = \frac{1}{9} R_{e*}^{-1}$$

donde k_s representa la altura de aspereza del lecho, h la profundidad del flujo, ν la viscosidad cinemática del agua y R_{e*} es el número de Reynolds definido en la última expresión.

La ec. (2.16) permite determinar el comportamiento de una corriente de barro para diferentes concentraciones (función de λ) como transición entre corrientes de detritos pedregosas o verticalmente heterogéneas en concentración y los flujos turbulentos de agua de razones h/D grandes (100 o superiores).

La constante de von Karman de la mezcla altamente concentrada de sedimentos, depende de la concentración. Se ha encontrado que esta constante toma un valor cercano a 0,30 para concentraciones que superan el 30 a 40%.

b.4) Flujos híbrido pedregoso y de barro

Existen situaciones en las cuales en el seno de una corriente de detritos coexisten un fluido dilatante cerca del fondo y un fluido turbulento, menos concentrado, cerca de la superficie donde las partículas sólidas son movidas principalmente en suspensión. En estos casos, el problema principal es determinar el límite de separación de ambos fluidos ya que las ecuaciones que rigen para cada uno de ellos ya han sido presentadas.

c) Expresiones Empíricas

Las formulaciones teóricas propuestas, si bien tienen fundamentos mecánicos sólidos, adolecen del inconveniente que en general han sido verificadas principalmente en laboratorio bajo condiciones relativamente idealizadas.

Ello hace que su aplicación generalizada en la práctica pueda presentar restricciones difíciles de precisar ya que no todas las condiciones que limitan su uso, son conocidas o evaluables en forma sencilla o cierta. Por otro lado, el uso de conceptos y principios de la Mecánica a este tipo de fenómenos, ha alcanzado sólo en la última década un grado de desarrollo suficiente, de modo que las expresiones teóricas o semiempíricas propuestas son de data bastante reciente.

Es un hecho también, que mucho del conocimiento cualitativo y cuantitativo de los fenómenos de movimiento en masa proviene de observaciones in situ, realizadas aislada o sistemáticamente desde algún tiempo, de tal forma que se ha ido estableciendo una base de datos de prototipo, útil para desarrollar expresiones netamente empíricas de ciertos aspectos del fenómeno. No obstante carecer de la generalidad necesaria para aplicarlas indiscriminadamente a cualquier situación de interés, resultan bastante útiles para acotar magnitudes de ciertas variables especialmente cuando se requiere hacer evaluaciones preliminares de la magnitud de estas corrientes detríticas.

A continuación se presentan algunas relaciones de pérdida de carga que han sido desarrolladas y empleadas en diferentes países del mundo. Estas relaciones han sido recopiladas como parte de una revisión bibliográfica más amplia, razón por la cual es necesario tener presente que no constituyen una lista exhaustiva ni tampoco completa.

Yablonskiy et al. (1992) dan a conocer la siguiente fórmula propuesta en 1980 por el primero de estos autores que se emplea en regiones montañosas de Ucrania.

$$U_d = 6,06 \cdot R^{0,667} \cdot i^{0,25} \cdot \frac{(2,675 - \rho_{dmx})}{(2,454 - 0,798 \rho_{dmx})} \quad (2.17)$$

siendo:

U_d = Velocidad media de la corriente de detritos en m/s

R = Radio hidráulico en m

i = Pendiente del lecho en tanto por uno

ρ_{dmx} = Densidad máxima de la corriente de detritos en g/cm^3

$$\frac{\rho_{dmx}}{\rho} = 1 + c_{vmx} (s-1) \quad (2.18)$$

siendo ρ la densidad del agua, c_{vmx} la concentración volumétrica máxima de sólidos (estructura compacta) y s la densidad relativa de los sólidos.

El caudal total de la corrientes de detritos se calcula como:

$$Q_d^* = \frac{Q}{1 - C_{vmx}} \quad (2.19)$$

donde Q es el caudal de agua.

La experiencia ucraniana ha llevado a adoptar como valor del caudal total un 30% más del valor de Q_d calculado según la fórmula anterior, a fin de tomar en cuenta la naturaleza disgregable de los suelos:

$$Q_d = 1,30 \cdot Q_d^* \quad (2.20)$$

Pengcheng (1992) presenta la fórmula de Srinivi desarrollada en 1940 que ha sido utilizada también por Fleishman (1970) bajo la siguiente forma:

$$U_d = \sqrt{\frac{1 - C_v}{1 + C_v(S-1)}} \cdot U \quad (2.21)$$

donde U es la velocidad media de un flujo de agua de idénticas características a la de la corriente de barro, determinada de la fórmula de Manning:

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \quad (2.22)$$

en la cual n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

La Oficina de Planificación Municipal de Pekín utiliza una relación similar, modificando los exponentes de la fórmula de Manning:

$$U_d = K_2 \cdot \sqrt{\frac{1 - C_v}{1 + C_v(S-1)}} \cdot R^{2/3} i^{1/10} \quad (2.23)$$

donde K_2 varía entre 2 y 40 para lechos constituidos por fragmentos de roca y bolones en el rango de 1,2 a 2 m y gravas desde 1 cm hasta 8 cm. En general el exponente de i puede variar entre 1/2 y 1/10 dependiendo del tamaño del material del lecho y de su configuración topográfica, lo que hace que K_2 varíe entre 4 y 17,7.

Además de las relaciones anteriores, en China se han desarrollado fórmulas que toman en cuenta la viscosidad de la mezcla, como por ejemplo, la que se presenta a

continuación obtenida para corrientes de barro en la cuenca del Hunshui, río Daxing en Yunnan:

$$U_d = \left(\frac{\rho}{\rho_d}\right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_d}\right)^{0.1} \cdot U \quad (2.24)$$

donde μ y ρ son la viscosidad y densidad del agua y μ_d y ρ_d las de la mezcla sólido-líquida.

Para la cuenca del Jiangjia en Dongchuan, Provincia de Yunnan, se ha obtenido la relación dimensionalmente homogénea siguiente:

$$U_d = 25,38 \left(\frac{D}{R}\right)^{0.127} \cdot \left(\frac{\mu_d}{\rho_d \sqrt{gR^3}}\right)^{0.0576} \cdot \sqrt{gRI} \quad (2.25)$$

o su versión simplificada, teniendo en cuenta que el término de la viscosidad tiene poca influencia:

$$U_d = 26 \left(\frac{D}{R}\right)^{0.127} \sqrt{gRI} \quad (2.26)$$

donde D es el diámetro medio del sedimento que compone la corriente de detritos.

Pengcheng anota, sin embargo, que existen flujos lentos del tipo de reptación que ocurren en pequeñas cuencas, donde la viscosidad juega un papel importante. Señala por ejemplo que las fórmulas obtenidas para la cuenca de Maying, río Heisha en la provincia de Sichuan, son aplicables a este tipo de casos:

$$U_d = 2,77 \left(\frac{R}{D_{85}}\right)^{0.737} \left(\frac{\mu}{\mu_d}\right)^{0.42} \sqrt{RI} \quad (2.27)$$

$$U_d = 740 \left(\frac{\rho_d}{\mu_d}\right)^{1.4} R^{2.6} i^{0.5} \quad (2.28)$$

Las fórmulas para estimar la velocidad de una corriente de barro son, como se puede apreciar, bastante distintas para diferentes hoyas. Hay que tener presente además, que las corrientes de barro son esencialmente intermitentes (se desarrollan y decaen) y que por lo mismo, las ecuaciones propuestas reflejan sólo condiciones medias.

Como resultado de los numerosos estudios realizados con motivo de la erupción en 1980 del volcán Mount St Helens en EEUU, Pierson (1985) desarrolló la siguiente fórmula empírica:

$$U_d = 20,15 (R^{2/3} i^{1/2})^{0.73} \quad (2.29)$$

en la cual U_d se expresa en m/s, R es el radio hidráulico expresado en m e i es la pendiente.

Esta ecuación es aplicable a lahares con concentraciones volumétricas entre el 60 y 70%, con densidades del orden de 2 gr/cm^3 y flujos en el límite de una corriente de barro y corriente de detritos según la clasificación de Varnes (1978).

La relación que existe entre el volumen total de escorrentía de un flujo de detritos y el caudal total máximo de la corriente de detrito ha sido correlacionado para datos del volcán Sakurajima, del volcán Yake Dake y de corrientes ocurridas en British Colombia, Canadá. Si bien los datos muestran una importante dispersión, que puede ser indicativa de la influencia que tiene la forma del hidrograma, las condiciones del cauce, las varias características del flujo, etc., proveen de una relación aproximada para predecir el volumen total de escorrentía sin conocer los hidrogramas.

Sobre la base de ajustar una relación aproximada a los datos medidos, se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$V_e = 737 Q_d^{0.867} \quad (2.30)$$

$$V_{e_{\max}} = 1000 Q_d \quad (2.31)$$

donde V_e (m^3) es el volumen total de escorrentía de una corriente de detritos cuyo caudal máximo es Q_d (m^3/s). $V_{e_{\max}}$ es el volumen total obtenido de la regresión que tiende a limitar superiormente todas las observaciones.

CAPITULO 3

ANTECEDENTES SOBRE EL FENOMENO OCURRIDO

EL 18 DE JUNIO DE 1991 EN ANTOFAGASTA

3.1 Introducción

Los acontecimientos acaecidos el 18 de junio de 1991, como consecuencia de las corrientes de lodo y piedra que afectaron a la II Región y particularmente a la ciudad de Antofagasta, motivaron la realización de una serie de estudios orientados a abordar diversos aspectos del fenómeno ocurrido. Las condiciones meteorológicas, la evolución de los daños, la estimación de caudales y las recomendaciones que surgieron para aminorar los perjuicios que pudiesen causar futuros "aluviones" fueron algunos de los aspectos tratados en los diferentes estudios.

El presente capítulo tiene por objetivo sintetizar la recopilación hecha de los antecedentes aportados por los diversos estudios, así como presentar las metodologías empleadas, en ellas, para abordar y cuantificar el fenómeno en sus diversos aspectos.

3.2 Antecedentes sobre el Area de Estudio

3.2.1 Aspectos Generales

La Segunda Región se localiza en el extremo norte del país, entre los 20° 56' y 26° 05' de latitud sur, y entre el océano Pacífico y los 67° 00' de longitud Oeste. Abarca una superficie aproximada de 126.000 km² con una extensión litoral del orden de 500 km y un ancho continental promedio de 250 km desde la cordillera de Los Andes hasta la línea costera. Dentro de este marco se ubica la ciudad de Antofagasta, capital regional, sobre la cual se centra el presente estudio.

En la Fig 3.1 se presenta un esquema de la región con su principales ciudades.

3.2.2 Clima

El clima de la región, al igual que la mayoría de las características meteorológicas de ésta, es variable siguiendo una dirección oeste-este. En la zona costera la presencia del Anticiclón de Pacífico, provoca la existencia casi constante de abundantes altas a lo largo de todo el año, generándose un clima desértico con nublados abundantes.

Hacia el interior, en la zona de la Depresión Intermedia se desarrolla un clima de tipo desértico normal, caracterizado por fuertes oscilaciones térmicas diarias y carencia absoluta de precipitaciones, lo cual se traduce en aridez casi total y fuertes vientos.

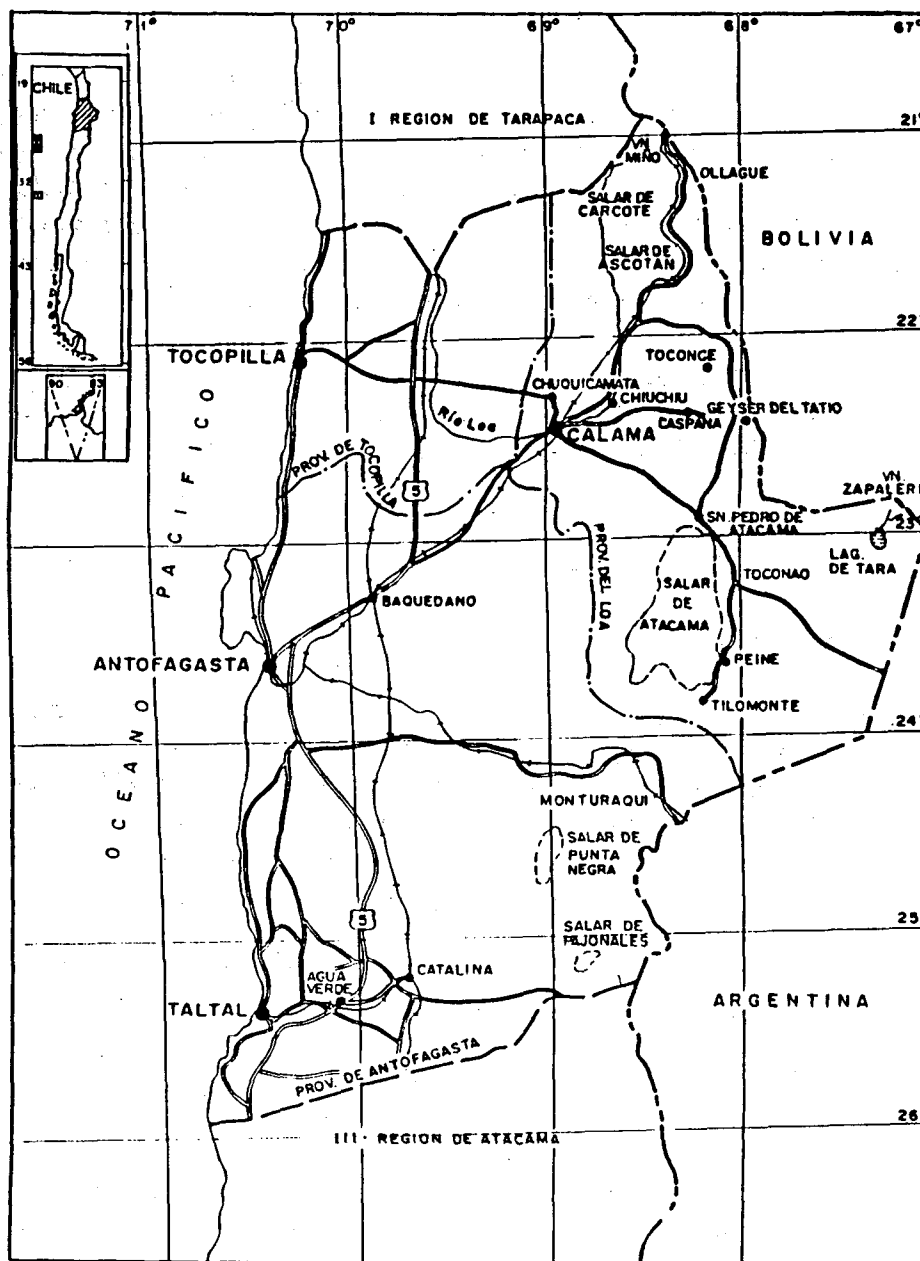


Fig 3.1 Plano de Ubicación General de la Zona de Estudio

Ya en la cordillera de Los Andes, sobre los 3.700 m.s.n.m se presenta un clima de estepa de altura, que se caracteriza por precipitaciones estivales y bajas temperaturas que alcanzan valores inferiores a 0°C.

3.2.3 Relieve

Al igual que el clima, el relieve presenta una notable variabilidad desde la costa hacia la cordillera de Los Andes.

Entre la línea de la costa y el macizo costero, se desarrolla la Planicie Costera que es una faja de territorio llano, y poco escarpado. Presenta una pendiente media cercana a los 22° en dirección a la Costa, con un ancho medio de 4 km, Su desarrollo longitudinal es ocasionalmente interrumpido por la intrusión de la cordillera de la Costa que cae abruptamente al mar a modo de acantilados.

La cordillera de La Costa, que se ubica inmediatamente al este de la Planicie Costera, es una barrera natural que incide fuertemente en las características climáticas de la región. Este cordón montañoso está formado básicamente por rocas basales. Sus mayores alturas se alcanzan en el tramo Antofagasta-Taltal con un valor medio de 1800 m.s.n.m, pero con cumbres que sobrepasan los 2500 m.s.n.m. Su ancho fluctúa entre los 40 y 80 km, con un valor medio de 55 km.

Más hacia el interior, existe una superficie muy irregular constituida por cerros bajos y áreas planiformes, conocidas como Depresión Intermedia, que tiene un ancho medio del orden de 45 km y que en su extensión abarca la Pampa del Tamarugal y el Desierto de Atacama.

A partir del margen oriental de la Depresión Intermedia se desarrolla una cadena montañosa conocida como cordillera del Medio o de Domeyko, con un ancho medio cercano a los 38 km cuyas alturas bordean los 5000 m.s.n.m.

Al este de la cordillera de Domeyko se encuentra una zona de depresión alta, de tipo altiplánico que posee numerosas cuencas interiores o cerradas y cuya área con drenaje abierto al océano Pacífico es la hoya del río Loa.

Por último, y abarcando hasta el límite con Argentina, se encuentra la cordillera de Los Andes con numerosos volcanes, aún activos, y con alturas que bordean los 6.000 m.s.n.m.

3.2.4 Antofagasta

La ciudad de Antofagasta se ubica sobre la planicie costera, en una zona relativamente estrecha que se expande hacia Mejillones y cuyo margen oriental limita con la cordillera de La Costa, la cual presenta aquí fuertes pendientes y grandes alturas.

En este sector, la planicie litoral es un plano inclinado de breve desarrollo que se extiende entre el nivel del mar y la cota 200 m.s.n.m. con un ancho promedio del orden de los 2,5 km. De acuerdo con su pendiente puede ser clasificada en tres sectores de mar a cordillera (Van Sint Jan et al. 1992):

- i) Desde el nivel del mar hasta los 25 m.s.n.m. (pendiente ~4%)
- ii) Desde los 25 m.s.n.m. hasta los 100 m.s.n.m. (pendiente ~9%)
- iii) Desde los 100 m.s.n.m. hasta los 200 m.s.n.m. (pendiente ~17% a 18%)

El farellón costero presenta pendientes que en general son superiores a los 45°

Este marco geográfico ha conducido a un desarrollo longitudinal de la ciudad, como resultado de lo cual son numerosas las quebradas que desembocan a lo largo de su extensión.

La aridez que presentan las cuencas y quebradas de la zona se traduce en una ausencia casi absoluta de vegetación que retenga u obstaculice el escurrimiento del agua y su capacidad para erosionar los suelos.

A lo anterior se agrega las fuertes pendientes que poseen las quebradas. Estas condiciones son favorables para la generación de fenómenos de movimiento en masa, que pueden ser gatillados por lluvias intensas. Prueba de ello es la estructura geológica sobre lo cual se encuentra cimentada Antofagasta, conformada en su gran mayoría por depósitos aluvionales que cubren la roca ígnea basal.

3.3 Estudios sobre la Tormenta y Corrientes de Detritos del 18 de Junio de 1991

3.3.1 Antecedentes Históricos

La ocurrencia histórica de corrientes de detritos en la II Región durante el presente siglo, ha quedado registrada a través de las crónicas periodísticas de la época. Esta información ha sido consignada por Araya (1992), Karzulovic et al. (1991) y Skorin Ingenieros (1991). En base a los antecedentes de estos estudios se hace a continuación una breve descripción de las tormentas más importantes, anteriores al

18 de junio de 1991, que han afectado la zona y que han producido algún tipo de movimiento en masa.

El 19 de Agosto de 1930 se produjo una "violentísima lluvia" que azotó la ciudad de Antofagasta registrándose una precipitación de 27,1 mm con una duración aproximada de 4,5 horas. Numerosas casas quedaron completamente inundadas y se produjo un "aluvión" causado por la presencia del temporal del ferrocarril que circula por la parte alta de la ciudad, el cual actuó a modo de "dique".

El 24 de Junio de 1940 se produjo una tormenta que afectó principalmente a las ciudades de Antofagasta y Tocopilla, siendo esta última la más afectada. Las precipitaciones alcanzaron 17 mm con una duración aproximada de 6 a 8 horas. En Antofagasta no se registraron mayores desgracias ni aluviones. Sólo la línea férrea sufrió cortes a causa de "aluviones". En Tocopilla, sin embargo, la situación fue grave. Se produjeron "avalanchas" por las quebradas El Salto y La Beneficiadora que arrasaron las viviendas a su paso. Como consecuencia de ello, 45 personas resultaron muertas, y no menos de 30 heridos. Los registros de la época consignan que una roca de 4 toneladas fue arrastrada una distancia de varios kilómetros.

El 23 de Mayo de 1982 se produjeron numerosos aluviones en las diversas quebradas del sector sur de la ciudad que cortaron en varias partes el camino a Coloso. En el sector de la quebrada El Huáscar, numerosas viviendas fueron inundadas hasta el nivel del antepecho de ventanas. Skorin Ingenieros (1991) señala que en dicha zona se estimó una magnitud de lluvia de 20 mm, siendo 5,5 mm, el máximo valor registrado en las estaciones de la ciudad. Se consigna una duración de 2 horas este evento.

El 7 de junio de 1984 se produjo un "aluvión" en Antofagasta proveniente de una cuenca superior el cual atravesó el poblado Baquedano llegando hasta la parte baja de Mantos Blancos.

El 28 de julio de 1987 la ciudad de Antofagasta estuvo expuesta una precipitación que alcanzó los 22,8 mm (Universidad del Norte) durante un período de aproximadamente 8 horas. Se produjeron numerosos cortes en la vía férrea. En la quebrada La Negra se estimó que escurrieron más de 200.000 m³ de agua y que el caudal máximo alcanzó los 16 m³/s (esta información proviene del informe de Skorin Ingenieros, no consignándose su origen).

En el informe de Araya (1992), se presenta un análisis más detallado sobre el aluvión de junio de 1940 que afectó a Tocopilla. Mediante el uso de la fórmula racional y suponiendo un coeficiente de escorrentía de 0.5, se hace una estimación de los caudales de escorrentía y de barro, para lo cual se supone una composición de 81% de agua y 19% de sólido (relación estimada a partir del volumen de escorrentía y del volumen de sólido removido de la ciudad). En la Tabla 3.1 se presentan estos resultados.

TABLA 3.1 CAUDALES DEL TEMPORAL DE 1940 EN TOCOPILLA SEGUN ARAYA (1992)

Quebrada	Q_{liq} m^3/s	Q_{tot} m^3/s
Despreciada	3,63	4,48
Barriles	29,80	36,80
Beneficiadora	0,87	1,07
El Salto	16,00	19,76

3.3.2 Características del Fenómeno del 18/06/91

a) Aspectos Meteorológicos

Este aspecto es abordado por Covarrubias et al. (1991), quienes describen los acontecimientos acaecidos como sigue "Durante la madrugada del día martes 18 de junio entre las 00:30 y las 3:30 hrs, la ciudad de Antofagasta se vio efectada por un temporal de lluvia y viento que alcanzó magnitudes de intensidad variable en el transcurso de dichas horas. Ráfagas de viento entre 45 y 55 km/hr, registradas a las 00:45 y 01:30 hrs, fueron los momentos más álgidos y violentos de este fenómeno climático".

Posteriormente describen la evolución de las precipitaciones durante la tormenta. Los autores señalan que cerca de las 00:00 hr la lluvia se manifestó como una simple neblina, a las 00:30 hr se transformó una garúa, en tanto que a las 01:00 hr, se había convertido en una lluvia registrándose 0,5 mm de agua caída. Para las 02:00 hrs las precipitaciones alcanzaban los 5 mm. Torrentes de agua y barro inundaban la ciudad y los primeros "aluviones" ya se habían manifestado. Aproximadamente a las 03:00 hrs, la lluvia tuvo un nuevo cambio de intensidad cesando cerca de las 03:30 hrs.

De acuerdo a lo expuesto por estos autores, el temporal fue el resultado de la presencia de un sistema frontal desarrollado por una masa de aire polar, más el efecto acumulativo de una corriente de "chorro de alturas", que se incorporó al fenómeno anterior. Por otra parte, la presencia de un viento tibio que sopló en dirección Norte - Sur, terminó por destruir la capa de inversión térmica, característica de la zona costera, lo cual permitió el ascenso de las masas de aire a niveles más altos, generándose nubes con un mayor desarrollo vertical, con lo que se incrementó su capacidad para producir precipitaciones.

b) Aspecto Hidrológicos e Hidráulicos

b.1) Precipitaciones

En la zona en estudio, se dispone de información pluviométrica correspondiente a las estaciones de la Universidad Católica del Norte (U.C.N), Cerro Moreno, Barrio Industrial (DGA) y Portezuelo aunque ésta última dejó de funcionar en 1968. No se cuenta con datos de pluviógrafos, lo que ha obligado a los diversos autores a estimar las intensidades de lluvia en forma aproximada en cada estación.

En relación a las precipitaciones observadas durante la tormenta (42 mm en la U.C.N, 14 mm en Cerro Moreno y 17 mm en la DGA), ellas presentaron diferencias que a juicio de Karzulovic et al. (1991), son producto de un error de medición. Sin embargo, Covarrubias et al. (1991) las atribuyen a un efecto de tipo orográfico, indicando que mientras Cerro Moreno se ubica en una planicie extensa, protegida hacia el poniente por los cerros del extremo sur de la península de Mejillones, y con una cordillera de La Costa con alturas máximas de 500 m.s.n.m, la estación UCN se localiza en plena ciudad donde la planicie es estrecha y la cordillera de La Costa presenta altura de 700 a 800 m.s.n.m. Sin embargo, el efecto orográfico, señalado por Covarrubias et al., no es capaz de explicar las diferencias detectadas entre pluviómetros de la DGA y la UCN, ambos ubicados en un entorno geográfico similar. Por otra parte, en el informe de Skorin Ingenieros (1991), la precipitación observada en la UCN fue contrastada con el agua acumulada en una piscina del sector, obteniéndose valores similares.

Tanto en el informe de Skorin Ingenieros (1991) como en el de Van Sint Jan et al. (1992), se determinó una precipitación efectiva considerando el efecto del viento, aunque por diferentes métodos. Ambos obtienen sin embargo, resultados similares, llegando a que la precipitación real en la UCN fue de 58 mm y de 54,6 mm, respectivamente.

b.2) Caudales

Las diferencias entre los caudales calculados por los diferentes autores, no sólo obedece a hipótesis de cálculo diferentes, sino también a los valores de precipitación utilizados. En el cuadro de la Tabla 3.2 se resume las hipótesis básicas planteados el cálculo del caudal y de la precipitación efectiva en los distintos informes revisados.

TABLA 3.2 HIPOTESIS DE CALCULO PARA LOS CAUDALES SEGUN DIVERSOS ESTUDIOS

AUTOR	CALCULO CAUDAL	CALCULO PRECIPITACION
Karzulovic	Fórmula Racional con coef. escorrentía $c=0.5$	Precipitaciones registradas en Estaciones Cerro Moreno y U.C.N. en forma separada
Covarrubias	$Q=V/ t \times 0.7$ V=volumen agua precipitada t=duración de la lluvia 3 horas 0.7 factor de escorrentía (30% infiltración)	Precipitaciones directas U.C.N
Van Sint Jan	No se presentan cálculos de caudales ni resultados de estos	Precipitaciones de las estaciones: Cerro Moreno, Barrio Industrial (DGA) y U.C.N, considerando el efecto del viento sobre la precipitación y un gradiente lineal (dirección N-S) de la lluvia=3.6 mm/km
Skorin Ingenieros	Se determinó el caudal suponiendo escurrimiento normal a las salidas de las quebradas en donde fue posible establecer los niveles de escurrimiento del aluvión ($n=0.035$ coef.de Manning) Como cálculo adicional se determina un coeficiente de escorrentía directa de la fórmula racional para cuencas. Se usa la precipitación y el caudal calculado.	Se usó una precipitación registrada por el autor. Se justifica a través de la determinación de la precipitación real sobre la estación U.C.N al considerar el factor viento, llegando a valores similares a los registrados por ellos.

En la Tabla 3.3 se indica los caudales obtenidos por los diferentes autores, de acuerdo con la hipótesis de cálculo indicados en la Tabla 3.2

TABLA 3.3 CAUDALES ESTIMADOS EN LOS DIFERENTES ESTUDIOS

Quebrada	Caudales (m ³ /s)			
	Covarrubias Q_{liq}	Karzulovic Q_{total} Q_{liq}		Skorin Q_{total}
La Chimba	48.0	29.4	18.5	
Valdivieso	4.6			
Club Hípico				2.34
Bonilla Norte		10.0*	6.3	1.38
Bonilla Sur				2.80
Farellones				8.26
Salar del Carmen	63.2	38.7	24.4	46.18
La Cadena	42.8	26.2	16.5	19.57
El Ancla Norte	2.7*	1.3*	0.8*	0.33
El Ancla Sur				3.58
Riquelme				0.82
Baquedano	6.8	1.3	0.5	2.50
Uribe				1.38
El Toro		4.4	1.6	3.38
Caliche Norte				0.46
Caliche Sur				0.71
La Negra	1378.0	110.8	4.1	47.59
U. de Antofagasta				0.58
Jardines del Sur	23.4	11.0	4.1	27.32
El Huáscar				3.05

* El caudal corresponde a la cuenca completa.

Como se observa existen considerables diferencias entre los resultados de uno u otro autor. Los valores de Covarrubias et al. en general, tienden a ser mayores, a pesar que sus caudales representan sólo un valor medio que además corresponde sólo a la parte líquida del flujo. Ello se explica por el alto valor del coeficiente de escorrentía empleado en el cálculo (0,7).

En el caso de Salar del Carmen, La Cadena y El Toro, los caudales totales estimados por Skorin y Karzulovic et al. son similares no obstante haberse empleado parámetros de cálculo y metodologías diferentes.

En el informe de Skorin Ingenieros, el cálculo de los caudales se basa en las trazas de las corrientes medidas en distintas secciones de las quebradas. Sobre la base de los caudales determinados empleando la fórmula de Manning con un coeficiente de rugosidad único igual a 0.035, y empleando una distribución espacial de la lluvia que conduce a un aumento de la precipitación de norte a sur de la ciudad. Se realiza además una estimación de los coeficientes de escorrentía en cada cuenca. Sus resultados se han resumido en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4 COEFICIENTES DE ESCORRENTIA SEGUN SKORIN INGENIEROS (1991)

Quebrada	Coefficiente de Escorrentía
Club Hípico	0.326
Bonilla Norte	0.148
Bonilla Sur	0.300
Farellones	0.833
Salar del Carmen	0.462
La Cadena	0.185
El Ancla Norte	1.011
El Ancla Sur	0.648
Riquelme	1.001
Baquedano	0.975
Uribe	0.621
El Toro	0.225
Caliche Norte	0.565
Caliche Sur	0.074
La Negra	0.003
U. de Antofagasta	0.089
Jardines del Sur	0.512
El Huáscar	0.203

En esta tabla puede apreciarse que algunos coeficientes resultan extremadamente altos (incluso mayores que 1.0) o bajos. En el caso de La Negra, por ejemplo, ello se debe a que el cálculo se efectuó tomando como área la superficie total de la cuenca, sin considerar que su tiempo de concentración era mayor que la duración de la tormenta.

b.3) Otras Características de las Corrientes

La mayoría de las quebradas que que desagüan a través de la ciudad de Antofagasta, descargaron abundante material sólido en las principales avenidas de la

ciudad. Las estimaciones hechas por Skorin Ingenieros (1991) y Karzulovic et al.(1991) sitúan este valor en unos 400.000 m³ de material removido de las calles. Esta cifra según el segundo estudio, se elevaría hasta unos 700.000 m³, al considerar el material que sedimentó en los sitios eriazos y otras áreas no viales. En base a estos antecedentes se estimó la concentración media de los aluviones, expresada como la razón entre el volumen de sólido y el volumen de escorrentía. En el estudio de Skorin Ingenieros, también se determina la concentración de sólidos, pero en sus cálculos se utiliza el volumen total de agua caída, no siendo considerada la infiltración. Los resultados de ambos estudios se sintetizan en la Tabla 3.5

TABLA 3.5 ESTIMACIONES DE LA CONCENTRACION DE SOLIDOS EN VOLUMEN

AUTOR	COMPOSICION ALUVION	OBSERVACION
Karzulovic	63% Agua 37% Sólidos	Precipitación Cerro Moreno
	79% Agua 21% Sólidos	Precipitación U.C.N
Skorin Ingenieros	60% Agua 40% Sólido	(No se considera Quebrada La Negra)

Covarrubias et al. (1991) y Araya (1992) hacen una descripción visual del material aluvional, destacando que su composición es principalmente a base de material fino (ceniza volcánica), y que sólo en forma esporádica se observó la presencia de gravas y gravillas. Bolones y material grueso sólo se observaron en las quebradas Baquedano, La Chimba, Salar del Carmen y El Ancla; sin embargo, se estima que éstos provenían de ripieras existentes en el lugar. Otra excepción la constituye la quebrada La Negra, a la altura de las vertientes, donde se observó material grueso y bloques, posiblemente proveniente de obras de mampostería.

Por otra parte, Van Sint Jan et al. (1992) estimaron que el material grueso que el aluvión arrastró inicialmente, sedimentó al alcanzar la salida de la zona montañosa, donde las pendientes son menores.

Karzulovic et al. (1991) califican este aluvión como atípico, principalmente por su composición a base de materiales finos, pues en general según ellos estos se

caracterizan por transportar enormes bloques y muchos bolones. Además señalan que la razón entre el volumen de agua y el de sólidos fue alta (3:2) en contraste con lo observado en los aluviones clásicos (1:3 a 1:4). Por último se hace notar que el rango de velocidad de avance estuvo entre los 15 y 30 km/hr, mientras que los aluviones típicos suelen moverse a velocidades que fluctúan entre los 40 y 120 km/hr. En este informe no se explica qué se entiende por "aluviones clásicos" o "típicos".

c) Consecuencias y Daños

Dada la gravedad de los sucesos ocurridos el 18 de junio de 1991, todos los autores presentan información, con mayor o menor grado de detalle, sobre las pérdidas de vidas humanas y perjuicios materiales que ocasionaron las corrientes de barro que afectaron la ciudad de Antofagasta.

Los datos consignados en el informe de Van Sint Jan (1992), indican que hubo 101 víctimas fatales, 4.737 viviendas dañadas (402 completamente destruidas), afectando a más de 21.000 personas.

En el informe de Karzulovic et al. (1991), se presenta una tabla con las diferentes quebradas donde se produjeron las corrientes. En ella se indican los perjuicios y daños calificándolos como: "muy importantes", "importantes", "menores" y "sin consecuencia", pero no se explica mayormente la naturaleza de ellos. Un análisis más detallado lo realizan Covarrubias et al. (1991), quienes describen los perjuicios provocados en las principales quebradas. Esta última información se ha reproducido en la Tabla 3.6.

Covarrubias et al. además analizan el efecto que tuvo la rotura de matrices de agua potable. A su juicio en la quebrada Baquedano este hecho tuvo graves consecuencias, pues se produjeron nuevos deslizamientos de tierra. Sin embargo, los autores concluyen, que en términos del caudal, el aporte de agua producto de la rotura de las tuberías fue despreciable.

En el informe de Van Sint Jan et al. (1992) se hace también una detallada descripción de los daños que se produjeron en cada quebrada. Según estiman los autores, los mayores daños fueron producidos en las quebradas Salar del Carmen y La Cadena:

Salar del Carmen

- + Socavación en varios sectores del camino de acceso a Antofagasta.
- + Destrucción de la aducción de agua potable que une la planta de filtro y la ciudad.

**TABLA 3.6 RESUMEN DE DAÑOS PROVOCADOS POR
LAS PRINCIPALES QUEBRADAS
(según Covarrubias et al. 1991)**

NOMBRE QUEBRADA	SUPERF. (Km2)	OBSERVACIONES	PENDIENTE MEDIA CURSO PRINCIPAL (%)
La Chimba	24.7	No afectó a zonas pobladas, sólo provocó inundación de caminos y daños en ripiera cercana a desembocadura.	11.8 (desembocadura)
Bonilla (incluye Q. Valdivieso)	8.4 (1.7)	Daños materiales a población Valdivieso, llegando su acción en forma reducida hasta población Bonilla.	17.5 (-)
Salar del Carmen	32.5	Principal causante de daños materiales y muertes, con efectos que llegaron incluso hasta Av. Costanera.	8.0 (curso inferior)
La Cadena	22.0	Principal causante de daños materiales y muertes en el sector de pobl. El Salto.	11.5 (curso inferior)
El Ancla	1.1	Afectó a la infraestructura existente en sectores más cercanos, produciendo graves daños en algunas viviendas.	12.1
Baquedano	1.1	Provoca graves daños materiales y muertes, llegando incluso a afectar hasta calle Balmaceda.	40.0 (descarga)
El Toro	3.7	Graves daños materiales, especialmente en Cuartel Nº2 de Regimiento Esmeralda. Su efecto llegó hasta Av. Angamos.	13.3
Carrizo o La Negra	2480.0	Graves daños materiales, especialmente en acceso sur de Antofagasta, vía de ferrocarril y est. Los Héroes en la costa.	2.2 (curso inferior)
Jardín del Sur	9.2	Graves daños en viviendas de un sector de la pobl. Su efecto llegó hasta Av. Costanera.	16.7 (descarga)

- + Daños serios en los pasajes Celta, Castro, Tres Marías y Aurora Boreal.
- + Erosión grave en la intersección entre Zegers y la Av. Circunvalación.
- + Socavamiento de las veredas de la Av. Salar del Carmen.

La Cadena

- + Se produjo socavación, con profundidad de hasta 4 m, en la población El Salto.
- + Destrucción de todas las construcciones que se encontraban en su lecho.
- + Destrucción de 7 u 8 casas en la población Ferro-Baquedano.
- + Daños serios en las instalaciones de EDELNOR.
- + Inundación de las bodegas y talleres de FCAB.

3.3.3 Recomendaciones Principales de los Estudios

La mayoría de los autores coinciden en la necesidad de implementar un sistema que permita anticiparse a futuros aluviones, en especial si se considera que precipitaciones importantes deberían producirse al menos cada 5 años, según han estimado Covarrubias et al. (1991).

A este respecto Araya (1991) sugiere establecer un sistema de "alerta interciudades", en consideración a que los frentes de mal tiempo se desplazan de sur a norte.

Tanto en los informes de Araya (1991), como Karzulovic et al. (1991), se recomienda la construcción de obras de protección para el sistema de agua potable y se sugiere la construcción de drenajes en las obras que eventualmente pudiesen represar los flujos de las quebradas. Además Karzulovic et al. recomienda impedir la construcción en los cauces de éstas.

La limpieza y remoción de escombros y bloques depositados en las laderas de los cerros, la implementación de una "política verde" para la plantación de árboles y la generación de una cubierta vegetal, son algunas de las recomendaciones entregadas por Araya (1991). Este autor además plantea la necesidad de mejorar la distribución de las estaciones meteorológicas, así como, reponer y mantener las ya existentes, de tal manera que a futuro se cuente con registros meteorológicos fidedignos y confiables.

En último término, una propuesta más detallada, para aminorar los daños de futuros movimientos en masa, es presentado por Skorin Ingenieros (1991), quienes sugieren la construcción de "Vías Aluvionales" mediante las cuales se conseguiría encauzar futuras corrientes de barro, con el fin de descargar en forma expedita y rápida el material sólido al mar. La materialización de esta solución requiere de la

construcción de diversas obras a la salida de las quebradas, y modificar las rasantes de ciertas calles para lograr una "capacidad hidráulica" de las mismas, acorde con los caudales detríticos a evacuar.

3.4 Recopilación de Antecedentes Básicos

Para el desarrollo del presente informe ha sido necesario llevar a cabo una recopilación de antecedentes básicos, cuyo catastro se resume en este capítulo. Estos antecedentes abarcan los siguientes campos o áreas:

Cartografía

Aerofotogrametría

Meteorología

Campaña de Terreno

Topografía

Granulometría

Fotografía y video

3.4.1 Cartografía

En este aspecto se contó con planchetas del Instituto Geográfico Militar de la zona de Antofagasta y aledañas, en escala 1:50.000 y 1:250.000. A partir de esta información se confeccionaron 2 planos topográficos (Cap. 6) donde se definieron las cuencas y algunas de sus principales características (área y pendiente media).

Plano 1: Sector de Antofagasta
Escala : 1:50.000
Cuencas: La Chimba, Rocas, Club Hípico, Bonilla, Farellones, Salar del Carmen, La Cadena, El Ancla, El Toro, Caliche, La Negra, Jardines del Sur, El Huáscar, Riquelme, Baquedano, Uribe y Universidad de Antofagasta .

Plano 2: Sector de Antofagasta
Escala : 1:250.000
Cuencas: Sobre Grande, El Guay, Remiendo, Grande, Intermedia.

3.4.2 Aerofotogrametría

Como apoyo al estudio geológico, se contó con un conjunto de fotos aéreas tomadas antes y después del aluvión acaecido en Antofagasta. A través de ellas se hizo un estudio de la geología superficial de la zona, estableciéndose a grandes rasgos la composición de las quebradas. Además se pudo contrastar algunos de los cambios producidos por los aluviones en las distintas quebradas, pudiendo definirse zonas de erosión y depositación del material aluvional, así como algunos de los daños que se produjeron.

El material fotográfico disponible lo conforman 2 conjuntos de fotos. El primero corresponde al vuelo SAF-81 realizado el 5 de Junio de 1981 y el segundo al vuelo IGM-92 realizado el 7 de Enero de 1992. Este último vuelo fue contratado por la Intendencia de la II Región.

En la tablas 3.7 y 3.8, se muestran las líneas vuelos (paralela a la costa) y las fotografías que de ellas se utilizaron.

TABLA 3.7 LINEAS DE VUELO

IGM - 92
Zona : II Región
Fecha : 07-01-92
Escala: 1:20.000

Línea de Vuelo	Fotografías	
	Desde	Hasta
1	5010	5017
2	5030	5039
3	5055	5067
4	5090	5100

TABLA 3.8 LINEAS DE VUELO

SAF - 81
 Zona : II Región
 Fecha : 05-06-81
 Escala: 1:30.000

Línea de Vuelo	Fotografías	
	Desde	Hasta
O	23558	23567
B	23647	23652
C	23685	23691
D	23737	23740

Además de estos elementos, se utilizó una Ortofoto (escala 1:25.000) de Antofagasta.

3.4.3 Antecedentes Meteorológicos

Los antecedentes meteorológicos son útiles en dos aspectos que fueron desarrollados en el presente estudio. El primero consiste en el análisis y entendimiento del fenómeno climático que dio origen a las intensas precipitaciones del 18 de junio de 1991, para lo cual se utilizó la siguiente información:

Datos de Temperatura, Presión, Velocidad del viento y Precipitación, registrados en estaciones de superficie.

Datos de Temperatura, Presión, Velocidad del viento y humedad relativa, obtenidos del radiosonda de Cerro Moreno, correspondiente a los días 15, 16, 17, 18, 19 y 20 de junio de 1991.

Cartas sinópticas de superficie y de 500 hPa correspondiente al mes de junio de 1991 (DMC).

Cartas de Tropopausa y viento máximo de los días 16, 17 y 18 de junio de 1991.

Imágenes satelitales de baja y alta resolución de los satélites:

- i) GOES (sensor VISSR): imágenes infrarrojo (DMC)
- ii) NOAA (sensor AVMRR): imágenes visibles e infrarrojo termal (CEE de U. de Chile)

El segundo aspecto corresponde al análisis hidrológico del fenómeno, donde se utilizó principalmente la información pluviométrica disponible en la zona de estudio, la cual desafortunadamente es escasa, tanto por la baja cobertura espacial como por las discontinuidades o poca extensión que presentan sus registros.

En la tabla 3.9 se presentan las estaciones pluviométricas de la zona, cuyos registros de precipitación mensual se incluyen en el anexo correspondiente.

TABLA 3.9 ESTACIONES METEOROLOGICAS

ESTACION	LAT.	LONG.	ALTURA (m. s. n. m)
Tocopilla	22°06'	70°13'	16
Coya Sur	22°24'	69°39'	1290
Quillagua	21°37'	69°32'	802
Cerro Moreno	23°26'	70°28'	110
Portezuelo			
DGA Antofagasta	23°36'	70°23'	50
U. Católica del Norte	23°10'	70°24'	7
Taltal	25°25'	70°34'	30
Taltal	25°28'	70°34'	8
Catalina	25°13'	69°43'	2180

3.4.4 Campaña de Terreno

a) Topografía

Un levantamiento topográfico fue realizado en algunos tramos de las quebradas más importantes desde el punto de vista del riesgo de aluviones. El levantamiento consistió en perfiles longitudinales y transversales de sectores del cauce de las quebradas, junto con la medición de los posibles ejes hidráulicos de los aluviones, cuyas trazas quedaron en las riberas de los cauces. El estudio comprendió las siguientes quebradas: Salar del Carmen N°2, El Toro, La Cadena, La Negra, Del Guay, De Mateo, El Ancla y Caracoles o Salar del Carmen.

En la tabla 3.10 se presenta la zona y posición aproximada de los levantamientos topográficos. Además se muestra los diagramas unifilares de algunas de las quebradas (Fig 3.2, 3.3 y 3.4), para una mejor comprensión de la zona.

b) Características Hidráulicas

En base a estos antecedentes topográficos y a las trazas de los ejes hidráulicos medidos, se han determinado algunas de las características hidráulicas, a nivel de valores medios, de cada uno de los sectores de las quebradas consideradas (Tabla 3.11). Estos valores son los siguientes: área (A), radio hidráulico (R), perímetro mojado (X), pendiente (i) y longitud superficial (l).

Adicionalmente se cuenta con la información topográfica que consta en el informe de Skorin Ingenieros (1991) quienes determinaron, a partir de ella, las principales características hidráulicas de dos o más secciones de las diversas quebradas en estudio (Tabla 3.12).

**TABLA 3.10 PERFILES TOPOGRAFICOS
DEFINIDOS POR LA D.G.A.**

Nombre del Perfil	Posicion Aproximada		COMENTARIO
	N	E	
El Toro	7381800	358300	
La Negra en Vertientes			
La Negra Sec. Terminal 1	7378800	357600	
La Negra Sec. Terminal 2	7378750	356250	A continuacion del perfil anterior
El Ancla			
Salar del Carmen N2	7386300	362100	Q. afluente a Salr del Carmen
Salar del Carmen Afluente 1			Ver diagrama unifilar
Salar del Carmen Afluente 2			Ver diagrama unifilar
Salar del Carmen Sector Alto			Ver diagrama unifilar
Salar del Carmen N2-B			Ver diagrama unifilar
Caracoles o Sal. del Carmen	7386700	361750	Aguas arriba aduccion Toconce
La Cadena Sector Alto			Ver diagrama unifilar
Aguas arriba Afluente N1			Ver diagrama unifilar
Afluente N1			Ver diagrama unifilar
Afluente N2			Ver diagrama unifilar
Afluente N3			Ver diagrama unifilar
Afluente N4			Ver diagrama unifilar
Del Guay			Ver diagrama unifilar
De Mateo	7363000	36700	1 km aguas arriba de INACESA
De Mateo ag. arr. Del Guay			Ver diagrama unifilar
De Mateo ag. aba. Del Guay			Ver diagrama unifilar

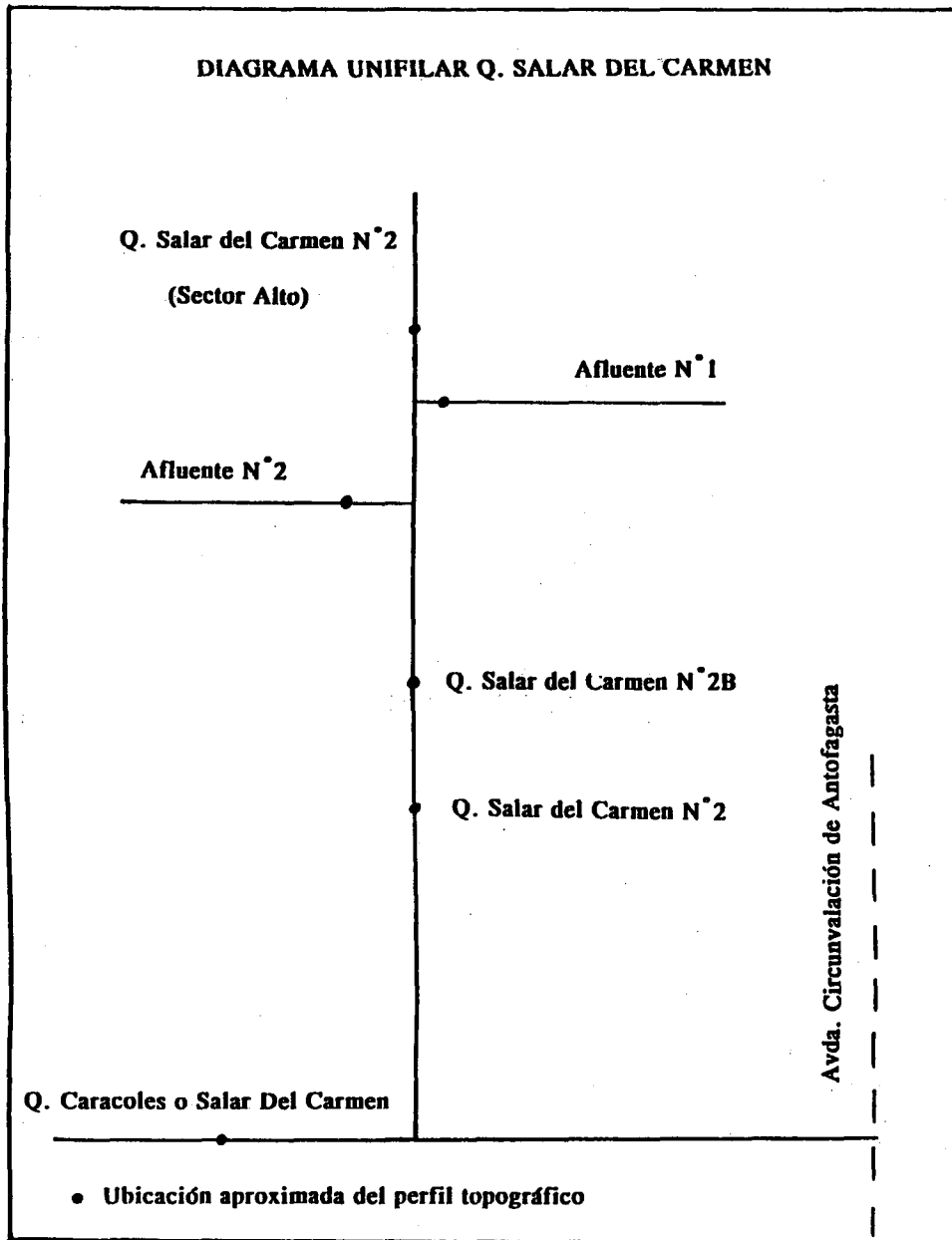


Fig 3.2 Diagrama unifilar de la quebrada Salar del Carmen

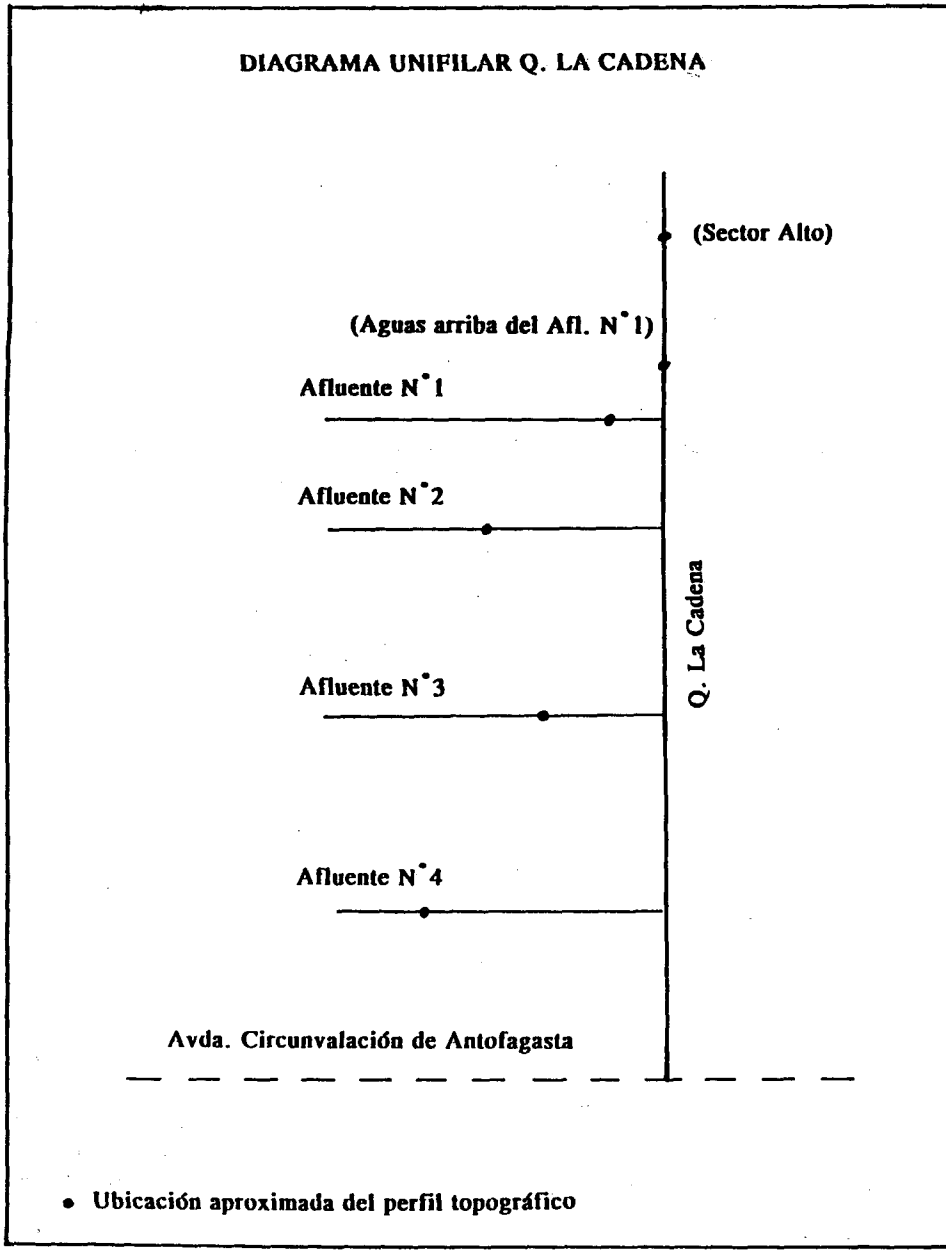


Fig 3.3 Diagrama unifilar de la quebrada La Cadena

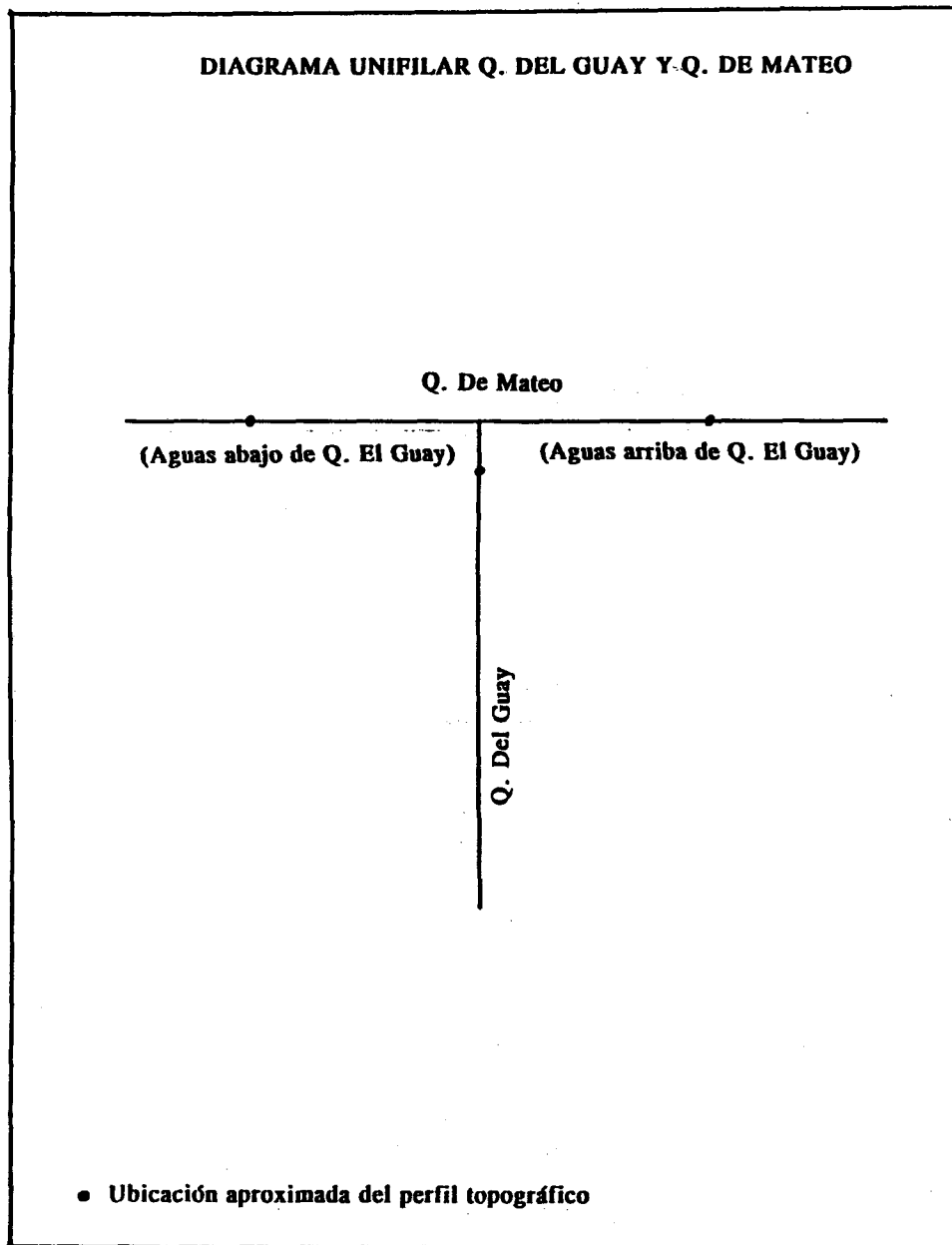


Fig 3.4 Diagrama unifilar de la junta entre quebradas Del Guay y De Mateo

TABLA 3.11
GEOMETRIA HIDRAULICA DE LAS QUEBRADAS DE ANTOFAGASTA
DATOS DE LA DGA (1992)

NOMBRE DEL PERFIL LONGITUDINAL	S (m ²)	R (m)	X (m)	l (m)	i
El Toro	12.41	0.88	14.16	12.52	0.09
La Negra en Vertientes	16.86	0.42	40.39	39.70	0.03
La Negra Sec. Terminal 1	20.82	0.66	31.17	30.33	0.05
La Negra Sec. Terminal 2	27.31	0.86	32.70	31.70	0.05
El Ancla	20.78	1.16	15.87	16.50	0.16
Salar del Carmen N2	6.31	0.33	18.99	18.49	0.07
Salar del Carmen Afluente 1	10.32	0.42	25.23	24.62	0.09
Salar del Carmen Afluente 2	5.87	0.34	17.52	16.96	0.12
Salar del Carmen Sector Alto	17.45	0.70	25.15	24.47	0.09
Salar del Carmen N2-B	19.36	0.91	21.41	20.08	0.07
Caracoles o Sal. del Carmen	13.21	0.28	48.00	47.67	0.08
La Cadena Sector Alto	25.98	0.65	40.47	39.60	0.07
Aguas arriba Afluente N1	21.50	1.13	22.57	20.85	0.07
Afluente N1	27.86	1.05	26.72	25.44	0.08
Afluente N2	10.75	0.70	15.44	14.39	0.05
Afluente N3	11.87	0.82	14.68	13.57	0.10
Afluente N4	14.75	0.85	17.31	16.00	0.11
Del Guay	5.26	0.36	14.71	14.24	0.03
De Mateo	9.39	0.23	41.43	42.09	0.01
De Mateo (ag. ar. Del Guay)	14.69	0.47	31.11	30.39	0.01
De Mateo (ag. ab. Del Guay)	20.02	0.45	44.97	44.37	0.01

S: Area de escurrimiento

R: Radio Hidraulico

X: Perimetro mojado

l: Ancho superficial

i: Pendiente del fondo

**TABLA 3.12 CARACTERISTICAS HIDRAULICAS
(Según Skorin Ingenieros 1991)**

Quebrada	Seccion	Tipo de Material	S (m ²)	R (m)	X (m)	I (m)	i
Club Hípico	1	S	1.87	0.31	6.1	5.5	0.07
	2	G-S	3.00	0.26	11.7	11.1	0.06
	3	S	4.56	0.27	16.9	16.3	0.06
Bonilla Norte	1	S	0.64	0.24	2.7	2.2	0.18
	2	S-g	0.97	0.19	5.0	4.6	0.08
	3	S	1.57	0.17	9.4	9.0	0.07
Bonilla Sur	1	g-S	1.93	0.12	15.6	15.4	0.08
	2	g	2.15	0.10	21.7	21.5	0.08
Farellones	1	g-R	3.25	0.43	7.5	6.6	0.07
	2	g	6.60	0.38	17.3	16.5	0.06
	3	S-g	7.46	0.34	22.0	21.3	0.06
Salar del Carmen	1	S	9.00	0.21	43.2	42.8	0.10
	2	g	3.70	0.13	28.7	28.5	0.08
	3	g	9.78	0.21	47.5	47.1	0.06
La Cadena	1	g	10.30	0.21	48.4	47.9	0.07
	2	g	9.32	0.34	27.2	26.5	0.06
	3	g	7.55	0.44	17.1	16.2	0.09
El Ancla Norte	1	g-R	0.38	0.18	2.1	1.7	0.15
	2	g	0.42	0.19	2.2	1.8	0.13
	3	g-R	0.71	0.16	4.4	4.0	0.09
El Ancla Sur	1	R	1.31	0.16	8.3	8.0	0.13
	2	R-g	1.08	0.17	6.2	5.9	0.16
	3	R-g	1.43	0.21	6.7	6.3	0.14
Riquelme	1	g	0.93	0.13	7.2	6.9	0.12
	2	g	0.83	0.14	6.0	5.7	0.10
	3	g	1.10	0.16	7.1	6.8	0.08
Baquedano	1	S	2.03	0.26	7.8	7.2	0.12
	2	S	2.88	0.23	12.5	12.0	0.12
Uribe	1	g-P	2.10	0.15	13.6	13.3	0.04
	2	g-R	2.26	0.19	11.9	11.5	0.08
	3	g	2.90	0.14	21.3	21.1	0.16
El Toro	1	S	0.95	0.25	3.8	3.3	0.11
	2	S-g	2.47	0.15	16.5	16.2	0.09
	3	g-R-P	2.75	0.16	17.5	17.2	0.05
Caliche Norte	1	S	0.47	0.22	2.1	1.7	0.11
	2	S	0.51	0.23	2.2	1.8	0.07
	3	S	1.16	0.19	6.2	5.8	0.07
Caliche Sur	1	S	1.09	0.04	25.5	25.4	0.10
	2	S	0.39	0.13	3.1	2.8	0.10
	3	S	0.78	0.05	14.3	14.2	0.12
La Negra	1	S-G	18.36	0.83	22.2	20.5	0.02
	2	S-g	23.86	0.56	42.7	41.5	0.02
	3	S-g	20.05	0.55	36.6	35.5	0.04
U. de Antofagasta	1	S	3.45	0.07	51.0	50.9	0.05
	2	S	3.53	0.07	53.0	52.9	0.04
Jardin del Sur	1	S	4.77	0.78	6.1	4.5	0.21
	2	R	7.87	0.75	10.5	9.0	0.19
	3	S	11.31	0.93	12.2	10.3	0.06
El Huascar	1	S	0.99	0.34	2.9	2.3	0.08
	2	S	1.93	0.31	6.2	5.6	0.05
	3	S	1.65	0.40	4.1	3.3	0.08

c) Análisis Granulométrico

Una serie de muestras de suelo fueron tomadas en diversas quebradas durante la campaña de terreno, con el fin de determinar algunas de sus propiedades y características. Además se contó con la información granulométrica disponible en el informe de Van Sint Jan et al. (1992), en el cual también se incluyeron muestras del suelo aluvional.

A continuación se define la simbología de los diferentes parámetros obtenidos de las muestras de suelo tomadas durante la campaña de terreno, cuyos valores aparecen en las Tabla 3.13.

D_{84} : tamaño del tamiz para el cual pasa el 84% del material

D_{50} : tamaño del tamiz para el cual pasa el 50% del material

D_{16} : tamaño del tamiz para el cual para el 16% del material

W_T : peso total de la muestra (sin probeta)

W_s : peso seco de la muestra

V : volumen de la muestra

$\gamma_a = W_s/V$: peso aparente o seco

$\gamma_s = W_s/V_p$: peso unitario de los sólidos

$V_s = V - V_p$: volumen de los sólidos

V_p : volumen de poros o vacío

$\eta = V_p/V$: porosidad

$C_{m\acute{a}x} = \gamma_a/\gamma_s$

Además se realizaron calicatas en todas las zonas donde se levantaron perfiles topográficos. De ellas se obtuvo una descripción estratigráfica que permitió identificar los estratos de material recientemente arrastrado.

La información granulométrica disponible en el informe de Van Sint Jan et al. (1992) alude tanto a muestras tomadas en las quebradas como a aquellas obtenidas del material aluvional. En las Tablas 3.14 y 3.15 se hace una descripción de las muestras tomadas por Van Sint Jan et al. y de algunos de los resultados obtenidos a partir de ellas.

d) Material Fotográfico y de Video

La campaña de terreno también contempló la fotografía y filmación de algunas de las principales quebradas de la zona en estudio. Dicho material cubre las siguientes quebradas.

La Negra:	en los sectores de INACESA paso superior Carrizo y la desembocadura de Antofagasta.
Caracoles y Salar del Carmen:	en su desembocadura.
Salar del Carmen N°2:	en los sectores de levantamiento topográfico, hacia el centro de la quebrada y en junta con La Cadena.
La Cadena:	hacia el interior y en su desembocadura.
Baquadano:	en su desembocadura.
El Toro:	en el sector del regimiento.
Del Guay:	en junta con quebrada De Mateo.
De Mateo:	en junta con quebrada Del Guay.

TABLA 3.13 PARAMETROS PRINCIPALES DE LAS MUESTRAS DE SUELO

QUEBRADA	Muestra N	D84 (mm)	D60 (mm)	D16 (mm)	V (cm3)	Wt (gr)	Ws (gr)	Vp (cm3)	n	GAMA(a) (T/m3)	GAMA(e) (T/m3)	Cmax
La Negra	14-A	6.89	1.83	0.29	59.0	122.7	109.9	12.8	0.22	1.86	2.38	0.78
El Ancla	18-A	7.97	2.05	0.83	41.8	90.2	71.9	18.3	0.44	1.72	3.06	0.56
El Ancla	18-B				53.5	109.5	89.7	19.8	0.37	1.68	2.66	0.63
El Ancla	18-C				56.0	108.9	94.7	17.4	0.31	1.89	2.45	0.69
Caracoles	1-A	7.48	1.35	0.36	105.0	209.8	184.1	25.7	0.24	1.75	2.32	0.76
El Toro	2-A	12.33	2.41	0.62	53.5	109.5	89.7	19.8	0.37	1.68	2.66	0.63
El Toro	2-A				120.0	227.9	190.7	37.2	0.31	1.59	2.30	0.68
La Cadena(Boq.de Sal.)		4.79	1.77	0.35	61.0	118.3	104.4	13.9	0.23	1.71	2.22	0.77
La Cadena	13-A	13.2	2.99	0.34	150.0	290.5	246.6	43.9	0.29	1.64	2.32	0.71
La Cadena	10	8.64	1.18	0.25	84.0	163.2	139.7	23.5	0.28	1.66	2.31	0.72
La Cadena Sector Alto	8-A	3.75	1.03	0.31	68.0	131.4	110.3	21.1	0.31	1.62	2.35	0.69
La Cadena Sector Alto	8-B				64.0	122.3	100.7	21.6	0.34	1.67	2.38	0.66
La Cadena Sector Alto	8-C				58.0	111.4	94.4	17.0	0.29	1.63	2.30	0.71
Salar de Carmen	6-A	7.63	1.47	0.29	95.0	252.8	220.4	32.4	0.34	2.32	3.52	0.66
Salar de Carmen	6-B				55.0	113.6	98.4	15.2	0.28	1.79	2.47	0.72

**TABLA 3.14 MUESTRAS DE SUELO DE QUEBRADAS
(Según Van Sint Jan 1991)**

QUEBRADA	D90 (mm)	D84 (mm)	D50 (mm)	D16 (mm)
El Toro M-A	19.10	13.36	2.39	0.26
El Toro M-B	27.52	20.15	4.47	0.40
La Cadena 1	55.03	42.33	8.17	1.59
La Cadena 2	8.79	6.59	2.27	0.63
La Cadena 3	33.03	25.43	7.54	2.02
La Cadena 4	10.40	8.27	2.86	0.49
Jardin del Sur	3.81	1.49	0.26	0.07
Caliche	0.54	0.49	0.28	0.17

**TABLA 3.15 MUESTRAS DEL SUELO ALUVIONAL
(Según Van Sint Jan 1991)**

QUEBRADA DE ORIGEN	D90 (mm)	D84 (mm)	D50 (mm)	D16 (mm)	UBICACION APROXIMADA
La Cadena	28.60	16.71	5.49	1.06	EDELNOR Av. Circunvalacion
Salar del Carmen	18.67	16.06	4.76	0.86	Sicilia esq. Paraguay
Salar del Carmen	11.92	7.69	1.75	0.40	C. Salar del Carmen
El Ancla	34.93	18.23	3.33	0.48	Arauco esq. de B. Aires
Uribe	0.54	0.45	0.22	0.07	Av. Circunvalacion
El Toro	1.19	0.79	0.29	0.15	Calle Arturo Prat N1470
Caliche	0.54	0.51	0.32	0.19	En ribera de la Quebrada
Jardin del Sur	0.83	0.55	0.26	0.13	Calle Travesia del Mar

CAPITULO 4
CARACTERIZACION METEOROLOGICA
DEL FENOMENO

4.1 Introducción

La caracterización que se desarrolla en este capítulo tiene como objetivo integrar y complementar los antecedentes meteorológicos provenientes de los diversos estudios realizados del fenómeno ocurrido los días 17 y 18 de Junio de 1991 en la II Región, y particularmente en la ciudad de Antofagasta.

Ella incluye una descripción de las condiciones en términos de la precipitación, viento y presiones, a nivel de la superficie tanto en Antofagasta como en otras localidades de la región desde La Serena a Tocopilla. Sobre la base de datos aerológicos provenientes de los radiosondeos realizados desde Cerro Moreno, se analiza la inversión térmica y los vientos en altura observados en el período pre y post tormenta, investigando las condiciones meteorológicas que acompañaron el fenómeno, particularmente la inestabilidad convectiva que se detecta. De acuerdo con la información recopilada acerca de la circulación atmosférica general del cono sur y de las cartas sinópticas a niveles de superficie y de los 500 hPa, complementadas con las cartas de tropopausa y viento máximo, e imágenes del satélite, se confirma que el evento se enmarca dentro de uno más amplio activado en la zona central del país y propagado hacia el norte por un debilitamiento general del anticiclón del Pacífico suroriental.

El análisis y conclusiones que se obtienen en este estudio resulta concordante con la posibilidad de desarrollo de núcleos convectivos en sectores de Antofagasta, lo que explicaría la variabilidad espacial significativa que se detectó en los tres pluviómetros instalados en distintas zonas de la ciudad.

4.2 Descripción del Tiempo Local en Superficie (Hojas de Ruta)

4.2.1 Antofagasta (Cerro Moreno)

A partir de las 05 HL del día 17 de junio de 1991 comienza a registrarse un fuerte viento del N en Cerro Moreno, Antofagasta, con velocidades que exceden los 10 nudos (DMC, 1991). Desde las 14 horas el viento aumenta su magnitud a 20-25 nudos, manteniendo una dirección predominante del N. En el transcurso de la tarde se produce un descenso de la base de la nubosidad y un aparente espesamiento de la capa de estratocúmulos costeros. Con la llegada de la noche, comienza a manifestarse una tenue neblina, la cual da lugar alrededor de las 24 HL a una densa garúa acompañada de un significativo aumento en la magnitud del viento N (sobre 40 nudos). Las primeras horas del día 18 vienen acompañadas de una intensificación de la garúa, que pasa a lluvia intensa hacia las 01 HL, persistiendo hasta las 03:30 HL, despejándose posteriormente. La lluvia aparentemente se manifestó con intensidades variables (Covarrubias et al., 1991), aumentando con el tiempo hasta las 03 HL.

Durante la madrugada del día 18, las condiciones meteorológicas locales (viento, nubosidad) muestran una progresiva normalización, quedando los cielos con escasa nubosidad durante el día 18.

En el sector de la ciudad de Antofagasta hay datos de precipitación acumulada el día 18 en 3 estaciones pluviométricas: Cerro Moreno (14.1 mm), Universidad Católica del Norte (42 mm), y Dirección General de Aguas (17.0 mm). En Uribe la precipitación acumulada ese día fue de 14 mm y sobre los 2000 m.s.n.m. se registró precipitación sólida (Agua Verde y Cerro Coloso).

4.2.2 Otras localidades

El área de precipitación se desplazó de sur a norte de la manera siguiente: En la zona central (Viña del Mar, DMC, 1991) la precipitación comienza el día 15, persistiendo hasta mediodía del 17. El día 18 y hasta el mediodía del 19 vuelve a precipitar en esta zona. En La Serena y Vallenar (DMC, 1991), la precipitación comienza en las primeras horas del día 17, extendiéndose hasta la madrugada del día 19. En Chañaral (DMC, 1991) y Taltal (Covarrubias et al., 1991) la lluvia comienza el día 17 a las 20 HL declinando sólo al final del día 18 (al menos en Chañaral).

En Tocopilla (Covarrubias et al., 1991) la lluvia comienza el 18 a las 06 HL, mientras en Calama (DMC, 1991) se registra precipitación entre las 08 y 14 HL de ese día.

En resumen, Antofagasta muestra los días 16 y 17 de junio de 1991 una situación prefrontal con presiones atmosféricas del orden de 2 hPa por debajo de lo normal (1016 hPa), vientos del N intensos y temperaturas del aire unos 2 C por encima de los valores climatológicos (14 C). El carácter advectivo de esta situación se aprecia en la ausencia del típico ciclo diario en las temperaturas y vientos a partir del día 17. Las presiones se recuperan y exceden los valores normales al final del día 18, aún cuando los vientos siguen mostrando dirección N con velocidades anormalmente altas (10 nudos). Las precipitaciones observadas el día 18 entre La Serena y Taltal fueron del orden de 40-50 mm, mientras el sector de Antofagasta - Tocopilla registró acumulaciones medias del orden de 15 mm.

4.3 **Datos Aerológicos de Cerro Moreno**

4.3.1 Inversión Térmica

La característica inversión de subsidencia que se observa en forma casi permanente en los radiosondeos que diariamente se lanzan a las 12 UTC (08 HL) en Cerro Moreno, desaparece por completo el día 18, siendo reemplazada por una capa saturada hasta 3700 m (gradiente de temperatura adiabático-saturado).

TABLA 4.1: PARAMETROS TERMODINAMICOS DE LOS RADIOSONDEOS DE CERRO MORENO (ANTOFAGASTA) A LAS 08 HL

a) DIA 15/JUNIO/1991

P [hPa]	T [C]	Td [C]	Z [m]	O [K]	dO/dZ*100	Oe [K]	dOe/dZ*100
1000	13	10	0	286.0		306.4	
920	10	8	698	289.8	0.55	309.6	0.46
870	17	0	1169	301.8	2.54	326.0	3.49
850	16	-1	1367	302.7	0.49	314.2	-5.99
800	15	-21	1880	307.0	0.82	309.4	-0.94
720	11	-26	2763	312.0	0.57	313.9	0.51
700	8	-26	2996	311.2	-0.34	313.1	-0.34
650	3	-25	3601	312.2	0.17	314.4	0.22
620	3	-28	3983	316.4	1.11	318.1	0.97
550	-6	-30	4936	316.8	0.04	318.5	0.04
500	-10	-29	5676	320.6	0.52	322.8	0.57
400	-24	-34	7350	323.6	0.17	325.5	0.16

b) DIA 16/JUNIO/1991

P [hPa]	T [C]	Td [C]	Z [m]	O [K]	dO/dZ*100	Oe [K]	dOe/dZ*100
1000	15	14	0	288.0		315.4	
900	7	7	881	288.6	0.06	307.6	-0.88
850	18	-20	1362	304.8	3.38	307.2	-0.09
700	6	-19	2995	308.9	0.25	312.6	0.33
600	-1	-22	4244	314.8	0.47	318.0	0.43
500	-13	-24	5668	317.0	0.16	320.3	0.17
450	-16	-37	6467	322.9	0.74	324.2	0.49
400	-23	-40	7343	324.9	0.22	325.5	0.15

c) DIA 17/JUNIO/1991

P [hPa]	T [C]	Td [C]	Z [m]	O [K]	dO/dZ*100	Oe [K]	dOe/dZ*100
1000	15	12	0	288.0		311.3	
940	10	6	520	288.1	0.01	304.5	-1.32
850	5	5	1350	291.2	0.38	308.7	0.51
830	14	-15	1547	302.7	5.81	306.7	-1.02
700	6	-21	2960	308.9	0.44	312.0	0.38
600	-3	-22	4200	312.5	0.28	315.8	0.31
500	-14	-24	5613	315.8	0.23	319.3	0.25
450	-14	-45	6413	325.4	1.21	326.0	0.85
400	-24	-34	7289	323.6	-0.21	325.5	-0.06
400	-23	-45	7320	324.9	0.08	329.7	-0.37

TABLA 4.1: PARAMETROS TERMODINAMICOS DE LOS RADIOSONDEOS DE CERRO MORENO (ANTOFAGASTA) A LAS 08 HL (CONTINUACION)

d) DIA 18/JUNIO/1991

P [hPa]	T [C]	Td [C]	Z [m]	O [K]	dO/dZ*100	Oe [K]	dOe/dZ*100
1000	15	13	0	288.0		313.5	
850	5	4	1354	291.2	0.24	307.8	-0.41
770	0	-3	2154	294.2	0.37	305.1	-0.34
700	-1	-1	2916	301.2	0.92	315.3	1.34
630	-10	-12	3744	300.1	-0.13	307.3	-0.96
550	-14	-35	4782	307.3	0.69	308.2	0.08
500	-20	-45	5497	308.4	0.16	308.7	0.08
450	-26	-36	6269	310.3	0.25	311.6	0.37
400	-33	-43	7109	311.9	0.18	312.5	0.11

e) DIA 19/JUNIO/1991

P [hPa]	T [C]	Td [C]	Z [m]	O [K]	dO/dZ*100	Oe [K]	dOe/dZ*100
1000	13	10	0	286.0		306.6	
950	12	6	431	289.2	0.75	305.6	-0.25
900	14	3	885	295.8	1.44	310.0	0.97
750	11	-4	2414	308.3	0.82	318.0	0.52
800	10	-20	1877	301.6	1.25	304.3	2.54
700	4	-16	2975	306.7	0.33	311.2	0.52
600	-4	-18	4209	311.3	0.37	315.9	0.39
510	-8	-25	5482	321.2	0.69	324.3	0.73
400	-24	-39	7309	323.6	0.18	324.9	-0.02

f) DIA 20/JUNIO/1991

P [hPa]	T [C]	Td [C]	Z [m]	O [K]	dO/dZ*100	Oe [K]	dOe/dZ*100
1000	13	11	0	286.0		310.7	
950	11	7	430	288.2	0.51	311.9	0.28
910	14	3	791	294.8	1.84	325.8	3.86
870	13	3	1169	297.6	0.73	327.5	0.46
850	13	-16	1365	299.6	1.02	331.2	1.86
700	5	-10	2970	307.8	0.51	330.7	-0.03
630	2	-35	3824	313.8	0.70	334.4	0.43
500	-11	-29	5642	319.4	0.31	330.2	-0.23
450	-15	-40	6444	324.2	0.59	333.0	0.35
400	-23	-45	7320	324.9	0.08	329.7	-0.37

TABLA 4.2: COMPONENTE ZONAL DEL VIENTO (U) EN NUDOS, A DISTINTOS NIVELES DE PRESION, OBTENIDOS DE LOS RADIOSONDEOS DE CERRO MORENO (ANTOFAGASTA) A LAS 08 HL.

Día	Niveles de presión [hPa]							
	850	700	500	400	300	250	200	150
10/06	3.2	3.4	8.7	9.6	24.6	39.0	64.0	54.2
11/06	-2.5	-3.8	14.8	20.0	26.8	26.8	47.6	60.6
12/06	-4.3	1.7	6.4	13.0	34.6	39.0	64.0	56.3
13/06	-9.6	-3.8	0.0	21.7	34.6	54.2	70.0	75.0
14/06	6.8	0.0	38.3	28.9	32.1	38.3	60.0	47.6
15/06	-3.2	5.1	29.5	28.2	51.7	82.3	98.5	141.0
16/06	-1.7	6.4	39.4	60.0	85.0	88.6	98.5	110.0
17/06	15.0	12.9	50.0	65.8	84.6	112.8	147.7	147.7
18/06	13.0	30.6	56.4	73.9	93.6	73.9	80.0	108.3
19/06	8.7	6.8	44.3	51.7	56.4	61.1	68.9	61.1
20/06	8.7	14.8	43.3	47.6	52.0	52.0	61.1	65.0

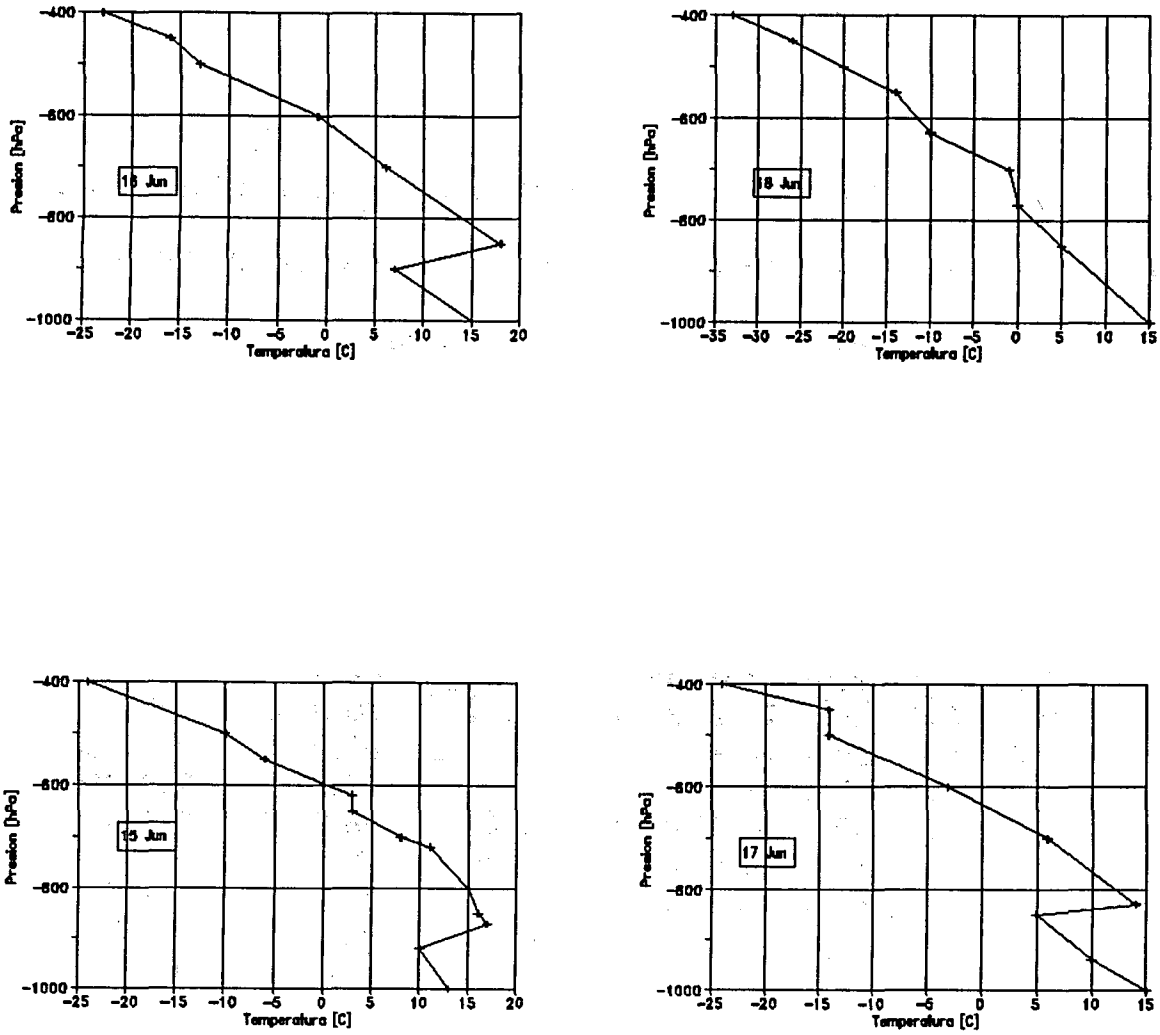


FIGURA 4.1: PERFILES DE TEMPERATURA EN ANTOFAGASTA (CERRO MORENO) ENTRE LOS DIAS 15 AL 18 DE JUNIO DE 1991 (08 HL)

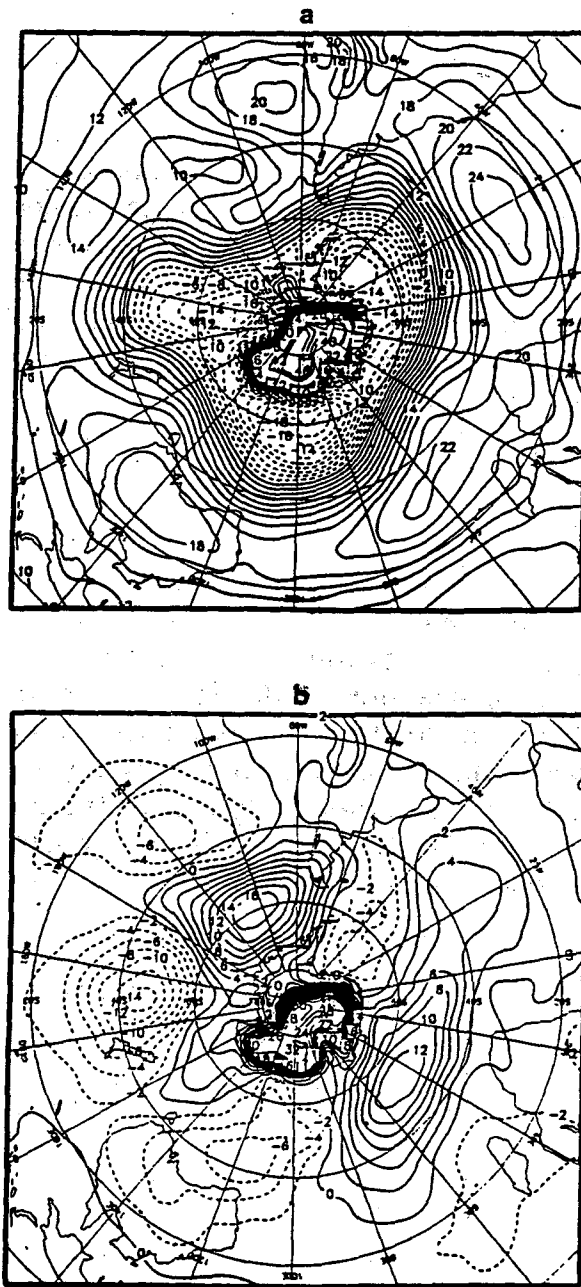
Previamente a esta situación la capa saturada se extiende desde la superficie hasta los 900 m el día 16 y hasta los 1300 m el día 17. Limitando esta capa por encima, la inversión de subsidencia se muestra intensa el día 16 y debilitada el 17 (menor espesor e incremento térmico). La Tabla 4.1 muestra parámetros derivados de los que entrega el radiosondeo (presión, temperatura, humedad relativa), que incluyen la altura geopotencial, temperatura potencial (θ) y temperatura potencial equivalente (θ_e). La última columna contiene los gradientes verticales de θ_e , lo que permite calcular la inestabilidad potencial de la masa de aire superficial limitada por la inversión térmica. El valor negativo de este parámetro a través de la capa de inversión el día 17 indica que se superó en ese momento el límite que permite el desarrollo rápido de la convección cumuliforme cuando aparece una divergencia del flujo en altura. En la Tabla 4.1 se resumen los perfiles verticales de temperatura de los días 15 al 18 de junio.

4.3.2 Vientos en Altura

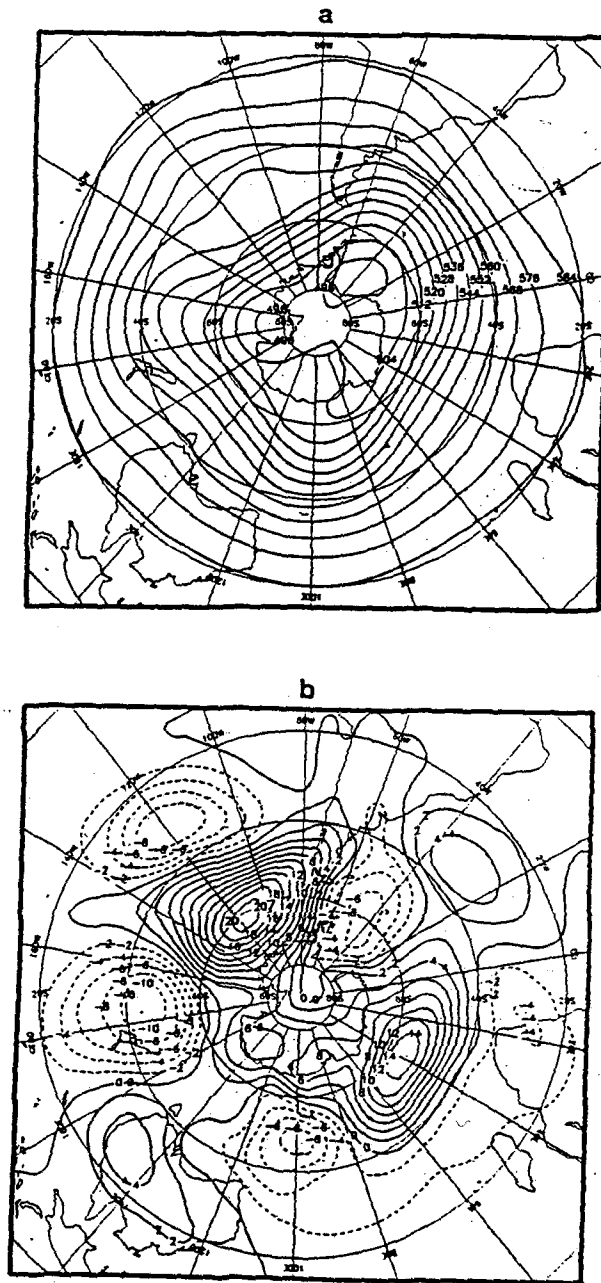
La Tabla 4.2 muestra la componente zonal del viento entre 850 hPa (1500 m) y 150 hPa (15000 m) entre los días 10 y 20 de junio de 1991. El rasgo más conspicuo lo constituye la propagación del máximo de velocidad desde los niveles superiores hacia la tropósfera media, alcanzándose el día 18 los 95 nudos a 300 hPa, que es el nivel característico del chorro del frente polar. Esta velocidad es el doble de la esperada en promedio para este nivel. El día anterior se observa una velocidad de 150 nudos en el nivel de 200 hPa, que correspondería a un desplazamiento al N del chorro subtropical. Como se verá más adelante, esto es especialmente relevante en el gatillamiento de la inestabilidad convectiva.

4.4 Características Generales de la Circulación Atmosférica en Torno al Cono Sur de Sudamérica

El período estudiado se enmarca en la etapa de desarrollo de un evento cálido de la Oscilación del Sur (El Niño 1991-92) que se caracterizó, entre otras cosas, por una señal muy notable en el esquema dipolar que caracteriza en estos períodos las anomalías geopotenciales en 500 hPa en torno al cono sur de Sudamérica (Rutllant et al., 1992). En efecto, estas anomalías fueron particularmente intensas en Mayo y Junio (Figuras 4.2 y 4.3) debido a la persistencia de una pronunciada configuración de bloqueo con separación de flujo sobre el Pacífico central-sur y suroriental (Rutllant et al., 1992). Simultáneamente las anomalías negativas de la presión en el área del anticiclón subtropical dominaron el sector central y oriental del Pacífico sur (NOAA, 1991). Estos dos ingredientes han sido asociados a un incremento de la precipitación en Chile central durante la fase de desarrollo de los eventos cálidos de la Oscilación del Sur (Rutllant y Fuenzalida, 1991). El mecanismo propuesto incluye la desviación



**FIGURA 4.2: PRESIONES A NIVEL DEL MAR EN EL HEMISFERIO SUR
a: VALORES MEDIOS, b: ANOMALIAS PARA JUNIO DE 1991. CONTOR-
NOS DE ALTURA CADA 2 hPa (SE HA SUSTRADO 1000). CONTOR-
NOS DE ANOMALIAS CADA 2 hPa (NOAA, 1991)**



**FIGURA 4.3: GEOPOTENCIALES A 500 hPA EN EL HEMISFERIO SUR
a: VALORES MEDIOS, b: ANOMALIAS PARA JUNIO DE 1991. CONTOR-
NOS DE ALTURA CADA 80 mgp. CONTORNOS DE ANOMALIAS CADA
20 mgp. (NOAA, 1991)**

de las trayectorias ciclónicas hacia Chile central por efecto del bloqueo austral, las que pueden penetrar más al norte mientras mayor es la anomalía negativa de presión en ese sector del anticiclón subtropical.

Si bien las cartas medias mensuales no representan necesariamente un evento individual como el que se está analizando, la persistencia de esta configuración dentro del mes (NOAA, 1991) y la situación particular de las cartas sinópticas durante el período estudiado confirman la pertinencia de este mecanismo como marco general de lo ocurrido en Antofagasta. En efecto, en la zona del Mar de Bellingshausen (60 S, 90 W, al oeste de la península antártica) se observa el lento desplazamiento de un anticiclón a partir del día 11 de junio, que cruza el 21 de Junio hacia el Atlántico sur.

4.5 Cartas Sinópticas de Superficie y 500 hPa (DMC)

Las Figuras 4.4 y 4.5 presentan la trayectoria del centro de la depresión principal y las isocronas frontales cada 24 horas, entre los días 15 y 20, respectivamente. La Figura 4.6 presenta las isocronas frontales cada 6 horas durante el día 17.

El día 15 a las 12 UTC se observa una profunda depresión centrada a 55 S y 95 W, de la que se desprende un frente ocluído y extendido meridionalmente con una rama fría al E de Juan Fernández y una ondulación insinuada al NW de Juan Fernández (frente estacionario en disolución). El anticiclón subtropical se encontraba este día debilitado por cuanto la presión central no excedía los 1025 hPa y la isóbara de 1020 hPa se encontraba desplazada al NW, en concordancia con la situación general descrita en 3. En 500 hPa las estaciones chilenas de radiosonda en Antofagasta, Quintero y Puerto Montt muestran una situación de prevaguada (dirección del viento NW), mientras Punta Arenas presenta una dirección del SW.

El 16 parece activarse la ondulación constituyéndose en una rama fría activa que avanza hacia el NE en dirección a la costa. Por otra parte una supuesta rama cálida de este sistema es el que produce las precipitaciones en la zona central. La presión en Juan Fernandez descendió de 1009.9 (día 15) a 1008.5 hPa, a medida que la depresión frente a la zona austral del país se desplazó hacia el norte (centro a 45 S, 85 W).

Durante el día 17 se desarrolla un núcleo depresionario con presiones centrales entre 1000 y 1015 hPa al N de Juan Fernández (1006.6 hPa) que acompaña a un rápido desplazamiento del frente frío hacia el norte. El desplazamiento de este frente en el transcurso del día 17 se muestra en la Figura 4.2, en que se representan isocronas de la posición de todos los frentes que aparecen en las cartas sinópticas correspondientes. El mayor avance frontal hacia el norte por la costa chilena se

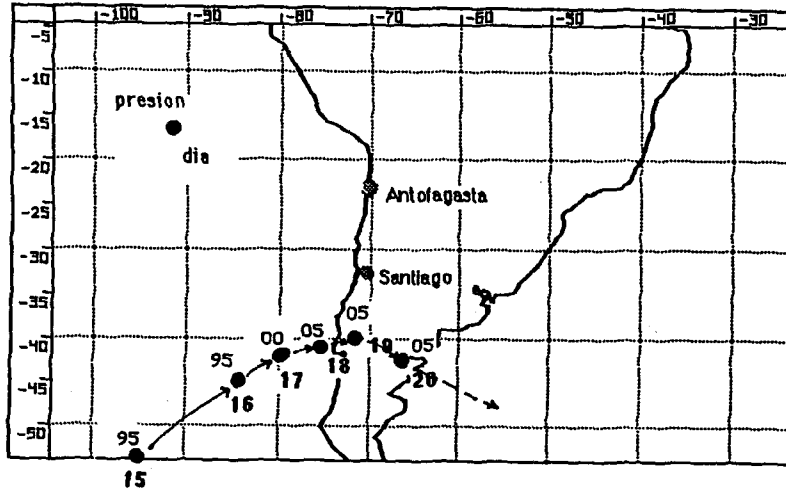


FIGURA 4.4: TRAYECTORIA CICLONAL ENTRE LOS DIAS 15 AL 20 DE JUNIO DE 1991, 12 UT

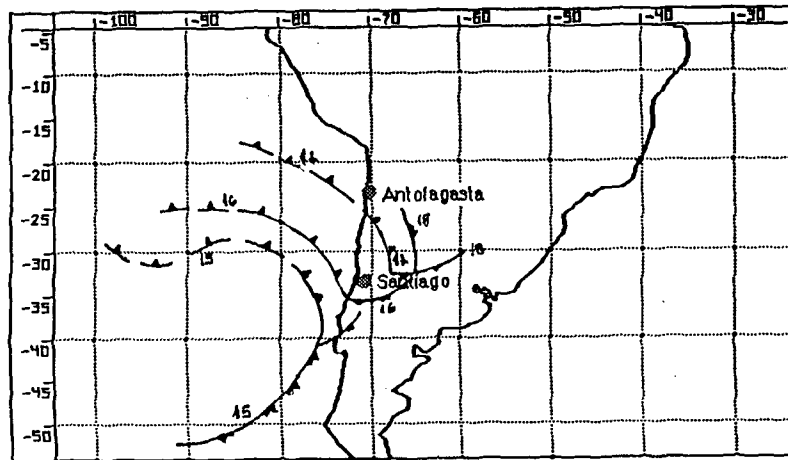


FIGURA 4.5: ISOCRONAS DE UBICACION DE SUPERFICIES FRONTALES ENTRE EL 15 Y 18 DE JUNIO DE 1991, 12 UTC.

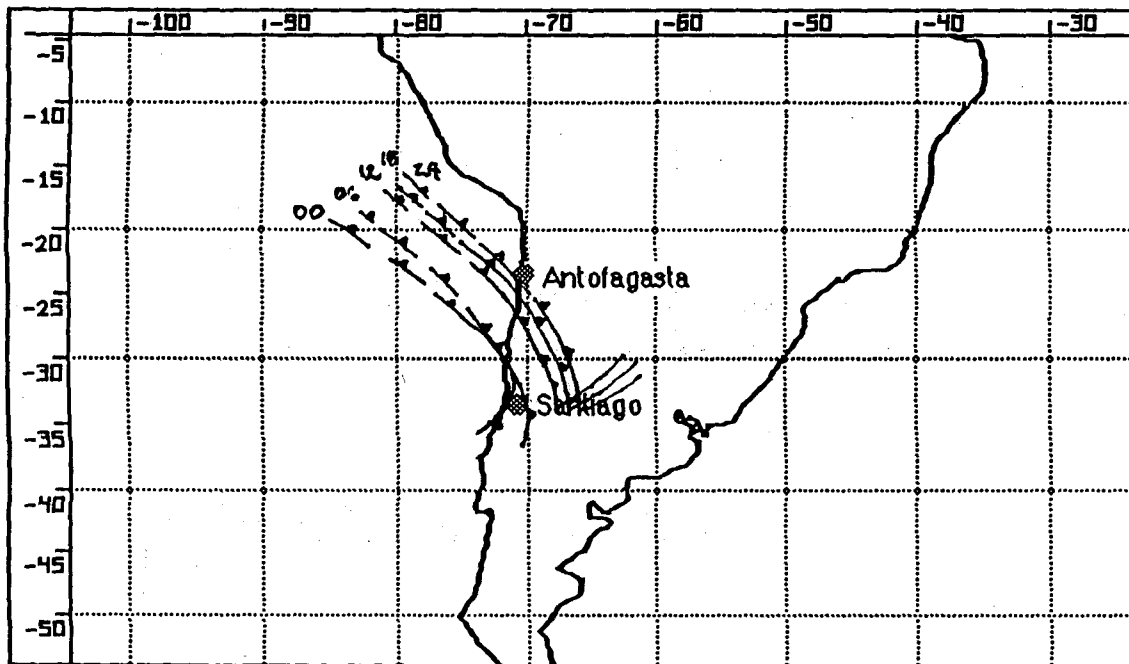


FIGURA 4.6: ISOCRONAS DE UBICACION DE SUPERFICIES FRONTALES DURANTE EL 17 DE JUNIO

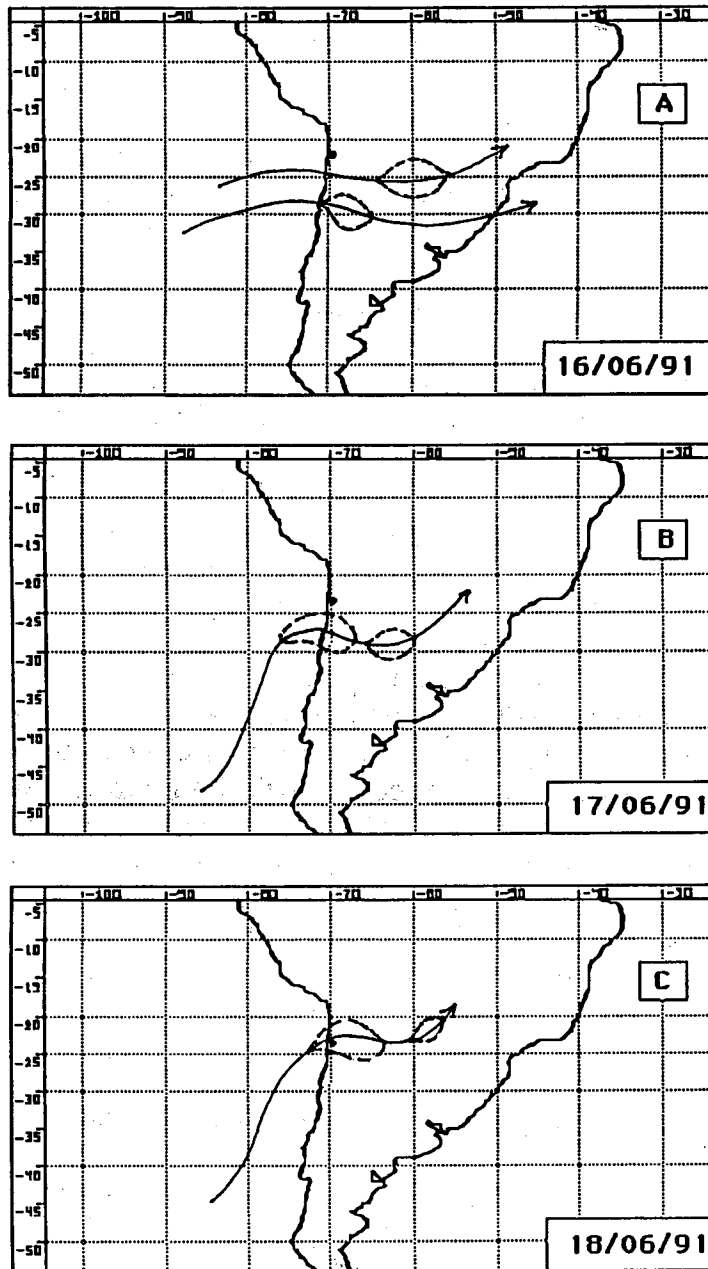
produjo entre las 06 UTC (30 S) y 12 UTC (25 S), avanzando luego muy lentamente hasta alcanzar marginalmente la zona de Antofagasta en la noche del 17, debilitándose y desapareciendo por completo en el transcurso del día 18. La carta de 500 hPa del día 18 a las 12 UTC muestra los máximos vientos costeros sobre Antofagasta (WNW con 60 nudos) coincidiendo con la profundización y desplazamiento al este de la vaguada. Un débil viento térmico en Quintero revela que el núcleo de aire frío asociado a la vaguada estaría algo al norte de ese lugar. Por otra parte la proximidad del bloqueo a la zona de Punta Arenas queda de manifiesto por un viento térmico del SE (20 nudos).

4.6 Cartas de Tropopausa y Viento Máximo

El corrimiento al N de la corriente en chorro subtropical y su posible refuerzo por un avance más al norte de lo habitual de una masa de aire frío como producto de una situación de bloqueo en latitudes altas del Pacífico suroriental durante los eventos cálidos de la Oscilación del Sur (Rutllant, 1985), sugieren la posibilidad de una generación local de inestabilidad asociada a la posición de los núcleos de velocidad máxima de la corriente en chorro sobre la zona afectada. Con el objeto de identificar la posición de la corriente en chorro subtropical y las asociadas al frente polar en esta situación de extraordinario avance de la masa de aire frío al N, se analizan las cartas de tropopausa y viento máximo. La carta del 16 a las 12 UTC (Figura 4.7a) muestra la proximidad de ambas corrientes en chorro, con núcleos de máxima velocidad ligeramente delante de la vaguada fría (chorro del frente polar) y en la dorsal (chorro subtropical). En ambos núcleos se exceden los 120 nudos. El día 17 ambos chorros se han fundido (Figura 4.7b) y el 18 se puede apreciar que la región de Antofagasta se ubica a la izquierda de la entrada del núcleo de máxima velocidad (Figura 4.7c). La componente ageostrófica del viento en esa zona genera divergencia que, por continuidad, induce convergencia en la tropósfera baja (Ucellini y Johnson, 1980). Esta condición puede al menos cualitativamente levantar la capa potencialmente inestable y desencadenar la actividad convectiva.

4.7 Imágenes de Satélites (NOAA: AVHRR y GOES: VISSR)

Se utilizaron para este propósito imágenes infrarrojas del satélite GOES (sensor VISSR) facilitadas por la Dirección Meteorológica de Chile e imágenes de los canales 2 (visible) y 4 (infrarrojo termal) del satélite NOAA (sensor AVHRR), proporcionadas por el Centro de Estudios Espaciales de la U. de Chile.



**FIGURA 4.7: CARTAS DE VIENTO MAXIMO A LAS 12 TU
ENTRE EL 16 Y 18 DE JUNIO DE 1991**

4.7.1 Imágenes de Baja Resolución. (1:14).

La Figura 4.8 muestra la imagen GOES-IR a las 01 UTC del día 17. En ella se aprecian dos bandas nubosas orientadas de NW a SE, que intersectan la costa a 27 y 30 S, respectivamente. Con el objeto de estimar la intensidad de la convección se utilizó como índice las temperaturas de los topes nubosos que se obtienen de la imagen del satélite NOAA de las 16 horas en el canal IR termal (Canal 4). En ella se puede identificar de norte a sur una banda fría intersectando la costa a 27.3 S con temperaturas entre -33 y -26 C, y un núcleo frío al sur del Salar de Atacama, con temperaturas entre -30 y -25 C. Una segunda banda intersecta la costa a 29.3 S, exhibiendo temperaturas entre -49 y -30C. Al sur de ésta se ubica sobre el continente el núcleo nuboso más extenso.

Al día siguiente (17 a las 16 horas) la banda delantera se ha desplazado a los 24.5 S, intensificando su actividad, lo que se refleja en temperaturas de tope comprendidas entre - 45 y - 32 C. En ella se pueden identificar núcleos de gran actividad convectiva, con temperaturas inferiores a -50 C. La banda más austral aparece menos definida que el día 16 producto de su fusión con el núcleo central. La latitud de intersección de la línea costera es 29.5 S y las temperaturas del tope de la nubosidad está en el intervalo comprendido entre -50 a -42 C. Los valores mínimos de la temperatura se ubican al centro de la banda (32.3 S), en tanto que el borde sur de ésta intersecta la costa a 36.3 S.

En síntesis, el análisis de las imágenes IR ha permitido establecer importantes características de escala subsinóptica durante el evento: a) la existencia de dos bandas frontales con gran desarrollo vertical, y b) la existencia de elementos de fuerte convección en la banda delantera. Estos parecen particularmente relevantes porque, según se desprende de las posiciones frontales descritas en la carta de isocronas, el frente no llegó en ningún momento a ubicarse sobre Antofagasta, sino más bien se trató de un margen frontal en que la inestabilidad convectiva se desencadenó probablemente en conexión con el núcleo de la corriente en chorro.

4.7.2 Imágenes de Alta Resolución (1:1) del satélite NOAA

La foto 1 presenta la imágenes térmicas del sector del Pacífico oriental y la costa chilena, correspondiente a los días 16 y 17 de Junio de 1991 (aproximadamente a las 20:00 HL), en las cuales se observa el avance del frente hacia la zona de Antofagasta y el sistemas de dos bandas frontales detectadas en la imagen de baja resolución.



FIGURA 4.8: IMAGEN IR SATELITE GOES 17/6/91. 01:04 UTC

La foto 2 presenta una ampliación del sector de la península de Mejillones en el canal termal para los días 14 y 18 de Junio de 1991. El rasgo más destacado corresponde a la disminución diferencial de temperatura por efecto de la precipitación de la madrugada del día 18, la cual alcanza sobre los 14°C en las zonas interiores, y decrece a 5 C sobre la costa.

Con el objeto de detectar la posible existencia de diferencias en los montos de precipitación en la zona de Antofagasta, se realizó una comparación de las imágenes del canal 1 (radiación visible reflejada: 1 pixel = 1 km²) entre los días 14 (anterior al evento) y 18 y 19 (posterior al evento), lo cual se presenta en la foto 3. Considerando que las imágenes fueron tomadas con aproximadamente la misma inclinación del satélite y de los rayos solares (misma hora), las diferencias en el albedo serían consecuencia de diferentes contenidos de humedad de las capas superficiales. Así, una mayor diferencia positiva en el albedo superficial (antes del evento menos después del evento) puede ser atribuido a una mayor precipitación en esa área, suponiendo una superficie homogénea. En efecto, estudios observacionales (Kondrat'yev, 1965) indican que el albedo sobre una superficie de suelo húmedo puede ser de hasta un 5% más bajo que en la misma superficie seca. La comparación entre la imágenes visibles de los días 14 y 18 de junio, revela para el sector de Antofagasta una disminución de albedo de alrededor de 3%. Sin embargo, el rasgo más notable corresponde a la no uniformidad de este decrecimiento, agregando un elemento más a la evidencia del carácter convectivo del evento.

4.8 Comentarios Finales

La variabilidad observada en el área urbana de Antofagasta (15 a 45 mm) sería consistente con una precipitación de tipo convectivo. En efecto, núcleos nubosos con temperaturas de tope del orden de - 50 C se observan el día 17 a las 16 horas en las imágenes del satélite NOAA con el canal 4 del sensor AVHRR en torno a los 24,8 S en una banda separada de la principal cuyo borde norte intersecta la costa a 29.5 S.

Dado que aparentemente sólo un margen frontal alcanzó la zona de Antofagasta, el posible desarrollo de núcleos convectivos en sectores de la zona se ve confirmado por:

- a) el carácter de la banda frontal delantera, constituida por núcleos convectivos.
- b) la presencia de una zona de entrada a un núcleo de corriente en chorro (parte trasera izquierda) sobre Antofagasta.

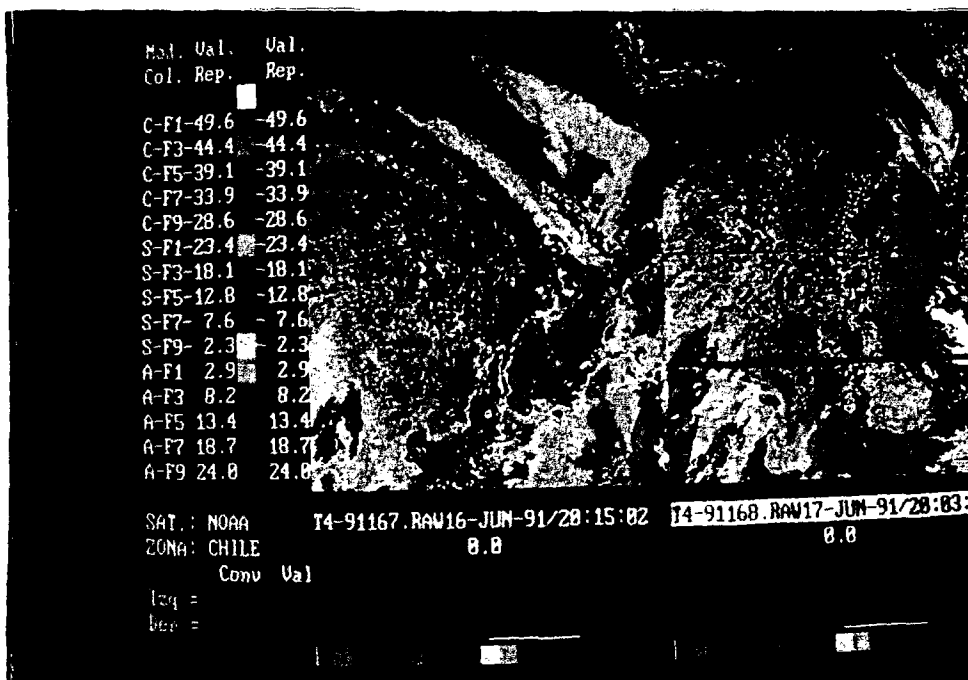


FOTO 1 IMAGEN TERMICA DEL PACIFICO ORIENTAL (NOAA)

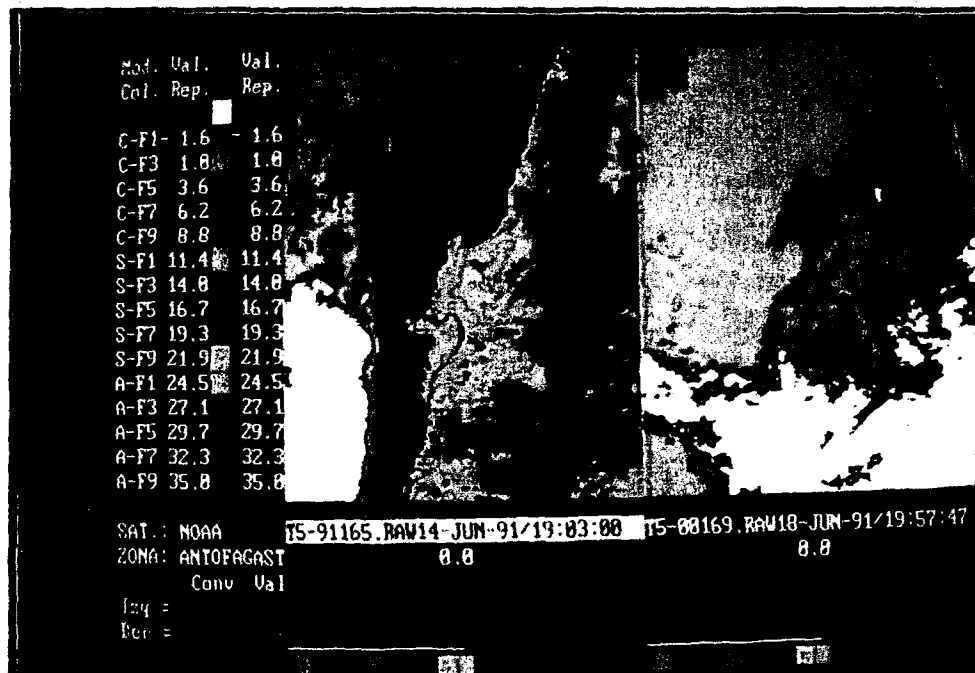


FOTO 2 IMAGEN TERMAL DE LA PENINSULA DE MEJILLONES (NOAA)

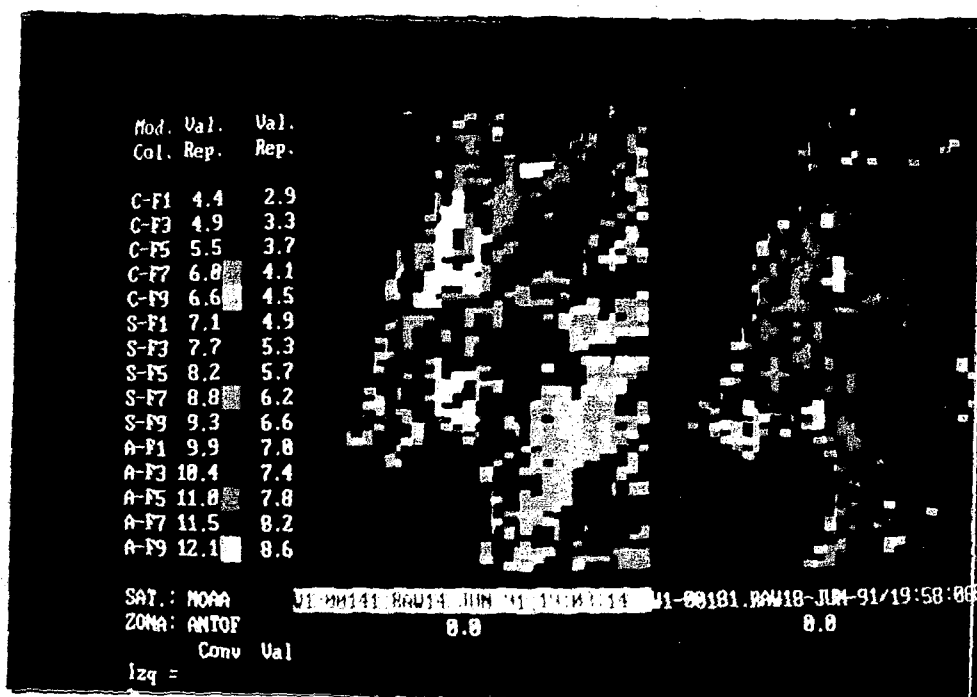


FOTO 3 IMAGEN DE RADIACION VISIBLE (NOAA)

- c) la existencia de inestabilidad convectiva (potencial) en el radiosondeo de Antofagasta del día 17.
- d) inhomogeneidades en la distribución de las diferencias de albedo antes e inmediatamente después del evento.

La activación del frente en la zona central de Chile y su propagación al norte se dió en un contexto de bloqueo en la zona del mar de Bellingshausen y de un debilitamiento general del anticiclón del Pacífico suroriental, en consonancia con el desarrollo de la fase negativa (cálida) de la Oscilación del Sur que dió origen al evento de El Niño 1991-92.

CAPITULO 5
CARACTERIZACION GEOLOGICA - GEOMORFOLOGICA
DEL FENOMENO

5.1 Introducción

El objetivo del estudio geológico-geomorfológico fue determinar las características que tuvieron los flujos de detritos que afectaron la ciudad de Antofagasta, principalmente las relativas a su composición, granulometría, volumen, altura, etc., así como los rasgos geológicos y geomorfológicos de las cuencas que les dieron origen. El área de estudio comprendió básicamente el tramo de la Cordillera de la Costa y zona litoral que corresponden a la ciudad de Antofagasta.

5.2 Métodos de Estudio y Antecedentes

Los estudios se iniciaron con una revisión de los diferentes antecedentes existentes sobre el fenómeno acaecido en Antofagasta, el día 18 de Junio de 1991. Esta información se complementó con una revisión de la información existente sobre la geología de la región.

A continuación se efectuó un análisis fotogeológico comparativo entre fotografías aéreas sacadas antes de la ocurrencia del fenómeno y fotografías obtenidas con posterioridad a él. Para este efecto se utilizaron las fotos aéreas a escala 1:30.000 de la Serie CH 30. S6 (SAF año 1981) del Servicio Aerofotogramétrico de Fuerza Aérea de Chile, junto con las fotos a escala 1:20.000, de la Serie IGM 92 tomadas especialmente por el Instituto Geográfico Militar, luego del desarrollo de los flujos de detritos, el mes de Enero de 1992. A partir de análisis se reconocieron las diferentes unidades geomorfológicas existentes en el área, estableciéndose además todas las diferencias que se pudieran apreciar, derivadas de la ocurrencia del fenómeno estudiado.

La información obtenida del análisis fotogeológico fue verificada durante una visita al terreno, la que se llevó a cabo los días 21 y 22 de Enero de 1993. En esa ocasión se recorrieron las principales quebradas, complementándose la información obtenida a partir de las fotos aéreas con antecedentes obtenidos directamente, como por ejemplo la altura alcanzada por los diferentes flujos de detritos, su composición granulométrica, mineralógica y rasgos estructurales internos, así como sus relaciones estratigráficas, en especial con otros fenómenos similares, etc. Los resultados de esa visita a terreno se entregan en el Anexo Estudios de Terreno. La ubicación de los diferentes puntos que se describen, se indica en el mapa que acompaña este capítulo.

A vuelta de terreno se revisaron nuevamente las fotos pre y post flujo de detritos lo cual permitió ampliar los antecedentes obtenidos y elaborar las conclusiones que se entregan en el presente informe.

Los antecedentes geológicos consultados sobre la zona corresponden a la "Carta Geológica de Chile, Escala 1:250.000, Hoja Antofagasta (N° 30), Región de Antofagasta", de F.Ferraris y F.Di Biase, editada por el Instituto de Investigaciones Geológicas (1978).

Por su parte los antecedentes relativos a los fenómenos de flujos de detritos consultados en la literatura general sobre el tema, corresponden a los de Varnes (1978), Hays (1981), Wold y Jochin (1989) y a los de estudios consignados en el Capítulo 3 referentes al fenómeno particular ocurrido en la ciudad de Antofagasta.

5.3 Marco Geológico

De acuerdo a la Carta Geológica de Chile. Escala 1:250.000, Hoja Antofagasta, de Ferraris y Di Biase (1978), la zona estudiada está constituida en gran parte por rocas de la Formación La Negra. Dicha zona está integrada por lavas andesíticas de colores grises y verdes, con intercalaciones de brechas y areniscas de colores rojizos, las cuales forman una secuencia monoclinial que manteea hacia el oeste. En algunos sectores, en especial al sur de la quebrada La Negra, se presenta intruida por cuerpos menores o stocks graníticos de edad Jurásico Superior. A la formación La Negra se le ha asignado una edad Jurásico Medio a Superior.

El sector sur del área estudiada está constituido por rocas de la Formación Caleta Coloso, integrada por conglomerados y areniscas de colores rojizos. Esta secuencia estratificada sobreyace a la Formación La Negra y se le ha asignado una edad Titoniano-Neocomiano.

Las rocas fundamentales, representadas por las formaciones descritas anteriormente, están cubiertas en algunos sectores, según los autores citados, por sedimentos aluviales de relleno, constituidos por gravas, arenas y arcillas, de edades Holocénicas.

5.4 Apreciación General Sobre las Características de los Flujos y Depósitos

Las características que tuvieron los flujos de detritos en las diferentes quebradas, de acuerdo con las observaciones efectuadas durante la visita de reconocimiento de terreno del 21 y 22 de Enero de 1992, así como el espesor de los rellenos y granulometría del material remanente, se describe a continuación (ver Fig 4.1).

a) Quebrada Huáscar

Punto 1 En la salida de la quebrada del Huáscar.

Se advierte, en el salto que presenta la quebrada, un antiguo cono ya bastante consolidado que está constituido en la base fundamentalmente por clastos con escasa matriz, algunas veces de formas redondeadas, pero la mayor parte bastante angulosos, todos o casi todos de la Formación La Negra y sobre ellos, en el tercio superior del mismo cono, se desarrollan, arenas y niveles arenosos principalmente. El espesor del cono en esta parte debe ser de unos 25 a 30 metros.

Dentro del cono ha sido cortado un pequeño zanjón por el cual corrió el último flujo de detritos, restos del cual se presentan todavía adheridos en los bordes, sobre todo de la parte rocosa que corresponde al sector inmediato a la bajada de la corriente. Este zanjón presenta marcas hasta mas o menos unos 3 metros y medio de altura sobre el nivel actual del fondo. Estas marcas corresponden a coberturas y adherencia de material relativamente fino, aparentemente como una especie de estrujamiento de arcilla, o exprimimiento de arcillas, y ésta cubre a su vez un relleno. Esta cobertura es variable y corresponde a una arena bastante suelta en muchos sectores, con contenido de clastos del nivel de gravillas, es decir, del orden de 3 a 5, hasta 10 mm, angulosos todos. La arena es principalmente una arena eólica de proveniencia costera. Es una arena que se ha originado en la costa, ascendido luego hacia la parte alta del relieve y retornado posteriormente por medio del flujo de detritos. Se trata en este caso de una arena bastante pura, excepto por un 10 a 20% de fragmentos angulosos mas gruesos. La arena tiene una composición y proveniencia diferente, debido a que está compuesta por granos integrados principalmente por cuarzo y felsdespato, con formas redondeadas y esmerilados, por lo cual no hay dudas de su origen eólico; el material mas grueso por su parte, presenta un tamaño de grano equivalente a una gravilla y procede de la descomposición y formación de coluvio de la Formación La Negra. La arena presenta en este sector una estratificación particular, ya que inclina hacia aguas arriba, a diferencia de la inclinación que en general tienen todos los depósitos del cono de flujo de detritos, los cuales mantean hacia aguas abajo, con un ángulo de unos 25° aproximadamente. El material arenoso en parte está recubierto también por capas de material relativamente grueso, solamente del interior. Todos ellos, en todo caso están pegoteados contra la roca, es decir forman una especie de parche que debe tener unos 5 a 10 cm máximo, y que en parte es solamente una película muy delgada. Este material es una arena casi pura, con poca arcilla, no mas del 5% en todo caso. Este material podría haber sido en todo caso adherido en forma de un "spray" contra la roca o rellenos antiguos de los bordes, puesto que se presenta a una cierta altura en la que quizás el flujo de detritos no la haya alcanzado a cubrir. La arena que constituye gran parte de depósito del flujo de

detritos es en este caso típicamente eólica, constituida por granos de cuarzo y feldespato, junto a otros otros de color claro, formas redondeadas, superficies pulidas y esmeriladas, todo lo cual indica que se deriva de rocas graníticas, diferenciándose claramente de aquellos que constituyen la fracción de granulometría equivalente a gravillas, los cuales son lúticos y de formas angulosas, y derivados de la meteorización y movilización coluvial de la Formación La Negra.

Punto 2 Casas y construcciones afectadas por el flujo de detritos.

Allí el flujo alcanzó en algunas partes una altura de metro a metro y medio, escurriendo y destruyendo algunas casas, varias de ellas bastante resistente, de concreto, otras un poco mas débiles. El flujo corrió tomando la forma de una gruesa columna, según una señora que la presencié, era alto y producía mucho ruido; aparentemente en ese momento corrió sin que existieran cauces, por lo cual parece que los zanjones que se observan hoy en día, se formaron después.

El material que escurrió y quedó depositado, alcanzó un metro a metro y medio de espesor y produjo un salpicamiento de los muros de las casas que alcanza hasta unos 2 metros. El depósito formado por el flujo corresponde también a una arena, la cual en este caso tiene un mayor contenido de fragmentos mas gruesos, casi un 30% de fracción cascajos, contra un 60 a 70% de fracción arena. Además presenta muchos materiales correspondientes a agregados artificiales y residuos del tipo concretos, papeles, etc. Estos depósitos están bastante consolidados, probablemente debido al contenido de arenas con sales intersticiales.

Durante el desarrollo del fenómeno se formaron diferentes conductos, los cuales derramaron en diferentes partes del cono, con un comportamiento muy variable desde una parte a otra del cono; en algunos sectores hay mucho daño, mientras que en sectores situados a pocos metros no se produjo ningún daño, dependiendo al parecer de las áreas donde se desplazaron las corrientes principales. Estos flujos fueron capaces de arrastrar bloques de hasta unos 40 a 50 cm aproximadamente de diámetro.

b) Depósitos de las Quebradas El Toro y Caliche

Punto 3 Este punto se ubica en los alrededores del hotel Tatio y sector del Estadio Regional.

Allí se efectuaron observaciones que complementan las realizadas anteriormente, durante Febrero de 1992. Se observan todavía restos de los flujos de detritos que llegaron hasta el mar en este sector, bajando por las calles que descienden desde las Quebradas de El Toro y El Caliche. Se advierte que el depósito está compuesto

en algunos sectores, por una parte, por aproximadamente un 60 a 70%, hasta 90% en otros, de arena eólica constituida por granos redondeados, de tamaños uniformes y colores claros, con predominancia de plagioclasa, cuarzos y algunos granos de origen orgánico, al parecer test calcáreos marinos. A ello se agrega un 20 a 30% de granos anguloso y mas gruesos, de tamaños comprendidos entre 2 y 8 mm., formas angulosas y composición lítica, que provienen de la descomposición de afloramientos de la Formación La Negra.

Este depósito formó un manto en este sector de hasta unos 40 cm. de espesor y llegó hasta el mar desembocando y ocupando muchos de los terraplenes y terrazas que existen allí. Se observa una puerta de una vivienda que está todavía atorada y anegada por depósitos de flujo de detritos, los cuales se presentan bastante homogéneos internamente, sin estratificación y con el espesor ya señalado. Estos flujos provendrían de las Quebradas de El Toro y El Caliche probablemente.

c) Quebrada Jardín del Sur

Punto 4 Situado en la parte alta de la quebrada que baja hacia la villa Jardín del Sur.

Allí se ha construido un tranque con el objeto de desviar las aguas o flujos de detritos que bajen por la quebrada, llevándolos hacia un sector donde hay construcción de antenas y otras instalaciones de las fuerzas armadas, al parecer instalaciones de un radiofaro. Este tranque ha sido construido con una protección de enrocado y está obstruyendo el paso de flujos hacia abajo por la quebrada de Jardín del Sur: Tiene una altura de unos 8 a 10 metros e interceptaría en consecuencia una altura de flujo equivalente.

Desde este punto hacia abajo existen varias evidencias del paso de un flujo de detritos que debe haber tenido una altura de unos 2 metros. Este flujo ha dejado en este sector, sólo una delgada película de material arenoso; sin embargo mas abajo, ya en el **Punto 5**, da lugar a un depósito de unos 20 cm.

Punto 5 Situado en la Quebrada Jardín del Sur.

En este punto el flujo de detritos ha dejado un depósito de unos 20 cm, en parte también muy delgado y adosado, el cual está constituido por arenas de dunas, muy similares a las que se han descrito para la zona de Huáscar, es decir, granos redondeados, esmerilados, buena selección, compuesta por minerales de colores claros, félsicos y con un contenido también del orden del 20% de granos angulosos, equivalentes a una gravilla, con 2 a 6 mm de diámetro. Estos últimos corresponden

a granos, derivados de coluvios formados a partir de la formación La Negra.

Existen varias evidencias en la zona de los Saltos de pulimiento, tanto de la roca o como de la superficie de antiguos depósitos de flujos de detritos que constituyen la caja o cauce de la quebrada. Estos depósitos forman parte de un bolsón, posiblemente de edad terciaria o más nueva (cuaternario antiguo), constituido principalmente por depósitos del tipo flujos de detritos, el cual presenta además algunos niveles intercalados de coquinas, así como niveles de cenizas riolíticas bastante puras, del tipo denominado comúnmente "brillantina".

Este bolsón está apoyado sobre rocas fundamentales de la Formación La Negra, las que constituyen las bases sobre las cuales se ha fundado el estanque de agua potable que existe en la zona, así como la línea de un antiguo ferrocarril (De acuerdo a Semper y Michels ("La Industria del Salitre en Chile".1908), en Aguas Blancas se inauguró en 1903 el ferrocarril de trocha angosta (0,76 cm) que unía la Oficina Pepita con la Caleta Coloso). Allí se aprecia que sobre los materiales de desecho del corte, se ha depositado un flujo de detritos antiguo, el cual ha sido a su vez cortado y recubierto, por el paso de un flujo de detritos más reciente. Este último corresponde al fenómeno del 18 de Junio de 1991 y habría sido antecedido al menos por un fenómeno similar, el cual tuvo lugar después de la construcción del mencionado ferrocarril, es decir con posterioridad al año 1903.

Los materiales de relleno artificial que constituyen el terraplén en el sector en que la antigua línea de FFCC cruzaba la quebrada de Jardín del Sur, están siendo afectados por deslizamientos que caen hacia la quebrada.

La altura que se ha determinado para el flujo de detritos del año 1991 en el sector situado aguas arriba del estanque del agua potable, a pesar de las pocas marcas existentes ya que corresponden a películas muy delgadas, es de unos 2 m sobre el fondo del valle.

Punto 6 Situado Aguas Abajo.

En este sector de la villa Jardín del Sur, se reconocen casas con daños que están ubicadas en el sector axial del cono. Estas casas no han tenido daños muy severos al parecer, pero si ingreso de barro y en algunos casos destrucciones de panderetas.

d) Quebrada Caliche

Punto 7 Este se ubica en el curso principal de la quebrada El Caliche Norte.

Presenta varios surcos o pequeños zanjones excavados dentro de los depósitos de un cono antiguo; los flujos de detritos corrieron al parecer por zanjas ya existentes, estas zanjas se deben haber profundizado un poco y de los depósitos de los flujos han quedado muy pocas evidencias, solamente una película muy delgada que indica que ellos corrieron con una altura de medio metro hasta unos 70 cm de alto con respecto al fondo de los zanjones.

La película remanente de los flujos está compuesta principalmente por depósitos de arena eólica, con un cierto contenido de arcilla que debe ser del orden de 10 a 20% y algunos clastos angulosos de La Negra; estos depósitos formados durante el fenómeno de Junio de 1991, están a su vez en una caja de material constituido por antiguos flujos de detritos, que en general no son muy diferentes a los observados en el caso del cono del Huáscar. Los depósitos del último flujo son arenosos con algunos niveles de gravas, eventualmente el material eólico es un poco menos redondeado, quizás un poco menos trabajado en esta parte que el de la zona del Huáscar y parece haber también más abundancia de material de La Negra de formas angulosas, pero en general se mantienen las condiciones de la región situada al sur de la Quebrada El Toro.

Todo el sector del cono de Quebrada El Caliche Norte corresponde a varios cursos chicos que al parecer dividieron el volumen del flujo de detritos y éste aparentemente no causó muchos daños, más bien habría provocado inundaciones en el sector, sin un gran poder de destrucción, debido a la dispersión que experimentaron los flujos en la desembocadura de esta quebrada.

Punto 8 Ubicado en el sector de la desembocadura de la Quebrada Caliche Sur en el plano de la ciudad.

Corresponde a un sector en que se ha construido una línea de edificios de mediana altura. Aquí se observa que el flujo de detritos ha quedado marcado en un poste, situado en el borde de la línea del FFCC, indicando una altura de unos 40 cm aproximadamente para el flujo. Este debe haber corrido en este sector bastante disperso también. Las obras de protección construidas recientemente, concentrarían los flujos desde las Quebradas Caliche Norte y Sur por medio de una canaleta y las dirigirían hacia una calle que corre en sentido este-oeste, desde aproximadamente el sector intermedio de ambas quebradas.

e) **Quebrada Baquedano**

Punto 9 Situado en la Quebrada Baquedano Norte.

Esta quebrada presenta una fuerte pendiente y se observa en ella, a medida que se asciende, que hay marcas de flujos de detritos que tienen desde 1 hasta 1,5 m de altura respecto al fondo del cauce; el depósito del flujo de detritos corresponde, en la parte más alta, cercana al Salto y dentro de él, a un agregado de clastos y granos de arena en proporción parecida, con algunos grandes bloques; en general predominan los tamaños entre unos 2 hasta unos 10 cm y eventualmente clastos mayores, los cuales deben ser en conjunto un 60% de depósitos y el resto corresponde eventualmente a una mezcla entre gravilla, de 2 a 4 y 8 mm. y arena. La arenas de origen eólico, son más bien escasas, correspondiendo estas mas bien a la fracción fina de coluvios, producidos por meteorización y erosión de rocas de la Formación La Negra.

En las laderas del relieve en este sector se advierte que hay rocas en mal estado y que es probable que haya habido, además del flujo de detritos, algunos derrumbes laterales, debido a la mala calidad de la roca, que se hayan sumado a ellos. Es probable que debido a la pendiente y al tipo de material, en el cual se advierte también una disminución del porcentaje de arcilla con respecto al de otras quebradas, el potencial destructivo de los flujos de detritos en este sector, haya sido superior a aquellos que se han visto más al sur.

En algunos de los parches de depósitos de flujo de detritos que se han observado en esta quebrada, se advierte que estos están constituidos por dos niveles o paquetes superpuestos; uno inferior que corresponde a un flujo de detritos mas antiguo, pero en todo caso de una edad posterior al año 80, debido a las fechas que hay en las basuras que se presentan en su techo; y sobre éste un depósito de flujo de detritos de 1 m de espesor aproximadamente, que correspondería al último fenómeno, es decir al del año 91. Ambos depósitos tienen igual aspecto y similares características, de tal forma que es difícil separarlos, a no ser por el nivel de basuras que se presenta en el techo del inferior. Sus características corresponden a las que ya se han descrito: el contenido de arcilla en general es bajo y no superaría el 5 a 10%, predominan entonces los clastos mayores a 4-5 mm, de composición ífica, los cuales provienen de la destrucción de rocas de la Formación La Negra, entre ellos algunas ocoita y el resto andesitas y otras variedades de este mismo tipo de roca.

Punto 10 Quebrada Baquedano.

En este punto se verifican las observaciones efectuadas en fotos aéreas, relativas al desarrollo en este sector de un fenómeno de ensanchamiento por erosión

experimentado por el zanjón que corta el cono a la salida al plano, así como la profundización y ensanchamiento de este mismo zanjón en el sector situado inmediatamente aguas abajo. Este fenómeno pudo haber sido ayudado también por el corte de una cañería matriz de agua potable que cruza esta quebrada, sin embargo el rol mas importante lo deben haber jugado las características que tuvo el flujo de detritos, en especial su violencia y el grosor de su granulometría.

En esta quebrada se ha construido, como protección para futuros flujos de detritos, una especie de bypass subterráneo, integrado por un tubo corrugado de más o menos 1,20 m de diámetro, al cual se le ha puesto una rejilla en su entrada superior. Este tubo pasa por bajo el camino, el cual ha sido reconstruido en este sector, para desaguar finalmente los flujos dentro del mismo zanjón, unos 150 a 200 m más abajo, desde donde se dirigirán hacia el sector bajo de la ciudad.

Punto 11 Situado en la Quebrada Baquedano Sur.

Aquí se advierte que los efectos destructivos de los flujos de detritos han sido poco importantes. Parece ser que hubieran echado abajo algunos muros de divisorias, en el interior de la hondonada donde está la escuela y provocado algunos apilamientos y rellenos de material. Las características de los materiales depositados por los flujos son similares a las descritas en el punto 9 de la Quebrada Baquedano Norte, sólo que aquí parecen ser mas bien gravillosos y haber tenido una menor violencia y volumen.

En esta quebrada se han construido también obras de protección de futuros flujos de detritos. Estas consisten en un tubo corrugado, sin protección de rejilla y con una mala sustentación de los bloques que revisten el canal que concentraría los flujos aguas arriba del tubo, de tal manera que algunos de estos bloques ya han caído hacia el canal, desde los bordes. Este tubo desagua directamente sobre el camino de circunvalación, desde donde se dirigirían los flujos hacia la calle Uribe. En el sector que se sitúa mas arriba que el estanque de agua potable, existe una cantera de roca desde donde se extrae material para luego chancarlo.

f) Quebrada El Toro

Punto 12 Situado en la zona de la desembocadura de la Quebrada El Toro.

Se observan aquí depósitos de flujos de detritos en la zona de instalaciones del regimiento Esmeralda, las cuales están cubiertas por aproximadamente unos 3 m de estos flujos. Este depósito corresponde a un agregado caótico de clastos angulosos, tamaños máximos hasta unos 30 a 40 cm, algunos superan este tamaño,

alcanzando hasta unos 80 cm., la mayor parte sin embargo se concentra entre los tamaños de 1 cm hasta unos 20 cm. Los clastos son de formas tabulares y están incluidos en una matriz correspondiente a una gravilla, la cual es abundante, prácticamente un 80 a 90% del depósito; integrada por granos de formas angulosas, composición lítica de procedencia de la Formación La Negra. La cantidad de arena de origen eólico presente en estos depósitos es relativamente pequeña, de alrededor del 10%. Se aprecia además un bajo contenido de arcilla, el cual se encuentra entre un 5 y un 10%. Estos depósitos mantienen una cierta regularidad, si bien son masivos, se ve sin embargo que los clastos, de formas tabulares de preferencia, se disponen en el sentido del flujo y aparentemente indicarían una relativa baja viscosidad de él. En su parte alta los depósitos presentan una granulometría mas fina, equivalente a una gravilla casi pura. Este nivel forma el techo del depósito, el cual debe tener unos 20 a 30 cm de espesor. En términos generales el depósito se presenta como un cuerpo masivo u homogéneo, con excepción de las separaciones y diferenciaciones que se han señalado.

En algunos sectores el flujo de detritos parece haber alcanzado un espesor mayor que 3 m, quizás unos 3 m y medio, afectando construcciones sólidas de muro con cadenas y pilares armados con fierro, eliminando prácticamente dos grandes galpones. Esta situación se presenta en el sector mas oriental de la hondonada, formada por una antigua zona de extracción de áridos para la construcción, la cual fue ocupada por las instalaciones del Regimiento Esmeralda.

Los rellenos en los cuales fue excavada la hondonada corresponden a depósitos similares a los del flujo de detritos de Junio de 1991. Estos rellenos constituyen un cono de depósitos mal estratificados, con capas no bien definidas y una estratificación interna sólo insinuada; los clastos son de formas angulosas, de diámetros promedios 30 cm y algunos bloques de hasta 50 a 60 cm.; también existen algunos excepcionalmente grandes, que alcanzan hasta 1 m de diámetro. La mayor parte de estos depósitos presenta un agregado de matriz gravillosa, tamaños entre 1 a 5-10 cm y un escaso porcentaje de unos 10 a 20% de arena eólica, con no más de un 5% de arcilla. En la parte oriental de la hondonada, todavía quedan algunos parches del último flujo de detritos, sobre pequeños montículos centrales no explotados. Se advierte además que el zanjón y salto por donde bajó uno de los flujos de detritos, correspondiente a la rama norte, presenta una película de los depósitos de dicho flujos, los cuales alcanzan una altura de 4 m sobre el fondo del zanjón, El ancho del salto por el cual habría descendido el flujo, es de unos 10 a 20 m.

Punto 13 Este punto se ubica en la zona de la desembocadura de la Quebrada El Toro Sur, en la hondonada ocupada por el Regimiento.

Aquí el flujo de detritos, por la fuerza de la bajada, labró, al parecer, un

angosto conducto en los depósitos de flujos antiguos que constituyen el cono; sin embargo, es probable que al menos en parte, éste conducto existiera ya, antes del último fenómeno. En este zanjón han quedado marcas del flujo de detritos que indican una altura de éste de unos 6 a 7 m. Este valor sería en todo caso mínimo puesto que habría que sumarle el relleno que hay en el fondo del zanjón, con lo cual la altura total del flujo de detritos podría llegar a unos 8 a 9 m.

Aguas arriba por este conducto o zanjón se ha construido recientemente un muro de piedras, el cual tiene como objeto interceptar y desviar hacia el sur, los flujos de fenómenos que se produzcan en el futuro y que bajen por dicho zanjón. Este muro impide penetrar para el interior del zanjón más allá de 20 a 25 m desde su desembocadura en la hondonada del Regimiento. El flujo de detritos ha dejado en todo caso, una delgada capa de arcilla que recubre estos sectores, por lo cual se puede reconocer su altura.

Punto 14 Este punto se sitúa en el área en que se encontraban los depósitos de municiones o polvorines del Regimiento.

Estas instalaciones fueron cubiertas y sus techos destruidos; aparecen en el interior tapados por a los menos unos 3 a 3,5 m de flujos de detritos, los cuales en este sector abierto deben haber corrido en forma de una lámina, antes de encauzarse y entrar a la hondonada en la que se ubica el Regimiento.

Inmediatamente aguas arriba de estos polvorines se sitúa el muro de contención descrito en el punto 13, el cual tiene como objeto contener y dirigir hacia el sur los flujos de detritos de fenómeno similares que se produzcan en el futuro. Este muro de piedra es de unos 4 a 5 m de alto y unos 6 m de ancho y está revestido aguas arriba, con bloques mayores de piedra caliza. Los bloques de caliza tienen un peso promedio de unas 2 Toneladas. El trazado del muro sigue en forma diagonal hacia el sur, derivando los flujos hacia la calle Bulnes, que corre en sentido este-oeste dentro de la Población Covadonga.

Punto 15 Este punto se ubica en el zanjón por medio del cual se continúa la Quebrada El Toro Sur, al abandonar los cerros de la Cordillera de la Costa.

Dentro de este zanjón ha corrido un flujo que por las marcas que han quedado, ha alcanzado mínimo 3 a 3,5 m de alto, sin considerar el relleno que ha quedado en el fondo del zanjón, es decir hay que sumar el espesor del material depositado al término del flujo de detritos. Este zanjón debe tener unos 8 a 10 m de ancho y ha sido rellenado en parte por un depósito de flujo de detritos, similar al que se ha observado más abajo, en el sector de la hondonada. Este depósito está constituido por cascajos

angulosos de 2 a 5 hasta 10 cm, con algunos de ellos de tamaño mayor, que pueden alcanzar 30 a 40 cm. Es un material que en superficie presenta clastos solamente, pero que más abajo presenta además una matriz de granos más finos; (2 mm a 1 cm) con un contenido de arena, posiblemente eólica escaso, (no más allá del 5 a 10%) así como de arcilla, la cual es inferior al 5%. Todo parece indicar un flujo relativamente fluido que ha corrido casi como un río y con poco transporte de arenas eólicas, lo cual es concordante con lo que se observó en las fotos aéreas, relativo a la cantidad de arenas eólicas que existen en la hoya hidrográfica. Estos flujos de detritos han formado extensos depósitos a lo largo del todo el cauce que se desarrolla aguas arriba.

Punto 16 Este punto se ubica en el sector en que el curso de la Quebrada El Toro Norte hace abandono de los cerros de la Cordillera de la Costa e ingresa en la zona apical del cono que ha formado con sus depósitos.

Aquí se advierte que la quebrada es bastante amplia y que al salir de ella los flujos han corrido en forma repartida o laminar. Los flujos han bajado aparentemente sin un gran caudal, comparados con los de la Quebrada El Toro Sur. En los bordes rocosos de la quebrada existen algunas canteras de extracción de rocas, utilizadas aparentemente durante la construcción del muro de contención.

g) Quebrada El Ancla

Punto 17 Este punto se sitúa en el área de la desembocadura de la Quebrada del Ancla.

En el sector del camino de circunvalación se reconoce una zona donde el paso de los flujos de detritos han provocado erosión. La quebrada presenta numerosas canteras de extracción de roca, así como de procesamiento, molienda y almacenamiento de material, del cual queda todavía mucho material fragmentario formando especies de conchales de piedra, similares a los que observaron en la zona de Quebrada Baquedano.

El flujo de detritos alcanzó aquí una altura de unos 2 a 2,5 m. sobre el fondo de la quebrada, el cual es en esta parte muy irregular. Algunos derrumbes se han producido aparentemente con posterioridad al paso de los flujos de detritos; es posible que haya habido también derrumbes contemporáneos al paso de los flujos. Los depósitos de estos flujos de detritos están recubriendo en algunos sectores los clastos derivados de la explotación de canteras, dando eso la pauta de que estos flujos son muy nuevos, es decir que corresponden al fenómeno de Junio de 1991. Los depósitos de los flujos de detritos se presentan en parches delgados, con espesores de 1 a 1,5 m promedio y están constituidos por clastos volcánicos oscuros y angulosos de la

Formación La Negra, de 30 cm. de diámetro promedio, junto a una matriz arenosa a gravillosa de la misma composición, pero en un tamaño más fino. La matriz debe constituir un 40 a 50% del depósito y los clastos representan aproximadamente un 40%; hay además un porcentaje relativamente alto de arcilla, el cual se estima debe alcanzar un 10% del total del depósito. En la parte alta del depósito los clastos prácticamente desaparecen predominando la matriz, con escasos fragmentos mayores. Estos depósitos son mal estratificados y los clastos se disponen en una forma más caótica de lo que se ve en otros sectores, lo cual indicaría aparentemente una mayor viscosidad de los flujos que los depositaron.

En el fondo de la quebrada hay muchos bloques de roca caídos por derrumbes de laderas, lo cual representa un alto riesgo en el caso de ocurrencia de fenómenos similares en el futuro, puesto que deja bloques de 1 a 4 m de diámetro, los cuales podrían ser retomados por los flujos futuros.

En la parte baja se han construido obras de protección similares a las de la Quebrada Baquedano; es decir se ha instalado un tubo que desemboca en la calle Riquelme, situada directamente aguas abajo de la quebrada. En la parte superior del tubo se ha puesto una malla, relativamente delgada, que impide el paso de clastos superiores a un cierto tamaño. La parte alta del tubo está conectada a dos muros laterales que configuran un sistema de embudo el cual canalizaría los flujos en el futuro. Existen algunas instalaciones de procesamiento de materiales para áridos, las cuales han sido destruidas al parecer por el flujo de detritos de 1991.

El sector de la quebrada que continúa aguas arriba presenta una fuerte pendiente. De esta forma se llega hasta el sector del Salto donde prácticamente se ha desarrollado solo erosión como consecuencia del paso de los flujos de detritos.

h) Quebrada Bonilla

Punto 18 Este punto se ubica en la Quebrada Bonilla.

En esta quebrada los flujos de detritos descendieron por un zanjón cortado en depósitos de antiguos flujos de detritos, con niveles de arenas de dunas intercalados, los cuales han construido un cono. Los flujos de detritos de Junio de 1991 alcanzaron dentro del zanjón alturas de 2 a 2,5 m y han dejado delgados parches de sedimento. Estos corresponden fundamentalmente a arena gruesa y gravillas, con granos de formas angulosas a redondeadas, los cuales podrían corresponder a una mezcla entre arenas de duna y gravillas derivadas de coluvios o actividad fluvial. Estos depósitos presentan un contenido de arcilla del orden del 10 a 20% y clastos angulosos aislados de 10 a 40 cm de diámetros. En general la composición de los granos y clastos, es

de tipo lítico y corresponde a material que se derivó de la Formación La Negra. El flujo de detritos formó unas lagunitas en este sector las cuales se infiltraron y/o evaporaron.

Existen obras de protección en base a muros laterales, los cuales forman una especie de embudo destinado a canalizar los flujos de detritos futuros por el fondo de la quebrada, llevándolos hacia una calle que corre en sentido este-oeste inmediatamente al sur del eje del cono.

i) Quebrada Farellones

Punto 19 Este punto se ubica en la Quebrada Farellones.

Aquí el material y situación es similar a la de la Quebrada Bonilla. Los depósitos de los flujos de detritos están constituidas en este caso por gravillas de granos angulosos, productos de la descomposición de rocas, sin aportes eólicos al parecer.

En esta quebrada se han construido obras de protección similares a las de la Quebrada Bonilla.

j) Quebrada Salar del Carmen

Punto 20 Este punto se ubica en la Quebrada del Salar del Carmen.

Los depósitos de flujos de detritos reconocidos aquí están constituidos por gravillas y gravas, con clastos de formas angulosas y proveniencia exclusivamente de la Formación La Negra. El tamaño de los fragmentos varía entre 4 y 5 mm, con algunos de hasta 10 cm, predominan sin embargo los clastos entre 5 y 10 mm, la matriz es arenosa y constituye aproximadamente un 20% de la muestra. De acuerdo a las marcas observadas, los flujos en esta parte deben haber alcanzado un mínimo de 1 m de altura sobre el piso de la quebrada. A este valor habría sin embargo que sumarle el relleno existente en el fondo de la quebrada, el cual puede ser de unos 20 a 30 cm o más eventualmente. De esta forma los flujos podrían haber alcanzado 1,20 m en promedio. Estos flujos corrieron a todo lo ancho de la quebrada en algunos tramos, mientras que en otros se remitieron a uno de los lados del camino.

k) Quebrada La Cadena

Punto 21 Este punto se ubica en la Quebrada La Cadena.

Aquí se advierte que los flujos de detritos alcanzaron una altura sobre el cauce

actual de aproximadamente unos 3 m. Los depósitos de estos flujos están constituidos principalmente por arenas gruesas, con granos líticos de tamaño 1 a 4 mm y formas angulosas. Presentan un contenido de arcilla del orden del 5 a 10%, así como clastos aislados, que representan un 5% del depósito. Estos clastos son angulosos y proceden de la caída lateral de material proveniente de la explotación de canteras en la zona. El punto 21 se ubica en la zona de confluencia con otra quebrada menor, lo cual ha provocado la depositación de los flujos de detritos, con formación de una lámina de arcilla en su parte superior. Los depósitos son masivos internamente y se presentan en parches delgados, de unos 40 a 50 cm, con valores hasta 1 m como máximo. Estos parches se disponen sobre depósitos antiguos de flujos de detritos. En algunos sectores los granos llegan hasta unos 6 a 7 mm de diámetro, son todos angulosos, tabulares e irregulares en forma. En la parte superior se desarrolla además un nivel mas fino.

Punto 22 Quebrada La Cadena.

Presenta material similar al descrito en el punto anterior, que indica una altura de los flujos de detritos, de unos 2,5 m sobre el nivel actual del relleno de la quebrada. Se reconocen zonas de "remanso", con depositación del tipo "slackwater sedimentation". Los depósitos de flujos de detritos presentan clastos escasos, aislados, angulosos que constituyen de 5 a 20% del depósito. Aquí se explotaban gravas un poco más gruesas que corresponden a flujos de detritos más antiguos, las cuales presentan clastos de 2 y 5 cm tamaño promedio.

Hay obras de contención de tipo embudo que dirigen los flujos hacia una calle de la población El Salto y luego hacia abajo, en dirección a ferrocarriles.

l) Quebrada La Negra

Punto 23 Punto situado en la Quebrada La Negra.

Allí existen parches aislados, adosados a la roca, de material correspondiente al último flujo de detritos. Estos están integrados por arenas eólicas, con contenidos variables de clastos; de tal manera que en algunos sectores son arenas puras limpias, con un poco de sal y en otros presentan abundantes clastos angulosos, de la Formación La Negra. Las arenas eólicas corresponden a material llevado desde la costa hacia el interior por el viento y luego arrastrado por los flujos de detritos hacia la costa nuevamente. Estas arenas están compuestas principalmente por granos feldespáticos y cuarzosos, similares a las que se observaron en la zona de la Quebrada Huáscar. Estas arenas provienen de la erosión de rocas graníticas que afloran en el sector costero. La altura que alcanzó el flujo de detritos en esta parte, debe ser del orden de

los 3 m sobre el nivel base de rellenos de la quebrada, el cual está muy disturbado en estos momentos. El parche adosado es bastante delgado y presenta unos 20 a 30 cm en promedio de espesor; sus depósitos presentan un color oscuro, lo que les da el aspecto como si estuvieran húmedos, pero al parecer esto es efecto de la sal que retiene humedad y les da una cierta cohesión también.

Punto 24 En el sector de la desembocadura de la Quebrada La Negra en el mar.

Aquí el material está muy mezclado por movimiento de maquinarias en el fondo de la quebrada. El material del flujo de detritos original, corresponde aparentemente a una mezcla, en partes casi iguales, de arenas eólicas y gravillas, acarreadas por el flujo, no se sabe si separadamente o en conjunto. Este depósito es muy similar al material que se ha visto en el punto anterior, sólo que hay más gravilla en este sector. La gravilla presenta una granulometría de 2 a 6 mm.

5.5 Comentarios Finales

Las fuentes principales de materiales movilizados por los flujos de detritos corresponden por una parte a depósitos coluviales y por la otra a depósitos eólicos.

Los depósitos coluviales se presentan en forma de mantos superficiales o de conos de deyección, dispuestos en los sectores medios e inferiores de los relieves de la zona, rellenando de preferencia el fondo de los valles y quebradas. Estos depósitos constituyen importantes apilamientos, de origen local principalmente gravitatorio, los cuales se sitúan en el faldeo inferior y al pié de los relieves importantes de la zona. Se trata de depósitos diamícticos, tamaño de grano muy variado, que incluyen desde partículas finas hasta bloques, formas angulosas, bastante caóticos y sin estratificación interna, de composición simple, directamente relacionada con la constitución de la roca de la cual se originan por procesos de intemperización. En este caso la composición corresponde básicamente a lavas andesíticas oscuras de la Formación La Negra. Junto a estos depósitos coluviales que podemos considerar in situ, se encuentran los depósitos coluviales que han experimentado un removilización por antiguos fenómenos de flujos de detritos.

Los depósitos eólicos por su parte, están constituidos por granos de arena (2-1/16 mm), los cuales presentan una buena selección en tamaño y forma redondeadas. Están compuestos principalmente por granos claros de cuarzo y feldespatos, con un pequeño contenido de ferromagnesianos y granos líticos de la Formación La Negra. Los granos que constituyen estos depósitos se han formado en la zona costera por erosión y meteorización de rocas graníticas, siendo luego llevados

por el viento hacia el interior para dar lugar a mantos de arenas eólicas en las laderas del relieve y a acumulaciones importantes en el fondo de las quebradas, cubriendo eventualmente depósitos coluviales más antiguos.

El estudio de la zona ha permitido establecer que en el área situada al sur de la Quebrada El Toro, la fuente principal, casi exclusiva, de materiales disponibles para ser acarreados por los flujos de detritos corresponde a arenas eólicas, que constituyen un manto casi continuo en el relieve, rellenando además las depresiones y fondos de las quebradas. En el área situada al norte de la Quebrada El Toro por su parte, la fuente principal y prácticamente exclusiva, corresponde a depósitos coluviales y de antiguas corrientes de detritos o coluvios removidos, que han quedado en las laderas y fondos de las quebradas. Esta diferencia en la fuente y tipos de materiales se manifiesta claramente en los remanentes de los flujos de detritos generados durante el fenómeno de Junio de 1991, que han quedado tanto al sur como al norte de la Quebrada El Toro. Esta última presenta una situación mixta, puesto que si bien las laderas y fondo de la quebrada en su curso medio e inferior, están constituidas por material coluvial in situ y removilizado, en su curso superior, la ladera sur y el fondo de la quebrada, están ocupados por arenas eólicas que derraman desde la zona de la Quebrada El Caliche.

Además de la dos fuentes de materiales señaladas, ha existido en algunas quebradas un importante aporte de detritos que corresponden a material removido de antiguos flujos de detritos, durante obras de extracción de áridos para la construcción, así como de desechos de canteras de roca. Esta fuente ha tenido y tiene importancia en el caso de las Quebradas La Cadena, del Ancla y Baquedano Norte y Sur. En el caso de estas dos últimas, ha habido al parecer además fenómenos de remoción en masa, del tipo derrumbe o deslizamientos desde puntos ubicados en las laderas de las quebradas.

Las características de los materiales disponibles para ser movilizados por los flujos de detritos, ha tenido, junto al tamaño y superficie de cada hoyo, un papel importante en la determinación del comportamiento destructivo y nivel de daños provocados por las diferentes corrientes de detritos. En ese sentido se estima que desde el punto de vista del material disponible para ser movilizado, el mayor riesgo de daño lo han representado las quebradas situadas al norte de la Quebrada El Toro, y entre éstas, las Quebradas La Cadena, del Ancla y Baquedano Norte y Sur, especialmente estas tres últimas, en las cuales, como se ha señalado, el fenómeno parece haberse complicado con procesos de remoción en masa.

CAPITULO 6
ANALISIS HIDROLOGICO
E HIDRAULICO

6.1 Introducción

Una de las finalidades principales del presente estudio es caracterizar el evento ocurrido el 18 de Junio de 1991 en Antofagasta, no sólo desde puntos de vistas más generales como han sido los meteorológicos y geológicos-geomorfológicos, presentados en los dos capítulos anteriores de este informe, sino también desde una perspectiva más específica orientada a fines aplicados. Ello, con el objetivo último de establecer los fundamentos técnicos necesarios para formular recomendaciones orientadas a reducir los riesgos sobre la ciudad y la población, pretendiendo de este modo mitigar las consecuencias adversas de eventos catastróficos futuros similares al ocurrido en 1991.

Teniendo en consideración este objetivo y enmarcándose dentro de las limitaciones que determinan los antecedentes disponibles así como el conocimiento científico-técnico actual del tema, se ha llevado a cabo un análisis de tipo hidrológico e hidráulico del evento que permite por un lado realizar una caracterización, a modo de diagnóstico, de las corrientes de detritos ocurridas en las quebradas más importantes de la ciudad de Antofagasta el año 1991, y por otro, delinear un pronóstico que puede servir de base para analizar con mejor fundamento soluciones estructurales al problema.

El análisis hidrológico-hidráulico de la fase de diagnóstico está basado en los datos provenientes de otros estudios y de aquellos obtenidos como parte de la presente investigación. Se ha desarrollado empleando una metodología que se compone básicamente de dos etapas. La primera consiste en definir y cuantificar ciertos parámetros hidrológicos relevantes (precipitaciones, intensidades y coeficientes escorrentía), característicos del evento ocurrido en Antofagasta. Estos parámetros se confrontan y verifican con los resultados que se obtienen de un análisis hidráulico - mecánico fluvial independiente, realizado como parte de una segunda etapa, el cual aporta datos sobre caudales sólido-líquido de las corrientes de detritos, y de los caudales líquidos y concentraciones de sólidos asociados, en las distintas quebradas de la ciudad.

La fase de pronóstico constituye una extensión de los resultados y conclusiones que surgen del diagnóstico de la situación del 18 de Junio de 1991, en la cual se propone preliminarmente parámetros hidrológicos e hidráulicos que podrían servir de base para el prediseño de estructuras hidráulicas de control o encauzamiento de corrientes detríticas futuras.

6.2 Metodología

6.2.1 Generalidades

La metodología para llevar a cabo el análisis hidrológico-hidráulico fue ideada y desarrollada teniendo en cuenta la cantidad, calidad y confiabilidad de la información disponible, así como los métodos de cálculo posibles de utilizar considerando la complejidad y nivel de conocimientos que se tiene actualmente acerca de estos fenómenos. Ha debido quedar claro de lo expuesto en el Capítulo 2, dedicado a la revisión de los antecedentes bibliográficos sobre corrientes de barro, que estos fenómenos presentan características muy variadas y que los modelos existentes para predecir algunas de sus propiedades hidráulicas son bastantes aproximados y muchas veces aplicables solo a situaciones particulares.

Como se ha reseñado anteriormente, el análisis realizado comprende una fase de diagnóstico y una de pronóstico. En la primera de ellas se caracteriza específicamente las condiciones hidrológicas asociadas al evento de Junio de 1991 y los flujos detríticos ocurridos en las principales quebradas de Antofagasta. La fase de pronóstico se basa en los antecedentes que surgen de la etapa anterior, proponiéndose en ella las condiciones hidrológicas e hidráulicas que podrían caracterizar a eventos futuros similares al de 1991, pero asociados a períodos de retorno compatibles con la envergadura y requerimientos de seguridad de posibles obras hidráulicas a construir.

La fase de diagnóstico se compone de dos etapas, de modo que los análisis hidrológicos e hidráulicos se realizan cada uno en forma independiente en todas las cuencas, pero sus resultados se confrontan mutuamente para verificar o modificar supuestos de cálculo. El resultado de esta comparación conduce a adoptar finalmente valores para los distintos parámetros de cálculo, entre los que se encuentra la precipitación e intensidad de la tormenta, el coeficiente de escorrentía, la concentración volumétrica de sólidos y los caudales del flujo de detritos y de agua. Los análisis hidrológicos son absolutamente convencionales pero no así los análisis hidráulicos, ya que ellos se basan en el uso de modelos matemáticos teóricos o empíricos directos o adaptados de la literatura revisada.

En último término, los parámetros hidrológicos e hidráulicos se globalizan atendiendo a consideraciones de orden físico, lo que permite en una segunda fase del análisis, proponer condiciones y parámetros para el pronóstico de eventos de probabilidad de excedencia o período de retorno distinto al ocurrido en 1991.

6.2.2 Análisis Hidrológico

Comprende el análisis de la información pluviométrica histórica disponible en distintas estaciones, con el fin de determinar si existe un comportamiento típico de las lluvias en cuanto a su distribución espacial en las zona. Este análisis se realiza a nivel de precipitaciones anuales y de promedios anuales en las tres estaciones que existen en Antofagasta, que son de norte a sur: Cerro Moreno, Dirección General de Aguas (DGA) y Universidad Católica del Norte.

El análisis se hace extensivo también al temporal del 18 de Junio de 1991, estudiándose para él las distintas precipitaciones que originó en la ciudad y las intensidades según las diferentes duraciones que tuvieron los distintos episodios identificados en otros estudios. Las intensidades se calculan como valores medios a partir del tiempo total de la lluvia y también como intensidades medias máximas a partir de bloques del hietograma probable de la tormenta. Adicionalmente se analiza la posibilidad de que en las cuencas de menor tamaño, se haya alcanzado intensidades máximas asociadas a los tiempos de concentración respectivos.

Para efectos del cálculo de los tiempos de concentración se utiliza la fórmula de California, habiéndose descartado otras como la de Giandotti por no cumplir en este caso con los requisitos para su aplicación a las cuencas en estudio. En todo caso, esta fórmula muy probablemente no refleje las condiciones de las cuencas de Antofagasta donde el escurrimiento es el de una mezcla concentrada de sedimento y agua (es esperable que ella de origen a tiempos de concentración menores que los reales).

A partir de todo lo anterior, se estiman finalmente los caudales líquidos en las distintas cuencas utilizando la fórmula racional, para lo cual se supone a priori valores de los coeficientes de esorrentía basándose en las características de las cuencas: áreas y formas, pendientes medias, tipo de suelo, etc. Estos coeficientes se verifican más adelante comparando los caudales calculados con los que se obtiene del análisis hidráulico.

Con el objeto de hacer pronósticos preliminares, se realiza adicionalmente análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas diarias obtenidas de los registros de las estaciones Cerro Moreno y Universidad Católica del Norte, ampliadas con datos de la estación Portezuelo discontinuada el año 1968. Estos análisis se complementan con datos de intensidades inferidas a partir de la información consignada en otros estudios, empleando la fórmula de Grunsky.

6.2.3 Análisis Hidráulicos

Atendiendo a la disponibilidad de información referente a trazas de las corrientes de detritos en distintas secciones de las principales quebradas, se realiza estimaciones de los caudales totales de estas corrientes. Estas estimaciones sirven de base también para determinar los caudales líquidos asociados, suponiendo ciertos valores de las concentraciones volumétricas de sólidos.

El cálculo está basado en el uso del modelo del flujo turbulento de barro de Takahashi y en diversas fórmulas empíricas que se seleccionaron de la literatura. Entre estas últimas cabe mencionar la de Yablonskiy, la utilizada por la Oficina de Planificación Municipal de Pekín (OFPMP) y la fórmula empírica deducida de los lahares del volcán Mt. St Helens.

En la fórmula de Takahashi, la concentración de sólidos es un dato que hay que suponer de antemano, lo mismo que en la fórmula de OFPMP; la fórmula de Yablonskiy arroja una concentración aproximadamente constante pero la de Mt. St Helens es aplicable sólo a un rango del 70 a 80% de concentración.

Con el fin de verificar estas suposiciones del cálculo, se analiza los coeficientes de escorrentía obtenidos a partir de la división entre el caudal líquido obtenido de la aplicación de las fórmulas y el producto del área de la cuenca por la intensidad, es decir, empleando la fórmula racional con los coeficientes de escorrentía como incógnitas. Este análisis exige también adoptar determinadas intensidades de lluvia, razón por la cual no arroja una conclusión única.

Debido a lo anterior, el cálculo hidráulico se complementa con la estimación de coeficientes de rugosidad de las quebradas (haciendo uso de ecuación de Manning conocidos, el caudal, el factor de conducción hidráulica y la pendiente del cauce) y con una clasificación de las cuencas atendiendo a su área aportante, su pendiente media y su tiempo de concentración. La agrupación de las cuencas en diferentes categorías provee de elementos de juicio adicionales que permiten acotar en forma más fundamentada los coeficientes de escorrentía calculados, en tanto, las rugosidades permiten acotar los caudales totales y líquidos dentro de rangos compatibles con las características topográficas e hidráulicas de los cauces.

6.3 Características de las Cuencas en Estudio

6.3.1 Generalidades

El rasgo principal de la II Región lo constituye el desierto con sus diversas variedades de climas y con una configuración geográfica compleja. En la zona costera

se distinguen fundamentalmente dos rasgos del relieve: el primero es la Planicie Costera, definida entre la línea de la costa y la Cordillera de La Costa, que es un territorio llano con un ancho medio de 4 km y con un desarrollo longitudinal que se ve ocasionalmente interrumpido por la intrusión de la Cordillera de La Costa, la cual cae abruptamente al mar en la forma de acantilados; el segundo lo conforma la Cordillera de la Costa, rasgo geográfico de importancia que se presenta como un relieve masivo de aproximadamente 50 km de ancho medio y una altura promedio de 2000 msnm. Es una barrera natural que incide fuertemente en las características climatológicas de la región.

En el marco de esta estructura geográfica, se desarrolla en Antofagasta un conjunto de cuencas que constituyen las áreas naturales de drenaje de la zona occidental de la Cordillera de La Costa hacia el océano Pacífico. Estas cuencas presentan una gran variedad de formas y tamaños, con áreas que van desde menos de 1 km² hasta los 2200 km². Su red de drenaje la conforman quebradas de diversos grados de importancia que nacen al interior cordillerano y que en general se desarrollan en dirección este-oeste, desembocando en la actualidad la mayoría de ellas en zonas urbanas. La geometría que presentan sus cauces es variada, ya sea a lo largo de ellos o al compararlos entre sí. Los cauces en algunos casos son estrechos y bien encajonados con laderas abruptas, mientras que en otros son anchos y algo sinuosos, pero todos ellos tienen en común una fuerte a muy fuerte pendiente.

La composición del suelo de las cuencas en general muestra la presencia de finos (arenas eólicas) como una característica común de la zona, que a veces se mezcla con material granular grueso a medio, (formación de La Negra) salvo en algunos puntos localizados en quebradas donde aflora la roca fracturada o meteorizada.

6.3.2 Definición y Características Fisiográficas

Las cuencas de la ciudad de Antofagasta que se han considerados como parte del presente estudio abarcan desde La Chimba por el norte hasta el Huáscar por el sur.

La definición de sus superficies aportantes se ha hecho en las planchetas escala 1:50.000 del IGM que era la única cartografía disponible a la fecha de realización del estudio. Aparecen dibujadas en los planos de la Figs. 6.1 y 6.2 del presente capítulo.

Con el fin de caracterizar las cuencas, se determinó un conjunto de parámetros fisiográficos que las distinguen. Estos parámetros son los siguientes:

Area (A): superficie de una cuenca comprendida entre los límites que las definen.

Pendiente media (i): queda dada por la siguiente expresión:

$$i = \frac{\Delta H}{A} \left(\frac{l_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} l_k + \frac{l_n}{2} \right) \quad (6.1)$$

donde ΔH es el desnivel entre las curvas de nivel consideradas para la determinación de i, y l_k es la longitud de la curva de nivel k. Mientras que l_0 y l_n son las longitudes de las curvas de nivel inicial y final, respectivamente.

Densidad de drenaje (DD): Está dada por la razón entre la extensión de todos los cauces de la cuenca y el área de ellas.

$$DD = \frac{\sum_{k=1}^n l_k}{A} \quad (6.2)$$

Perímetro divisorio (PD): Longitud del límite que define el área de la cuenca.

Cota Media (CM): cota a la cual se asocia el 50% de la superficie de la cuenca. Se obtiene a partir de las curvas hipsométricas.

Longitud del cauce principal (LCP): Longitud del cauce de mayor importancia de la cuenca.

En la Tabla 6.1 se tabula el valor de los parámetros descritos para las cuencas de la zona de Antofagasta que han sido consideradas en este estudio.

6.4 Estudio de las Precipitaciones

6.4.1 Generalidades

El presente punto tiene como objetivo caracterizar hidrológicamente el evento ocurrido en Antofagasta en la madrugada del día 18 de Junio de 1991 y analizar, en la medida de lo posible, la frecuencia que puede atribuirse a la ocurrencia de este tipo de eventos en la II Región, en particular en esta ciudad.

Para lograr lo anterior, luego de un análisis de la información básica disponible en la región (ver Fig 6.3), el estudio se divide en dos etapas. La primera, está enfocada a la determinación de las intensidades máximas de lluvia, en quebradas de Antofagasta, durante el evento del día 18 de junio de 1991, con el fin de determinar el máximo caudal que pudo haber escurrido por cada una de éstas. En la segunda etapa desarrollada, fundamentalmente en base a la información pluviométrica

TABLA 6.1: CARACTERISTICAS FISIOGRAFICAS DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA

N	Cuencas	A (km ²)	PD (km)	P	L (km)	DD (1/km)	CM (m.s.n.m.)
1	La Chimba	25.6	22.5	0.292	9.5	0.81	762
2	Rocas	1.8	8.0	0.271	2.0	1.12	564
3	Club Hípico	3.2	10.5	0.382	4.0	1.27	727
4	Bonilla	6.7	1.2	0.302	4.0	0.86	521
4a	Bonilla Norte	3.4	10.0	0.302	2.0	0.59	550
4b	Bonilla Sur	3.3	11.8	0.338	4.0	2.12	500
5	Farellones	3.8	12.5	0.263	5.0	1.25	564
6	Salar del Carmen	33.2	36.5	0.244	8.0	0.49	633
6a	Salar del Carmen N2	6.9	15.5	0.254	6.0	0.87	736
7	La Cadena	21.0	22.0	0.200	9.0	0.78	607
8	El Ancla	1.3	6.0	0.076	2.0	1.52	315
8a	El Ancla Norte	0.1	1.5	0.138	0.5	5.00	270
8b	El Ancla Sur	1.2	6.0	0.170	2.0	1.67	370
8-9.1	Riquelme	0.2	2.0	0.244	0.9	4.50	400
8-9.2	Baquedano	0.6	4.0	0.308	1.2	2.00	410
8-9.3	Uribe	0.5	4.0	0.278	1.3	0.50	440
9	El Toro	3.2	10.5	0.304	3.5	1.08	467
10	Caliche	2.2	6.5	0.180	2.0	0.91	358
10a	Caliche Norte	0.2	2.0	0.288	0.7	3.50	150
10b	Caliche Sur	2.0	6.5	0.206	2.0	1.00	360
11	La Negra	2208.0	279.0	0.148	99.0	0.54	1275
1*	Sobre Grande	251.6	6.5	0.125	30.0	0.91	1120
2*	Del Guay	152.0	6.2	0.125	16.0	0.50	1100
3*	Remiendos	567.8	123.0	0.140	42.0	0.40	1271
4*	Grande	443.7	108.5	0.177	18.0	0.74	1271
5*	Intermedia (Q.Mateo)	792.9	175.0	0.146	60.0	0.09	1000
11-12	U. de Antofagasta	1.2	4.5	0.156	1.9	1.58	290
12	Jardines del Sur	9.2	14.0	0.127	5.6	0.98	426
13	El Huascar	2.7	8.5	0.090	3.8	1.41	330

Nota : Todas las cuencas se indican en el plano de Fig. 6.1, salvo las anotadas por * que pertenecen a la cuenca de la Negra y que se definen en el plano de la Fig. 6.2.

disponible en la región de Antofagasta, se intenta definir curvas intensidad-frecuencia que puedan servir de base para inferir la intensidad media de la precipitación asociada a la ocurrencia de eventos futuros.

6.4.2 Análisis de la Información Histórica Disponible

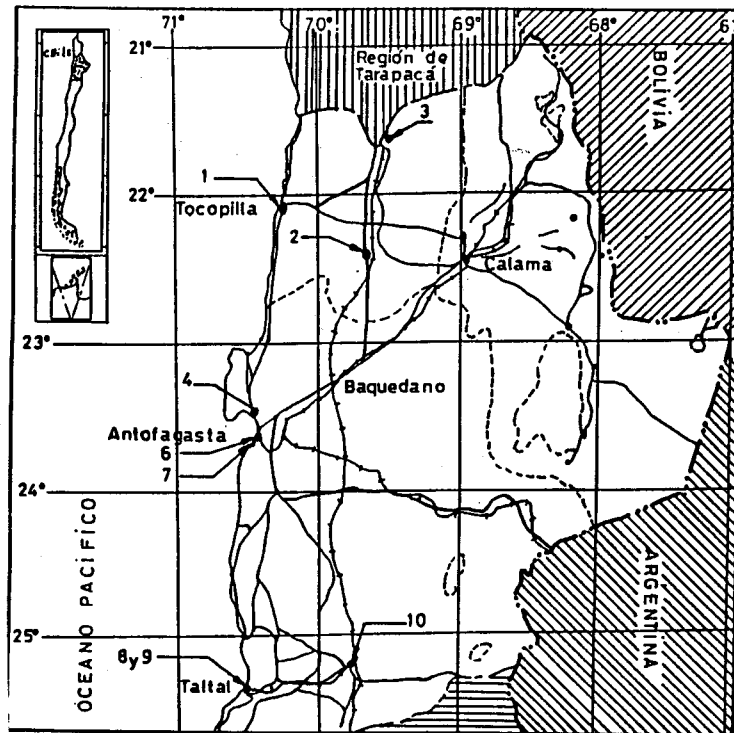
De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, la información pluviométrica disponible en las zonas en estudio es escasa. Tal como se desprende del diagrama de barras que se presenta en la Fig 6.4, existen muchos años sin información ya que algunas estaciones se han suprimido y luego se han reinstalado; tampoco existen descripciones claras y concretas en cuanto a la ubicación de algunas estaciones. Se aprecia también que, en general, la información no es concurrente en el tiempo.

La estadística de cada una de estas estaciones, presentadas en el Anexo III, permite inferir como precipitación media anual en las estaciones de interés, para todo el período en que se dispone de información, aquellos valores que se indican en la Tabla 6.2.

TABLA 6.2 PRECIPITACION MEDIA ANUAL II REGION ENTRE TALTAL Y TOCOPILLA

ESTACION	Nº AÑOS	P (mm)
TOCOPILLA	18	2,83
Co MORENO	23	2,95
PORTEZUELO	59	4,70
DGA ANTOFAGASTA	13	5,51
U.CATOLICA DEL NORTE	24	4,25
TALTAL	29	17,85

Al comparar las precipitaciones medias anuales en las estaciones de la ciudad de Antofagasta (Co. Moreno, Portezuelo, DGA y U. Católica del Norte) se aprecia que Co. Moreno presenta precipitaciones menores. En períodos concurrentes (1979-1991) las tres estaciones que poseen información muestran que la precipitación media anual aumenta hacia el sur, tal como se indica en la Tabla 6.3. Sin embargo, esta tendencia se invierte en algunos años, según se aprecia en la Fig 6.5, donde se observa variaciones significativas en los valores de la precipitación anual registrada en Co. Moreno y la Universidad Católica del Norte.



- | | |
|----------------|---------------------------|
| 1 Tocopilla | 6 DGA Antofagasta |
| 2 Coya Sur | 7 Univ Católica del Norte |
| 3 Quillagua | 8 Taltal |
| 4 Cerro Moreno | 9 Taltal |
| 5 Portezuelo | 10 Catalina |

Fig 6.3 Plano de Ubicación de las Estaciones Pluviométricas

ESTACION	LAT.	LONG.	ALT.	1900	10	20	30	40	50	60	70	80	90
TOCOPILLA	22°05'	70°13'	16				■		■				
COYA SUR	22°24'	69°38'	1290				■		■				
QUILLAGUA	21°37'	69°32'	802									■	■
Co. MORENO	23°26'	70°28'	119									■	■
PORTEZUELO	?	?	?									■	■
DGA ANTOFOGASTA	23°36'	70°23'	50		■	■	■	■	■	■	■	■	■
U.CATOLICA DEL NORTE	23°40'	70°24'	?									■	■
TALTAL	25°25'	70°34'	39			■	■	■				■	■
TALTAL	25°25'	70°34'	9									■	■
CATALINA	25°13'	69°43'	2180								■		■

Fig. 6.4: Diagrama de Barras Información Fluvimétrica. II Región

También en las tormentas individuales se observa una variabilidad espacial importante, la que en general podría explicarse por la presencia de actividad convectiva, semejante a la observada en el evento del 18 de Junio de 1991. En la Fig 6.6 se grafica esta variación espacial, según los registros disponibles en estaciones de la zona costera que abarca desde Tocopilla (TOC) hasta Taltal (TAL) en algunos temporales de importancia.

TABLA 6.3 PRECIPITACION MEDIA ANUAL (1979-1991) EN ANTOFAGASTA

ESTACION	P (mm)
Co. Moreno	2,58
DGA	5,51
U.Católica del Norte	6,46

En la Fig 6.7 se muestra la relación que existe en algunos eventos de precipitación entre el valor diario registrado en las estaciones Co. Moreno y Universidad Católica del Norte, obtenida en base a la información de aquellos eventos de mayores precipitaciones en la estación U. Católica del Norte. Los registros muestran también la ocurrencia de algunos eventos que no son registrados en todas las estaciones; así por ejemplo, mientras en Enero de 1983 la precipitación es nula en Co. Moreno, en la estación de la DGA se registran 6 mm y en la de la Universidad Católica del Norte (UCN) sólo 0,8 mm, en cambio en Agosto de 1976 en Co. Moreno se informan 9,1 mm de agua caída y en la UCN no se registra precipitación. En consecuencia, podría decirse que en los eventos de tormenta no existe un comportamiento único en cuanto a la distribución de precipitación, ya que en algunos casos las magnitudes mayores se registran en Antofagasta, en tanto en otros casos al sur y en otros al norte de ésta.

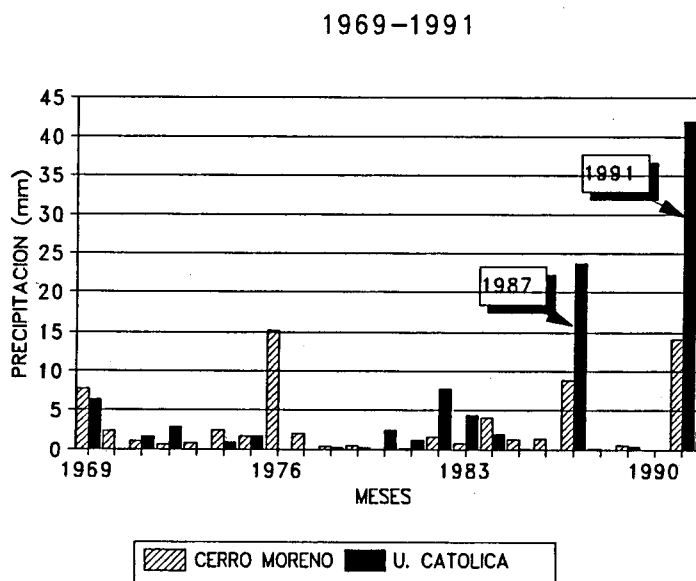


Fig 6.5 Precipitaciones Anuales en Antofagasta

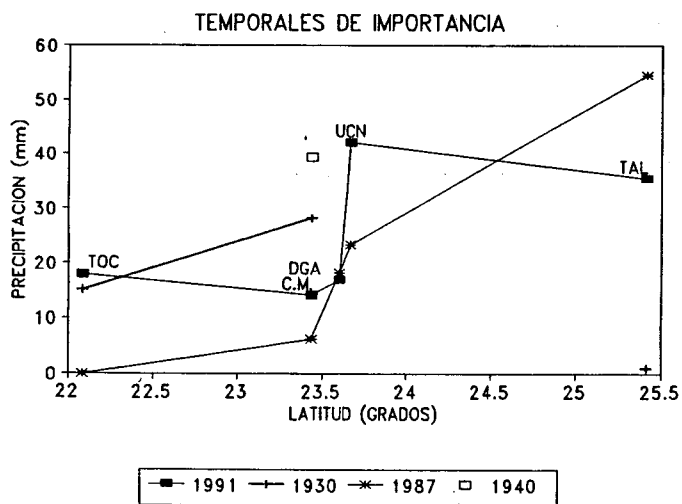


Fig 6.6 Variación Latitudinal de la Precipitación II Región

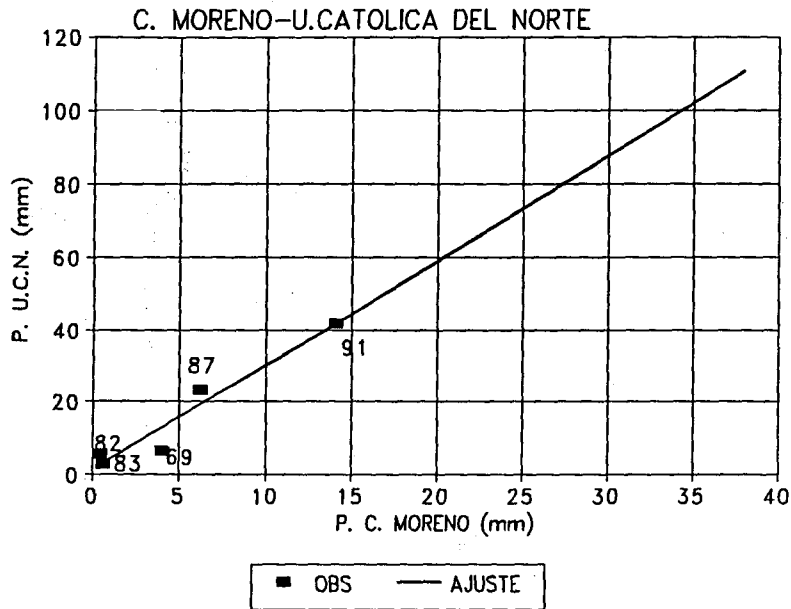


Fig 6.7 Comparación entre Precipitaciones UCN - Co Moreno

6.4.3 Análisis de la Tormenta del 18/6/91

La información pluviométrica disponible para esta tormenta en la zona de Antofagasta, corresponde a los registros de las estaciones de la DGA y de la U.Católica del Norte (U.C.N). Los valores de las precipitaciones observados el 18 de Junio de 1991 se muestran en la Tabla 6.4.

TABLA 6.4: PRECIPITACION DEL 18/6/91 EN ANTOFAGASTA

Estación	Precipitación (mm)
DGA	17
UCN	42

La variabilidad espacial que se observa en los precipitaciones puede ser atribuida a su carácter convectivo, como ya ha sido señalado. Por otra parte, el análisis comparativo de las precipitaciones observadas en Cerro Moreno y UCN (Fig 6.5),

permite apreciar la existencia de una variabilidad a nivel histórico que es especialmente notoria durante las tormentas intensas. Por estas razones es posible descartar un error sistemático de medición.

Si bien la duración de la tormenta se ha estimado en 3 hrs., los antecedentes disponibles indican que del total de agua caída registrada en la UCN, 5 mm cayeron en la primera hora y media, mientras que el resto (37 mm), lo hicieron en la hora y media restante (Araya (1991); Covarrubias et al. (1991), Karzulovic (1991), Skorin (1991) y Van Sint Jan et al. (1991))

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se ha supuesto una variación lineal de las precipitaciones en dirección norte-sur, entre las estaciones de la DGA y la UCN. Por medio de esta distribución espacial, se hace una estimación de las precipitaciones e intensidades de lluvia para cada cuenca considerada en el estudio, calculadas estas últimas a partir de 3 hrs (duración total), de 1.5 hrs (bloque de lluvias de mayor intensidad) y del tiempo de concentración de cada cuenca.

En las Tablas 6.5 y 6.6 se incluye las áreas aportantes (A_p), longitudes de cauce (L_c), pendiente media del cauce (i) y tiempos de concentración (T_c) de las cuencas referidas a cada una de las secciones de medición de trazas del eje hidráulico de la corriente de barro. La primera de estas tablas incluye las cuencas definidas en el presente estudio, en tanto en la segunda se detallan las cuencas definidas en el estudio de Skorin Ingenieros (1991).

El tiempo de concentración ha sido estimado de acuerdo a la fórmula de California, dada por:

$$T_c = 0,95 \left(\frac{L_c^3}{H} \right)^{0,385} \quad (6.3)$$

donde T_c es el tiempo de concentración (horas), L_c la longitud del cauce principal (km) y H el desnivel (m) entre el punto de inicio del cauce y el punto de interés. Como se ha señalado anteriormente, este tiempo es sólo referencial por cuanto se estima que no refleja las condiciones reales de cuencas áridas como las de Antofagasta donde las corrientes sólido-líquidos concentradas y difusas son más lentas que las de agua pura.

TABLA 6.5 PARAMETROS FISIOGRAFICOS Y TIEMPOS DE CONCENTRACION PARA CUENCAS DEFINIDAS EN EL PRESENTE ESTUDIO

Quebradas	Tipo	Ap (km ²)	Lc (Km)	H (m)	ic (%)	Tc (hr)
La Cadena Sector Alto	CZ1	6.02	5.5	500	9.1	0.62
La Cadena Antes Afite N 1	CZ1	6.80	6.0	550	9.2	0.66
Afluente N1	BZ1	4.00	4.5	410	9.1	0.53
Afluente N2	BY2	2.67	4.0	420	10.5	0.46
Afluente N3	BY2	2.33	1.5	180	12.0	0.21
Afluente N4	BY2	3.23	2.5	300	12.0	0.30
S. Del Carmen N2-B	CZ1	13.07	3.9	260	6.8	0.53
S. Del Carmen N2 Sector Alto	CY1	5.40	3.0	200	6.7	0.44
S. Del Carmen Afluente N1	CY1	6.21	3.3	300	9.1	0.42
S. Del Carmen Afluente N2	AY2	0.52	1.0	150	15.0	0.14
S. Del Carmen N2	CZ1	13.89	4.2	290	7.0	0.55
S. Del Carmen o Caracoles	CZ2	9.95	6.0	650	10.8	0.62
El Toro	BY2	3.82	3.0	450	15.0	0.32
El Ancla	BY1	1.25	2.5	250	10.0	0.33
Del Guay	DZ1	152.00	22.0	570	2.6	3.00
De Mateo (ag. arr. Del Guay)	DZ1	400.00	18.0	270	1.5	3.00
De Mateo (ag. ab. Del Guay)	DZ1	552.00	18.0	270	1.5	3.00
De Mateo	DZ1	204.00	15.5	190	1.2	3.00
La Negra (en vertientes)	DZ1	255.00	19.5	370	1.9	3.00
La Negra (Sector Terminal 1)	DZ1	255.00	20.5	410	2.0	3.00
La Negra (Sector Terminal2)	DZ1	255.00	20.5	410	2.0	3.00

Ap: Area Aportante

Lc: Longitud del cauce

H: Desnivel entre el inicio del cauce
y el punto de interes

ic: Pendiente del cauce

Tc: Tiempo de concentracion

TABLA 6.6 PARAMETROS FISIOGRAFICOS Y TIEMPOS DE CONCENTRACION PARA CUENCAS ADICIONALES DEFINIDAS POR SKORIN INGENIEROS (1991)

Quebradas	Secciones	Tipo	A (km ²)	Ap (km ²)	L (Km)	Lc (Km)	H (m)	lc (%)	Tc (hr)
Club Hípico	S1	BY2	3.20	2.82	4.2	2.5	400	18.0	0.27
	S2	BY3		3.01		3.0	600	20.0	0.29
	S3	BY2		3.11		3.5	680	19.4	0.33
Bonilla Norte	S1	BX3	3.40	3.24	2.0	1.0	340	34.0	0.10
	S2	BY3		3.40		1.4	400	28.8	0.14
	S3	BY3		3.40		1.7	410	24.1	0.17
Bonilla Sur	S1	BY2	3.30	2.83	3.2	2.0	370	18.5	0.22
	S2	BY2		3.06		2.8	490	17.5	0.28
Farellones	S1	BY1	3.80	2.71	5.8	4.0	400	10.0	0.47
	S2	BZ1		3.26		4.4	450	10.2	0.50
	S3	BZ2		3.71		5.4	620	11.5	0.58
Salar del Carmen	S1	CZ2	33.20	17.08	8.2	6.0	660	11.0	0.62
	S2	CZ1		13.00		4.5	300	6.7	0.60
	S3	CZ1		30.25		7.0	360	5.1	0.93
La Cadena	S1	CZ1	22.00	16.77	9.6	6.0	650	8.1	0.87
	S2	CZ1		17.03		6.4	700	8.3	0.89
	S3	CZ1		21.56		9.2	750	8.2	0.96
El Ancla Norte	S1	AX3*	0.10	0.40	0.5	0.3	150	50.0	0.03
	S2	AX3		0.60		0.6	150	25.0	0.08
	S3	AY2		0.10		0.9	150	16.7	0.12
El Ancla Sur	S1	BY1	1.20	1.05	2.0	2.0	200	10.0	0.28
	S2	BY2		1.10		2.2	250	11.4	0.28
	S3	BY1		1.13		2.4	250	10.4	0.31
Riquelme	S1	AX2	0.20	0.10	0.9	0.3	50	16.7	0.05
	S2	AX3		0.13		0.5	150	30.0	0.06
	S3	AX3		0.20		0.7	220	31.4	0.08
Baquedano	S1	AX2	0.60	0.41	1.2	0.6	100	16.7	0.09
	S2	AX3		0.50		0.8	200	25.0	0.10
Uribe	S1	AX3	0.50	0.25	1.3	0.5	100	20.0	0.07
	S2	AX3		0.34		0.7	150	21.4	0.09
	S3	AY3		0.43		0.9	200	22.2	0.11
El Toro	S1	BY2	3.20	1.27	3.8	2.0	300	15.0	0.24
	S2	BY2		1.45		2.4	370	15.4	0.27
	S3	BY2		1.81		2.8	430	15.4	0.30
Caliche Norte	S1	AX3*	0.20	0.07	0.7	0.2	150	75.0	0.02
	S2	AX3*		0.13		0.5	210	42.0	0.05
	S3	AX3		0.20		0.7	250	35.7	0.08
Caliche Sur	S1	AX1	2.00	0.72	1.5	0.5	50	10.0	0.09
	S2	AY2		0.82		0.9	150	16.7	0.12
	S3	BY2		2.00		1.5	200	13.8	0.19
La Negra	S1	DZ1	2208	255.00		19.0	230	1.2	3.00
	S2	DZ1		255.00		19.5	250	1.3	3.00
	S3	DZ1		255.00		20.0	265	1.3	3.00
U de Antofagasta	S1	AY1	1.20	1.00	1.9	1.0	100	10.0	0.16
	S2	BY1		1.11		1.4	150	10.7	0.20
Jardin del Sur	S1	BY1	9.20	2.54	6.2	3.0	260	8.7	0.40
	S2	BY1		2.69		3.5	330	9.4	0.43
	S3	CZ1		9.13		6.2	450	7.3	0.74
El Huascar	S1	BY1	2.70	1.76	3.8	2.2	190	8.6	0.31
	S2	BY1		2.43		3.0	250	8.3	0.40
	S3	BY1		2.63		3.5	310	8.8	0.44

Adicionalmente se clasifican las cuencas de acuerdo a su tamaño, tiempo de concentración y pendiente media del cauce, en base a los siguientes criterios:

i) Area aportante

- Tipo A: $A_p \leq 1 \text{ km}^2$
- B: $1 \text{ km}^2 < A_p < 5 \text{ km}^2$
- C: $5 \text{ km}^2 \leq A_p < 100 \text{ km}^2$
- D: $A_p \geq 100 \text{ km}^2$

ii) Tiempo de concentración

- Tipo X: $T_c \leq 0,1 \text{ hr}$
- Y: $0,1 \text{ hr} < T_c < 0,5 \text{ hr}$
- Z: $T_c \geq 0,5 \text{ hr}$

iii) Pendiente media del cauce

- Tipo 1 : $i \leq 10\%$
- 2 : $10\% < i < 20\%$
- 3 : $i \geq 20\%$
- 3* : $i >> 20\%$

En las Tablas 6.7 y 6.8 se indican las precipitaciones e intensidades medias tomando como base las duraciones de 3 hr y de 1,5 hr, de acuerdo a los antecedentes de la UCN. Para el cálculo se ha considerado que la precipitación observada en la estación DGA fue del orden de 15 mm, lo cual resulta de descontar el porcentaje de agua caída en la UCN durante la primera hora y media. También se incluye la intensidad obtenida para el tiempo de concentración de las cuencas como dato referencial.

El uso de una u otra intensidad en el análisis hidrológico, depende de las características de las cuencas. En aquellas que presentan áreas pequeñas con pendientes fuertes y tiempos de concentración bajos, resultaría lógico suponer la intensidad media asociada al bloque de 1,5 hr, mientras que en el resto sería más apropiado utilizar la intensidad media correspondiente a la precipitación caída en 3 horas.

TABLA 6.7 PRECIPITACIONES E INTENSIDADES DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA. ESTUDIO SKORIN (1991)

Quebradas	Secciones	Tipo	Pr(1.5 hr) (mm)	Pr(3 hr) (mm)	Im(1.5 hr) (mm/hr)	Im(3 hr) (mm/hr)	I(Tc) (mm/hr)
Club Hípico	S1	BY2	14.98	17.00	9.98	5.67	18.80
	S2	BY3	14.98	17.00	9.98	5.67	18.29
	S3	BY2	14.98	17.00	9.98	5.67	17.14
Bonilla Norte	S1	BX3	14.98	17.00	9.98	5.67	30.93
	S2	BY3	14.98	17.00	9.98	5.67	28.27
	S3	BY3	14.98	17.00	9.98	5.67	23.60
Bonilla Sur	S1	BY2	14.98	17.00	9.98	5.67	21.06
	S2	BY2	14.98	17.00	9.98	5.67	18.31
Farellones	S1	BY1	14.98	17.00	9.98	5.67	14.33
	S2	BZ1	14.98	17.00	9.98	5.67	13.67
	S3	BZ2	14.98	17.00	9.98	5.67	13.11
Salar del Carmen	S1	CZ2	14.98	17.00	9.98	5.67	12.49
	S2	CZ1	14.98	17.00	9.98	5.67	12.67
	S3	CZ1	14.98	17.00	9.98	5.67	10.16
La Cadena	S1	CZ1	30.57	34.70	20.38	11.57	21.52
	S2	CZ1	30.57	34.70	20.38	11.57	21.22
	S3	CZ1	30.57	34.70	20.38	11.57	20.41
El Ancla Norte	S1	AX3*	27.75	31.50	18.50	10.50	98.12
	S2	AX3	27.75	31.50	18.50	10.50	65.75
	S3	AY2	27.75	31.50	18.50	10.50	52.02
El Ancla Sur	S1	BY1	27.75	31.50	18.50	10.50	34.67
	S2	BY2	27.75	31.50	18.50	10.50	34.26
	S3	BY1	27.75	31.50	18.50	10.50	32.58
Riquelme	S1	AX2	29.16	33.10	19.44	11.03	83.45
	S2	AX3	29.16	33.10	19.44	11.03	76.76
	S3	AX3	29.16	33.10	19.44	11.03	66.04
Baquedano	S1	AX2	30.57	34.70	20.38	11.57	66.99
	S2	AX3	30.57	34.70	20.38	11.57	64.84
Uribe	S1	AX3	32.07	36.40	21.38	12.13	78.06
	S2	AX3	32.07	36.40	21.38	12.13	69.51
	S3	AY3	32.07	36.40	21.38	12.13	63.54
El Toro	S1	BY2	36.30	41.20	24.20	13.73	49.03
	S2	BY2	36.30	41.20	24.20	13.73	45.95
	S3	BY2	36.30	41.20	24.20	13.73	43.27
Caliche Norte	S1	AX3*	37.00	42.00	24.67	14.00	165.34
	S2	AX3*	37.00	42.00	24.67	14.00	103.92
	S3	AX3	37.00	42.00	24.67	14.00	86.49
Caliche Sur	S1	AX1	37.00	42.00	24.67	14.00	78.84
	S2	AY2	37.00	42.00	24.67	14.00	69.37
	S3	BY2	37.00	42.00	24.67	14.00	55.67
La Negra	S1	DZ1	37.00	42.00	24.67	14.00	14.00
	S2	DZ1	37.00	42.00	24.67	14.00	14.00
	S3	DZ1	37.00	42.00	24.67	14.00	14.00
U de Antofagasta	S1	AY1	37.00	42.00	24.67	14.00	60.37
	S2	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	53.74
Jardin del Sur	S1	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	38.47
	S2	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	36.85
	S3	CZ1	37.00	42.00	24.67	14.00	28.12
El Huascar	S1	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	43.32
	S2	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	38.18
	S3	BY1	37.00	42.00	24.67	14.00	36.41

TABLA 6.8 PRECIPITACIONES E INTENSIDADES DE LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA. PRESENTE ESTUDIO

Quebradas	Tipo	Pr(1.5 hr) (mm)	Pr(3 hr) (mm)	Im(1.5 hr) (mm/hr)	Im(3 hr) (mm/hr)	I(Tc) (mm/hr)
La Cadena Sector Alto	CZ1	30.57	34.70	23.13	11.57	25.40
La Cadena Antes Afite N 1	CZ1	30.57	34.70	23.13	11.57	24.61
Afluente N1	BZ1	30.57	34.70	23.13	11.57	27.46
Afluente N2	BY2	30.57	34.70	23.13	11.57	29.53
Afluente N3	BY2	30.57	34.70	23.13	11.57	44.19
Afluente N4	BY2	30.57	34.70	23.13	11.57	36.30
S. Del Carmen N2-B	CZ1	14.98	17.00	11.33	5.67	13.48
S. Del Carmen N2 Sector Alto	CY1	14.98	17.00	11.33	5.67	14.81
S. Del Carmen Afluente N1	CY1	14.98	17.00	11.33	5.67	15.15
S. Del Carmen Afluente N2	AY2	14.98	17.00	11.33	5.67	26.42
S. Del Carmen N2	CZ1	14.98	17.00	11.33	5.67	13.19
S. Del Carmen o Caracoles	CZ2	14.98	17.00	11.33	5.67	12.45
El Toro	BY2	36.30	41.20	27.47	13.73	41.95
El Ancla	BY1	27.75	31.50	21.00	10.50	31.82
Del Guay	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
De Mateo (ag. arr. Del Guay)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
De Mateo (ag. ab. Del Guay)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
De Mateo	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
La Negra (en vertientes)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
La Negra (Sector Terminal 1)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00
La Negra (Sector Terminal2)	DZ1	37.00	42.00	28.00	14.00	14.00

6.4.4 Análisis de Frecuencias

La longitud de la información disponible en las estaciones Co. Moreno y UCN, que abarca 23 años de estadística, posibilita la derivación de las curvas de frecuencias correspondientes para la precipitación máxima diaria, la que prácticamente coincide con el valor mensual.

Para el análisis se adopta, la serie anual de máximos, mostrada en la Tabla 6.9, que presenta 2 valores nulos en la estación Co. Moreno y 7 valores nulos en la estación UCN. Los resultados obtenidos sin incorporar información adicional a la de la muestra, se presentan en la Fig 6.8. Se observa una clara diferencia entre las curvas de ambas estaciones a partir del período de retorno 7 años, lo que conduce a inferencias distintas para el período de retorno $T = 100$ años: $P_{24}^{100} = 47$ mm con la de Co. Moreno y $P_{24}^{100} = 180$ mm con la de la UCN.

Con el fin de utilizar la información disponible en la estación Portezuelo y suponiendo que el valor mensual es igual al diario, para las tormentas menores (ver Tabla 6.10), se combina esta información con la disponible en las dos estaciones anteriormente analizadas, considerando que las muestras son homogéneas. En las Figs 6.9 y 6.10, donde se presenta los resultados obtenidos, se aprecia que el uso de la información conjunta conduce, a valores de P_{24}^{100} , 42 y 56,5 mm, reduciéndose las magnitudes y la diferencia entre los valores indicados anteriormente. De acuerdo con lo anterior, se estima que la información registrada en cualquiera de las estaciones de Antofagasta (Co. Moreno, DGA, UCN) debe ser usada para efectos de diseño, en conjunto con la información más antigua de la estación Portezuelo.

Sobre la base de la información consignada por Karzulovic (1991) en relación a las duraciones de los diez mayores temporales ocurridos desde 1903, que se presenta en la Tabla 6.11, es posible inferir las intensidades medias atribuibles a estos eventos, para cada una de esas duraciones. Tal como se aprecia en dicha tabla, la menor duración (3 horas) corresponde a la del evento de Junio de 1991 por lo que se estimó conveniente referir las intensidades medias de todos los eventos a dicha duración. Para ello se utilizó la fórmula de Grunsky:

$$I_{3,1} = I_{D,1} (D_i/3)^{0,5} \quad (6.4)$$

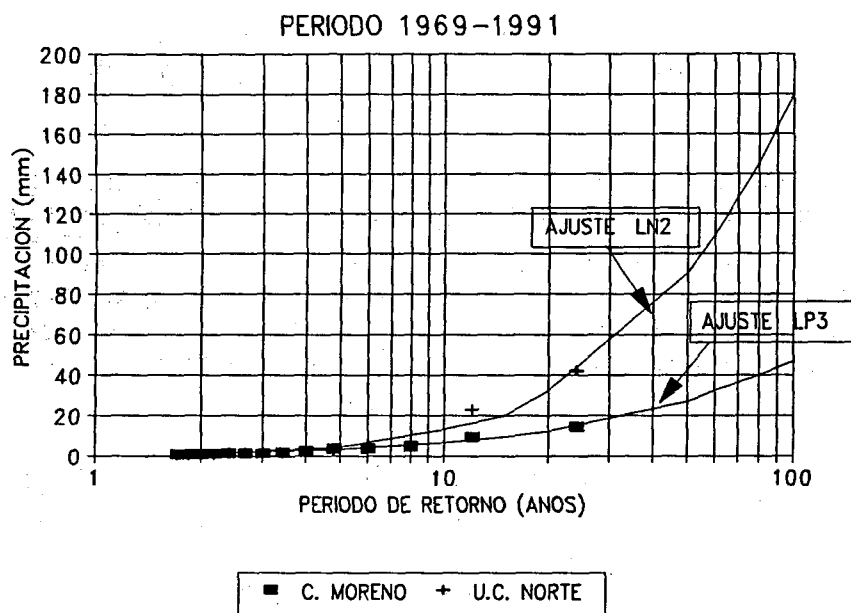


Fig 6.8 Curvas de Frecuencia

TABLA 6.9 PRECIPITACION DIARIA MAXIMA ANUAL (mm)

AÑO	Co. MORENO	UCN	AÑO	Co. MORENO	UCN
1969	3,7	6,4	1981	0,2	1,2
1970	1,6	0,0	1982	0,8	5,5
1971	1,1	1,2	1983	0,6	2,8
1972	0,5	1,5	1984	3,5	0,8
1973	0,8	0,0	1985	1,1	0,1
1974	2,3	0,6	1986	0,6	0,0
1975	1,2	1,7	1987	4,3	22,8
1976	9,1	0,0	1988	0,2	0,0
1977	1,0	0,0	1989	0,5	0,4
1978	0,4	0,3	1990	0,0	0,0
1979	0,4	0,3	1991	14,1	42,0
1980	0,0	2,0			

siendo $I_{D,i}$ la intensidad media máxima de duración D en el evento i y D_i la duración del evento i .

En la Tabla 6.12 se indican los valores de intensidades medias máximas obtenidas, considerando para el año 1991 la información registrada tanto en la estación de la Dirección General de Aguas como en la estación perteneciente a la Universidad Católica del Norte (UCN). Junto a estos valores se indica el período de retorno asociado, lo que permite trazar las curvas de frecuencia que se presentan en las Figs 6.11 y 6.12. Se aprecia que al considerar la información de precipitación registrada en la DGA para el año 1991, resulta una intensidad menor que en el evento de Junio de 1940, en el cual la magnitud de las corrientes de barro informada es de menor importancia. Al usar el registro de la UCN, ambas informaciones resultan concordantes.

Los antecedentes anteriores señalan que en un temporal en que al cabo de 3 horas de duración la intensidad media máxima resulta del orden de 4 mm/hr, se iniciarían corrientes y que, en promedio éstas ocurrirían 1 vez en 20 años. Para 1 hora, usando la fórmula de Grunsky, se obtiene que una intensidad media del orden de 6,9 mm/hr, daría origen a corrientes detríticas.

Finalmente, se concluye que para efectos de diseño debería considerarse la curva de frecuencias que se obtiene con la información registrada en UCN (Fig 6.12), con la cual, para el período de retorno $T = 100$ años se obtiene una intensidad media de 16,0 mm/hr en tormentas de 3 horas de duración.

TABLA 6.10 PRECIPITACIONES MAXIMAS DIARIAS ESTACION PORTEZUELO (mm)

AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)
1904	5,0	1920	6,2	1936	2,5	1952	0,0
1905	0,5	1921	0,5	1937	3,0	1953	0,0
1906	2,6	1922	0,9	1938	2,0	1954	0,0
1907	3,6	1923	0,5	1939	8,0	1955	0,0
1908	2,2	1924	6,8	1940	38,0*	1956	1,2
1909	0,0	1925	16,3*	1941	8,0*	1957	0,0
1910	3,5	1926	0,0	1942	0,6	1958	0,0
1911	5,5	1927	12,6*	1943	0,0	1959	2,5
1912	2,8	1928	13,3*	1944	0,0	1960	1,6
1913	6,3	1929	-	1945	0,0	1961	0,9
1914	1,0	1930	27,1*	1946	0,0	1962	1,5
1915	-	1931	2,0	1947	0,0	1963	0,5
1916	-	1932	11,0*	1948	0,0	1964	0,2
1917	-	1933	5,0	1949	0,0	1965	0,3
1918	-	1934	0,9	1950	0,0	1966	0,0
1919	0,0	1935	9,7*	1951	0,0	1967	2,3
						1968	0,0

* Valores consignados como diarios por Covarrubias et al. (1991) y Karzulovic (1991).

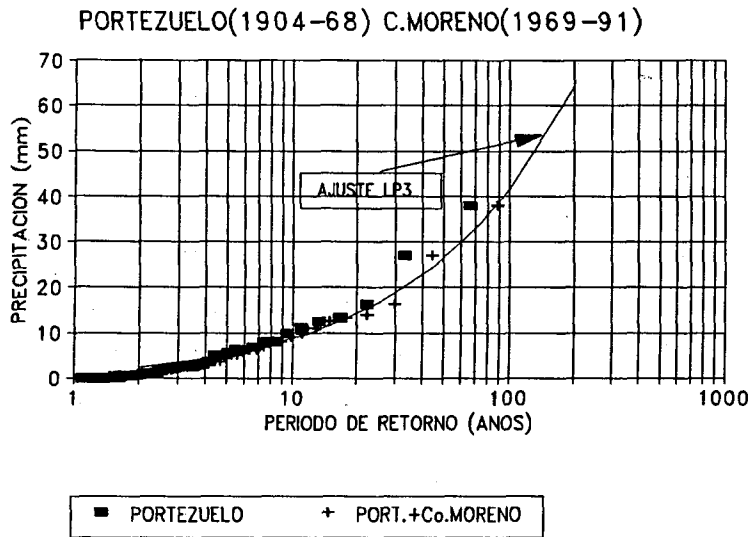


Fig. 6.9 Serie anual Máxima. Precipitaciones Diarias

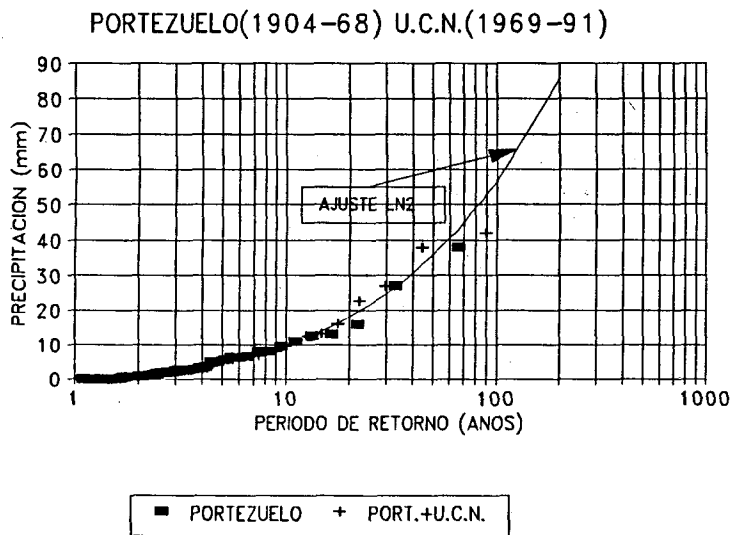


Fig. 6.10 Serie Anual Máxima. Precipitaciones Diarias

TABLA 6.11 DURACION DE LOS 10 MAYORES TEMPORALES SEGUN KARZULOVIC ET AL. (1992)

Fecha	Pp (mm)	Duración (horas)	Aluviones
03.07.1925	16,3	8,0	No Ocurren
02.08.1925	9,3	8,0	No Ocurren
05.07.1927	12,6	10,0	No Ocurren
13.07.1928	13,3	12,0	No Ocurren
19.08.1930	27,1	4,5	Muy Importantes
12.06.1940	38,0	12,0	Importantes
24.07.1940	17,0	7,0	Menores
30.06.1932	11,0	12,0	No Ocurren
24.04.1941	8,0	12,0	No Ocurren
18.06.1991	17,0 (DGA)	3,0	Muy Importantes
	42,0 (UCN)	3,0	

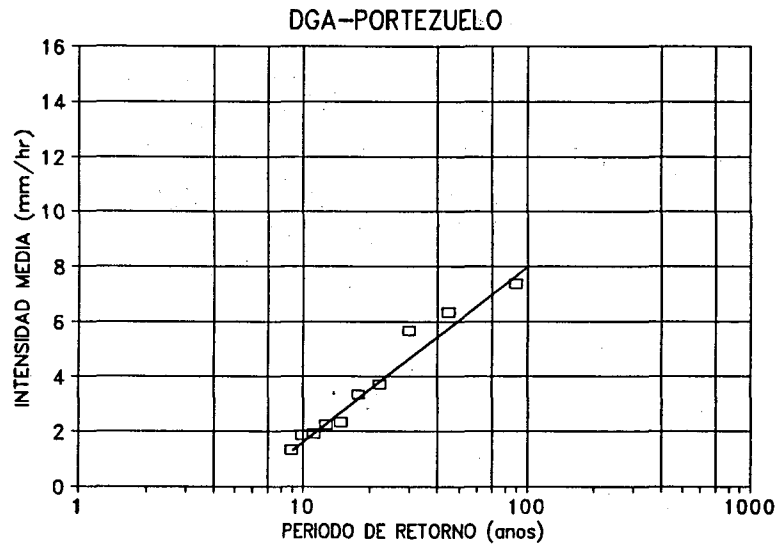
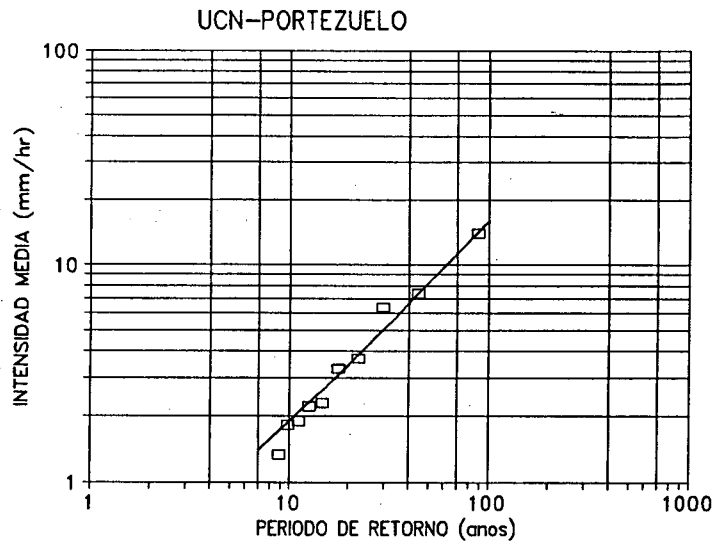


Fig 6.11 Análisis de Frecuencia de Intensidades Medias Máximas. Registro DGA



**Fig 6.12 Análisis de Frecuencia de Intensidades Medias Máximas.
Registro UCN**

TABLA 6.12 ANALISIS DE FRECUENCIAS DE INTENSIDADES MEDIAS MAXIMAS

# de Orden	INTENSIDAD MEDIA (mm/hr)		T (años)
	Inf. DGA	Inf. UCN	
1	7,4	14,0	89
2	6,3	7,4	45
3	5,7	6,3	30
4	3,7	3,7	22
5	3,3	3,3	89
6	2,3	2,3	45
7	2,2	2,2	30
8	1,9	1,9	22
9	1,8	1,8	30
10	1,3	1,3	22

6.5 Estimación de los Caudales para el Evento del 18 de Junio de 1991

6.5 Estimación de los Caudales para el Evento del 18 de Junio de 1991

6.5.1 Introducción

En este punto se realiza las estimaciones de caudales de las corrientes de detritos en las distintas quebradas de Antofagasta tanto para el evento del 18 de Junio de 1991 como para eventos futuros similares pero de distintos período de retorno.

Con este fin se emplea la información de trazas de las corrientes que midieron como parte de su estudio Skorin Ingenieros (1991) y aquellas otras que fueron determinadas en el presente estudio. Estos datos sirven como base para realizar "calibraciones" aproximadas de los diferentes métodos de cálculo hidráulico, las que son verificadas luego a partir de la información hidrológica generada en este estudio.

El procedimiento empleado consiste en realizar estimaciones del caudal en los tramos o secciones de las quebradas donde la traza de la corriente permite determinar las propiedades hidráulicas del cauce: área, perímetro mojado, radio hidráulico y pendiente media. Sobre la base de estas propiedades se hace uso a continuación de algunos de los métodos presentados en el Capítulo 2, aplicables a corrientes de detritos de distintas características. Estos métodos, además de sus limitaciones de aplicación, requieren cierta información adicional que es necesaria suponerla o estimarla a priori (p.e: concentración máxima, concentración efectiva, densidad de los sólidos, densidad de la mezcla, tamaño característico del sedimento, etc), razón por lo cual resulta necesario verificar posteriormente en forma independiente sus resultados. Con este objeto, a partir de los caudales totales de detritos determinados se siguen dos caminos paralelos: (1) se estiman los coeficientes de rugosidad del cauce empleando el caudal total y las propiedades hidráulicas como datos en la ecuación de Manning, de modo de verificar si los coeficientes resultantes se encuentran dentro de rangos razonables; (2) se determinan los caudales líquidos a base de los caudales totales y concentraciones de sólido lo que permite analizar la compatibilidad de estos resultados con las condiciones hidrológicas propias de cada cuenca. El análisis se realiza empleando como índice que engloba las características fisiográficas e hidrológicas de las cuencas, un coeficiente global de escorrentía, es decir, la proporción entre el caudal líquido que escurre y la tasa de agua precipitada en el área de la cuenca.

Hay que hacer notar que en la compatibilización hidrológica surge como parámetro adicional la intensidad de la lluvia ya que la duración que interviene en cada cuenca no es conocida a priori. Por este motivo, resulta necesario también realizar un análisis de la intensidad, aparte del cálculo hidráulico, donde se tome en cuenta posibilidades tales como las siguientes: (1) que la intensidad representativa sea la

media de toda la tormenta, es decir, que la duración sea la total de la lluvia; (2) que la intensidad representativa sea la media del bloque de mayor volumen del hietograma; (3) que la intensidad representativa se asemeje a la media calculada con el tiempo de concentración de la cuenca.

Para lograr conciliar todas las restricciones que impone este procedimiento iterativo, se recurre además a una clasificación de las cuencas considerando como criterios de agrupación los que se han indicado en el Punto 6.4.3: área aportante (A,B,C,D), tiempo de concentración (X, Y, Z) y pendiente media del cauce (1, 2, 3, 3*); de este modo cada cuenca queda identificada por tres indicadores que permiten incluirla dentro de una categoría determinada. Por ejemplo, una cuenca AYB corresponde a una cuya área aportante es menor o igual a 1 km², su tiempo de concentración es inferior a 0,1 hr y su pendiente media es menor o igual que 10%. Este tipo de ordenamiento de la información permite definir ciertos comportamientos característicos de grupos de cuencas que sirven de base también para hacer proyecciones estimativas de situaciones futuras.

6.5.2 Métodos de Cálculo Hidráulico

Como se ha señalado en el Capítulo 2, existen en la literatura técnica distintos enfoques y métodos para estimar algunas propiedades que presentan las corrientes de detritos. El enfoque teórico basado en la aplicación de los conceptos y principios mecánicos a estas corrientes, complementado con antecedentes experimentales o de prototipo, es formalmente el más general y completo. Sin embargo, presenta varias limitaciones tanto de orden teórico como práctico por cuanto se basa en ciertas hipótesis que son verificadas normalmente dentro de rangos estrechos, y porque además requiere del uso de información de prototipo que muchas veces es difícil de obtener o simplemente no se encuentra disponible al momento de realizarse los cálculos. Por este motivo, no resulta conveniente ni apropiado descartar a priori las fórmulas que han surgido de un enfoque netamente empírico del problema. No obstante que hay que reconocer que estas fórmulas no son generalizadas puesto que reflejan el comportamiento de sistemas particulares estudiados bajo condiciones específicas, pueden resultar útiles para fijar órdenes de magnitud que de otra forma no serían determinables.

En consideración a lo expuesto, en el presente estudio se ha intentado hacer uso del mayor número de modelos disponibles, descartando algunos de ellos sólo después de realizado un análisis más detallado de sus resultados. En definitiva, se ha trabajado con los siguientes modelos:

Modelo del Flujo Turbulento de Barro de Takahashi, cuyas ecuaciones corresponden a la ec. (2.16) y las deficiones dadas en el Punto 2.5.2 b.3) del Capítulo 2.

Fórmula de Yablonskiy dada por la ec. (2.17) del Punto 2.5.2 c) del mismo capítulo.

Fórmula de la Oficina Municipal de Planificación de Pekín dada por la ec. (2.23) del mismo punto anterior.

Fórmula de los Lahares del Volcán Mt. St Helens que corresponde a la ec. (2.29) incluida en el mismo punto del Capítulo 2.

En la aplicación de estas fórmulas se ha considerado que las limitaciones propias de cada una de ellas puede ser obviada en ciertos casos mediante la calibración de sus parámetros, pero también se ha tenido presente sus rangos posibles de uso puesto que se conoce las hipótesis u origen de la fórmula. Así por ejemplo, la última de esta fórmulas estaría restringida a flujos de muy alta concentración de sólidos en el rango del 70 al 80% en volumen. La fórmula de Yablonskiy en cambio arroja concentraciones del orden del 55%, en tanto en los demás métodos la concentración interviene como un dato.

6.5.3 Análisis de Caudales, Concentraciones y Coeficientes de Escorrentía

a) Características Geométricas e Hidráulicas de las Quebradas

El cálculo de los caudales se efectuó a partir de los datos que aparecen consignados en las Tablas 6.13 y 6.14, que corresponden respectivamente a la información obtenida por Skorin Ingenieros (1991) y a la obtenida en el curso de la presente investigación por la Dirección General de Aguas durante 1992.

Los datos de la Tabla 6.13 fueron determinados en secciones individuales (dos o tres) cerca de la salida de cada quebrada al casco urbano, a partir de la traza de la corriente que quedó marcada en los bordes o riberas. En esta tabla se incluye el área (m^2), el radio hidráulico (m), el perímetro mojado (m), el ancho superficial y la pendiente media del cauce (tanto por uno). También se consigna una caracterización cualitativa del material del lecho, del tipo de las que se informan en Mecánica de Suelos (G: grava; S: arena; g-S: grava fina - arenoso; S-g: arena - grava fina; R: roca). No toda la información de esta tabla resulta aprovechable para cálculos de flujo uniforme, por cuanto existen datos que se derivan de niveles en ambos lados de la sección bastante desiguales los que son indicativos de cambios de dirección u ondas superficiales importantes y por lo tanto, régimen hidráulico bruscamente variado.

TABLA 6.13 GEOMETRIA HIDRAULICA DE LAS QUEBRADAS DE ANTOFAGASTA (Según Skorin Ingenieros, 1991)

Quebrada	Seccion	Tipo de Material	S (m ²)	R (m)	X (m)	l (m)	i
Club Hípico	1	S	1.87	0.31	6.1	5.5	0.07
	2	G-S	3.00	0.26	11.7	11.1	0.06
	3	S	4.56	0.27	16.9	16.3	0.06
Bonilla Norte	1	S	0.64	0.24	2.7	2.2	0.18
	2	S-g	0.97	0.19	5.0	4.6	0.08
	3	S	1.57	0.17	9.4	9.0	0.07
Bonilla Sur	1	g-S	1.93	0.12	15.6	15.4	0.08
	2	g	2.15	0.10	21.7	21.5	0.08
Farellones	1	g-R	3.25	0.43	7.5	6.6	0.07
	2	g	6.60	0.38	17.3	16.5	0.06
	3	S-g	7.46	0.34	22.0	21.3	0.06
Salar del Carmen	1	S	9.00	0.21	43.2	42.8	0.10
	2	g	3.70	0.13	28.7	28.5	0.08
	3	g	9.78	0.21	47.5	47.1	0.06
La Cadena	1	g	10.30	0.21	48.4	47.9	0.07
	2	g	9.32	0.34	27.2	26.5	0.06
	3	g	7.55	0.44	17.1	16.2	0.09
El Ancla Norte	1	g-R	0.38	0.18	2.1	1.7	0.15
	2	g	0.42	0.19	2.2	1.8	0.13
	3	g-R	0.71	0.16	4.4	4.0	0.09
El Ancla Sur	1	R	1.31	0.16	8.3	8.0	0.13
	2	R-g	1.08	0.17	6.2	5.9	0.16
	3	R-g	1.43	0.21	6.7	6.3	0.14
Riquelme	1	g	0.93	0.13	7.2	6.9	0.12
	2	g	0.83	0.14	6.0	5.7	0.10
	3	g	1.10	0.16	7.1	6.8	0.08
Baquedano	1	S	2.03	0.26	7.8	7.2	0.12
	2	S	2.88	0.23	12.5	12.0	0.12
Uribe	1	g-P	2.10	0.15	13.6	13.3	0.04
	2	g-R	2.26	0.19	11.9	11.5	0.08
	3	g	2.90	0.14	21.3	21.1	0.16
El Toro	1	S	0.95	0.25	3.8	3.3	0.11
	2	S-g	2.47	0.15	16.5	16.2	0.09
	3	g-R-P	2.75	0.16	17.5	17.2	0.05
Caliche Norte	1	S	0.47	0.22	2.1	1.7	0.11
	2	S	0.51	0.23	2.2	1.8	0.07
	3	S	1.16	0.19	6.2	5.8	0.07
Caliche Sur	1	S	1.09	0.04	25.5	25.4	0.10
	2	S	0.39	0.13	3.1	2.8	0.10
	3	S	0.78	0.05	14.3	14.2	0.12
La Negra	1	S-G	18.36	0.83	22.2	20.5	0.02
	2	S-g	23.86	0.56	42.7	41.5	0.02
	3	S-g	20.05	0.55	36.6	35.5	0.04
U. de Antofagasta	1	S	3.45	0.07	51.0	50.9	0.05
	2	S	3.53	0.07	53.0	52.9	0.04
Jardin del Sur	1	S	4.77	0.78	6.1	4.5	0.21
	2	R	7.87	0.75	10.5	9.0	0.19
	3	S	11.31	0.93	12.2	10.3	0.06
El Huascar	1	S	0.99	0.34	2.9	2.3	0.08
	2	S	1.93	0.31	6.2	5.6	0.05
	3	S	1.65	0.40	4.1	3.3	0.08

TABLA 6.14 GEOMETRIA HIDRAULICA DE LAS QUEBRADAS DE ANTOFAGASTA (Según DGA, 1992)

NOMBRE DEL PERFIL LONGITUDINAL	S (m ²)	R (m)	X (m)	l (m)	i
El Toro	12.41	0.88	14.16	12.52	0.09
La Negra en Vertientes	16.86	0.42	40.39	39.70	0.03
La Negra Sec. Terminal 1	20.82	0.66	31.17	30.33	0.05
La Negra Sec. Terminal 2	27.31	0.86	32.70	31.70	0.05
El Ancla	20.78	1.16	15.87	16.50	0.16
Salar del Carmen N2	6.31	0.33	18.99	18.49	0.07
Salar del Carmen Afluente 1	10.32	0.42	25.23	24.62	0.09
Salar del Carmen Afluente 2	5.87	0.34	17.52	16.96	0.12
Salar del Carmen Sector Alto	17.45	0.70	25.15	24.47	0.09
Salar del Carmen N2-B	19.36	0.91	21.41	20.08	0.07
Caracoles o Sal. del Carmen	13.21	0.28	48.00	47.67	0.08
La Cadena Sector Alto	25.98	0.65	40.47	39.60	0.07
Aguas arriba Afluente N1	21.50	1.13	22.57	20.85	0.07
Afluente N1	27.86	1.05	26.72	25.44	0.08
Afluente N2	10.75	0.70	15.44	14.39	0.05
Afluente N3	11.87	0.82	14.68	13.57	0.10
Afluente N4	14.75	0.85	17.31	16.00	0.11
Del Guay	5.26	0.36	14.71	14.24	0.03
De Mateo	9.39	0.23	41.43	42.09	0.01
De Mateo (ag. ar. Del Guay)	14.69	0.47	31.11	30.39	0.01
De Mateo (ag. ab. Del Guay)	20.02	0.45	44.97	44.37	0.01

La información complementaria obtenida posteriormente por la DGA que se sintetiza en la Tabla 6.14, fue determinada a partir de nivelaciones topográficas en tramos más o menos rectos y prismáticos de las quebradas, abarcando varias secciones. Estuvo orientada a complementar los datos de la tabla anterior en las cuencas de mayor tamaño cuyas quebradas no descargan directamente en la ciudad.

b) Caudales Detríticos Totales y Coeficientes de Rugosidad de Manning.

En las Tablas 6.15 y 6.16 se ha resumido los caudales detríticos totales obtenidos de la aplicación de distintos métodos de cálculo, indicándose para ellos la concentración volumétrica de sólidos supuesta o que le es propia. Junto con esta información se incluye los coeficientes de rugosidad que resultan de utilizar la fórmula de Manning cuando se conoce el caudal y la geometría hidráulica de las secciones.

La Tabla 6.15 incluye los resultados del modelo del flujo turbulento de barro de Takahashi para tres concentraciones de sólidos comprendidas dentro del rango de valores probables de las corrientes de Antofagasta: 40, 50 y 60%. Puede apreciarse que en la medida que aumenta este parámetro se produce una disminución del caudal detrítico total bastante significativa, la cual como consecuencia va acompañada de un aumento importante del coeficiente de rugosidad. En términos generales, este coeficiente toma valores de 0.020 a 0.030 para una concentración del 40% y de 0.040 a 0.080 para 60%. Ello demuestra que la suposición de coeficientes de rugosidad fijos en todas las quebradas tendría poco asidero, no sólo por sus distintas geometrías hidráulicas y topográficas, sino también por la variabilidad que podría tener el contenido de sólidos de las corrientes.

Los valores resultantes para los caudales detríticos totales obtenidos con las fórmulas empíricas, junto con sus correspondientes coeficientes de rugosidad, que aparecen resumidos en la Tabla 6.16, indican que al confrontar tanto los métodos empíricos entre si, como éstos con la fórmula de Takahashi, se produce una dispersión significativa en ambos tipos de variable, incluso considerando concentraciones similares. Por ejemplo, el método ruso arroja n's de Manning notablemente más altos, reflejando con ello condiciones de resistencia mucho más desfavorables y por ende, caudales muy bajos.

Lo anterior posiblemente se deba, en gran medida, a las limitaciones propias de cada fórmula, razón por la cual de una comparación directa y única como ésta no es posible inferir las concentraciones que podrían considerarse representativas de cada caso. Por tal motivo resulta necesario complementar este análisis recurriendo a la información hidrológica de cada cuenca.

c) Caudales Líquidos, Coeficientes de Escorrentía, Concentraciones de Sólidos y Coeficientes de Rugosidad Seleccionados.

En consideración a lo expuesto en el acápite precedente y sobre la base de los caudales detríticos y concentraciones obtenidos en las tablas allí discutidas, se procedió a calcular los caudales líquidos asociados, y a partir de ellos, se calculó a continuación el coeficiente de escorrentía resultante en cada cuenca. Esto último se realizó tomando intensidades medias máximas diferentes según la precipitación y duración considerada representativa del centro de gravedad de cada cuenca, de acuerdo con lo señalado en el Punto 6.4 del presente capítulo. De este forma, el coeficiente de escorrentía refleja globalmente el efecto de una diversidad de parámetros que determinan el comportamiento hidrológico de una cuenca, como son su área, forma y orientación, su red de drenaje, su pendiente media, el tipo de suelos, su capacidad de infiltración, etc.

Los resultados del cálculo de caudales y coeficientes de escorrentía se han sintetizado en las Tablas 6.17 y 6.18, la primera referida al método de Takahashi y la segunda a las fórmulas empíricas. En estas tablas se ha incluido además la intensidad media máxima de cada cuenca: las de una superficie inferior a 1 km² corresponde a una duración de 1,5 hrs en tanto en las de mayor superficie la duración corresponde a 3 hrs.

Con el fin de visualizar más fácilmente estos resultados, se los ha graficado además en la Figs 6.13 (a) a la (d), agrupando las cuencas de acuerdo con su tamaño:

- Tipo A: Area \leq 1 km²
- Tipo B: 1 km² < Area \leq 5 km²
- Tipo C: 5 < Area \leq 100 km²
- Tipo D: Area > 100 km²

En estos gráficos de barra se incluye para cada cuenca los resultados obtenidos con los distintos métodos, considerando los coeficientes de escorrentía que se ubican dentro de rangos razonables y físicamente posibles. La comparación entre barras de una misma cuenca permite formarse de inmediato una idea de la dispersión que arrojan los distintos métodos y también, apreciar la consistencia de los resultados al compararlos de una cuenca a otra. Es importante observar una tendencia de ciertos métodos a sobreestimar sistemáticamente los caudales y de otros, por el contrario, a subestimarlos, lo que permite acotar en cierta medida los rangos dejando como posibles sólo los resultados similares entre si. Como se ha señalado anteriormente, esto también se ve reflejado en los coeficientes de rugosidad asociados a cada caudal estimado.

TABLA 6.15 CAUDALES DETRITICOS Y COEFICIENTES DE RUGOSIDAD (MODELO DE TAKAHASHI)

Cuenca	Seccion	Caudales Detriticos (m3/s)			Coeficiente de rugosidad		
		Modelo TKH			C=40%	C=50%	C=60%
		C=40%	C=50%	C=60%			
Club Hipico	S1	7.14			0.031		
Bonilla Norte	S1	3.35	2.64		0.027	0.033	
	S2	3.94	3.16		0.028	0.035	
	S3	4.43	3.46		0.028	0.036	
Bonilla Sur	S1	4.29	3.26		0.031	0.040	
	S2	4.10	3.05		0.032	0.044	
Salar del Carmen Salar del Carmen N2 S. del Carmen o Caracoles	S3	36.63	29.04		0.027	0.034	
La Cadena	S1	31.06	24.12		0.030	0.039	
	S2	41.19	33.14		0.028	0.034	
	S3	48.07	39.29		0.027	0.032	
El Ancla Sur	S1	3.64			0.037		
	S2	3.70			0.036		
	S3	5.60			0.034		
Riquelme	S1	1.01			0.081		
Baquedano	S1	5.02			0.057		
	S2	6.28			0.060		
Uribe	S2	3.22			0.066		
	S3	3.88			0.079		
El Toro	S1	4.72	3.78		0.026	0.033	
	S2	5.95	4.60		0.029	0.038	
	S3	7.15	5.52		0.029	0.037	
Caliche Norte	S2	1.45			0.035		
	S3	2.83			0.037		
La Negra	S1	120.09	106.10		0.018	0.020	
	S2	115.28	100.79		0.018	0.021	
	S3	146.42	127.94		0.018	0.021	
La Negra(en vertiente)		91.47	79.08		0.018	0.021	
La Negra(Sector Terminal 1)		156.80	137.34		0.018	0.021	
La Negra(Sector Terminal 2)		178.12	155.74		0.018	0.021	
U. de Antofagasta	S1	5.33	4.21		0.023	0.029	
	S2	5.07	4.01		0.023	0.029	
El Huascar.	S1	7.20	6.20		0.019	0.022	
	S2	10.33	8.86		0.019	0.022	
	S3	13.67	11.82		0.019	0.022	
Del Guay		23.93	20.58		0.019	0.022	
De Mateo (ag. ar.Del Guay)		49.95	43.36		0.018	0.021	
De Mateo (ag. ab.Del Guay)		70.80	61.32		0.018	0.021	
De Mateo		21.10	17.84		0.019	0.022	

TABLA 6.16 CAUDALES DETRITICOS Y COEFICIENTES DE RUGOSIDAD (MODELOS EMPIRICOS)

Cuenca	Seccion	Caudales Detriticos (m3/s)					Coeficiente de rugosidad				
		RUSO	OFFPMP	OFFPMP	OFFPMP	VMSH	RUSO	OFFPMP	OFFPMP	OFFPMP	VMSH
		c=55%	c=45%	c=55%	c=65%	c=70%	c=55%	c=45%	c=55%	c=65%	c=70%
Club Hípico	S1			6.32		7.97			0.038		0.028
	S2	3.32		6.89		11.10	0.089		0.033		0.027
Bonilla Norte	S1		2.35	2.02		3.40		0.045	0.052		0.031
	S2		2.84	2.44		3.50		0.033	0.038		0.027
	S3		4.11	3.56		5.00		0.031	0.036		0.025
Bonilla Sur	S1		4.15	3.56		5.42		0.032	0.037		0.024
	S2		4.03	3.46		5.63		0.033	0.038		0.024
Salar del Carmen	S3		28.95	25.02		32.57		0.029	0.034		0.028
Salar del Carmen N2		6.66		22.56		28.10	0.093		0.036		0.029
S. del Carmen o Caracoles		16.40					0.095				
La Cadena	S1	10.28	31.40	27.13		35.79	0.091	0.030	0.035		0.028
	S2	12.62	38.82	33.54		40.11	0.090	0.029	0.034		0.028
	S3	13.09	38.43	33.20		41.24	0.097	0.033	0.038		0.031
El Ancla Norte	S3	0.64			1.37		0.099			0.046	
El Ancla Sur	S1		3.49	3.02		4.99		0.039	0.045		0.027
	S2		3.15	2.72		4.69		0.042	0.049		0.028
	S3		4.70	4.07		6.59		0.041	0.047		0.029
Riquelme	S2	0.69			1.45		0.102			0.048	
	S3				2.03					0.044	
Baquedano	S1	2.71			5.53		0.108			0.052	
	S2	3.55			7.23		0.107			0.053	
Uribe	S1	1.52			3.63	5.33	0.082			0.034	0.023
	S2	2.21			4.78		0.097			0.045	
	S3	2.68			5.28		0.114			0.058	
El Toro	S1		3.38	2.83		4.30		0.037	0.043		0.029
	S2		6.15	5.31		7.27		0.034	0.039		0.028
	S3		6.80	5.71		8.13		0.026	0.030		0.024
Caliche Norte	S1	0.55			1.14		0.104			0.050	
	S2					2.01					0.027
	S3				2.40	3.87				0.043	0.026
La Negra	S1	32.84	121.63	105.09	89.09	77.26	0.088	0.018	0.021	0.024	0.028
	S2	32.41	121.09	104.63	88.70	81.28	0.085	0.017	0.020	0.024	0.028
	S3	33.27	109.32	94.46	80.08	92.41	0.081	0.025	0.028	0.034	0.029
La Negra(en vertiente)			75.11	64.91		82.70		0.022	0.026		0.027
La Negra(Sector Terminal 1)			120.73	104.31		96.93		0.024	0.028		0.030
La Negra(Sector Terminal 2)			137.69	118.96		111.33		0.024	0.027		0.029
U. de Antofagasta	S1		4.72	4.08		6.00		0.028	0.030		0.020
	S2		4.72	4.08		5.83		0.025	0.028		0.020
Jardin del Sur	S3	28.86				75.63	0.087				0.033
El Huascar	S1		4.18	3.62		4.63		0.032	0.036		0.029
	S2		7.35	6.36		7.27		0.027	0.031		0.027
	S3		7.85	6.78		8.43		0.032	0.036		0.030
Del Guay			20.96	18.11		17.47		0.021	0.025		0.028
De Mateo (ag. ar.Del Guay)			63.69	55.04		38.87		0.014	0.017		0.024
De Mateo (ag. ab.Del Guay)			84.51	73.02		54.37		0.015	0.018		0.024
De Mateo			25.40	21.83		18.43		0.015	0.018		0.021

En atención a que los coeficientes de escorrentía surgen de métodos de estimación de caudales detríticos totales que se basan en concentraciones de sólidos supuestas o están referidos a concentraciones particulares para las cuales dichos métodos fueron derivados, resulta necesario realizar una verificación adicional de estos coeficientes que permita adoptar las concentraciones representativas de cada caso. Con este fin, se realizó un nuevo cálculo de los coeficientes de rugosidad de las secciones o tramos de las quebradas en estudio, a partir de los caudales detríticos totales que resultan de considerar los rangos de coeficientes de escorrentía y las concentraciones de las Tablas 6.17 y 6.18.

Los nuevos resultados permiten introducir algunas modificaciones en estas variables con el fin de ajustar valores de la rugosidad dentro de rangos físicamente justificables, tanto por las características de los cauces individualmente considerados (mayores rugosidades en cauces de fuerte pendiente, por ejemplo) como por la homogeneidad que debieran tener sistemas hidrológica e hidráulicamente similares.

Los resultados obtenidos en definitiva, después de realizado un proceso de ajuste iterativo que incluye simultáneamente coeficientes de escorrentía, concentración de sólidos y rugosidad, son los que aparecen resumidos en la Tabla 6.20. Puede observarse que el rango de coeficientes de escorrentía varía en forma amplia como función del tamaño de la cuenca y que las concentraciones de sólidos se han acotado en el rango del 45 al 65% (para la quebrada La Negra se acotó en 40% como excepción), correspondiendo en general el límite inferior a las cuencas de mayor tamaño y el superior a las más empinadas y de menor área, o situadas al sur de la quebrada El Toro donde el material es más fino. El coeficiente rugosidad en tanto ha pretendido acotarse en el rango 0.025-0.045 aproximadamente, pero hay casos, especialmente para el límite mínimo de este rango, en que no se consigue con el ajuste este objetivo. Este antecedente sirve de referencia para establecer en qué medida los parámetros adoptados conducen a estimaciones de los caudales detríticos y líquidos más o menos conservadores.

Con el fin de visualizar el resultado final de este procedimiento, expresándolo en términos de los rangos del coeficiente de escorrentía, se ha procedido por último a analizar el comportamiento global de este coeficiente comparando los valores resultantes para los distintos tipos de cuenca. Para ello se ha graficado en la Fig 6.14 esta información para el conjunto de cuencas tipo A, B y C que abarcan hasta aproximadamente 40 km². En esta figura se aprecia que mientras el rango es del orden de 0.7 a 0.9 para las áreas más pequeñas (inferiores a 1 km²), se proyecta una tendencia media hacia valores en el rango 0.3 - 0.4 para las que superan los 20 km². Ello unido a lo que muestra la Fig 6.13 (d), en la cual los coeficientes de escorrentía de las cuencas superiores a 150 km² no alcanzan en promedio el valor 0.05, permite

justificar la adopción de rangos globales gradualmente decrecientes del coeficiente con el área de las hoyas, como se muestra en la Fig 6.15.

Cabe hacer notar que un análisis acerca de posibles dependencias del coeficiente de escorrentía con el tiempo de concentración y pendiente media de las cuencas, hecho con la finalidad de complementar el anterior análisis (basado sólo en el área aportante) no arrojó resultados concluyentes, razón por la cual se consideró que la relación más representativa era precisamente la anteriormente descrita, es decir, la del coeficiente escorrentía en función del tamaño de la cuenca.

Como síntesis de lo expuesto, en la Tabla 6.20 se ha incluido también los valores del coeficiente de escorrentía que corresponden a los límites de los rangos graficados, lo mismo que el rango global adoptado para las cuencas agrupadas según su tamaño. También se incluye aquí las concentraciones volumétricas de sólidos adoptadas de acuerdo con él o los métodos que dieron origen a los coeficientes de escorrentía seleccionados dentro de los rangos indicados.

En esta tabla se ha ordenado las cuencas según la clasificación definida en base a su área, tiempo de concentración y pendiente media, con el objeto de permitir una mejor visualización del efecto que dichas características tienen sobre los resultados obtenidos.

Los rangos globales del coeficiente de escorrentía que se consignan, están definidos como el promedio de los límites inferiores y superiores de cada conjunto de cuencas, aproximados a la décima superior. Sólo en el caso del último grupo se decidió mantener una de las cuencas con su propio rango (La Negra) y las restantes con sus promedios aproximados en atención a la mayor dispersión de los resultados y amplitud de los rangos que resultan en este caso particular.

TABLA 6.17 CAUDALES LIQUIDOS Y COEFICIENTES DE ESCORRENTIA (MODELO DE TAKAHASHI)

Cuencas	Seccion	Im (mm/hr)	Caudales Liquidos (m3/s) Modelo TKH			Coeficiente de Escorrentia		
			C=40%	C=50%	C=60%	C=40%	C=50%	C=60%
Club Hípico	S1	5.67	3.57			0.80		
Bonilla Norte	S1	5.67	2.66	1.73		0.52	0.34	
	S2	5.67	2.01	1.32		0.38	0.25	
	S3	5.67	2.66	1.73		0.50	0.32	
Bonilla Sur	S1	5.67	2.58	1.63		0.58	0.37	
	S2	5.67	2.46	1.52		0.51	0.32	
Salar del Carmen	S3	5.67	18.44	12.17		0.39	0.26	
Salar del Carmen N2		5.67						
S. del Carmen o Caracoles		5.67						
La Cadena	S1	11.57	18.63	12.06		0.35	0.22	
	S2	11.57	24.71	16.57		0.45	0.30	
	S3	11.57	28.84	19.64		0.42	0.28	
El Ancla Sur	S1	10.50	1.82			0.59		
	S2	10.50	1.85			0.58		
	S3	10.50	2.80			0.85		
Riquelme	S1	19.44			0.40		0.75	
Baquedano	S1	20.38			2.01		0.87	
	S2	20.38			2.51		0.89	
Uribe	S2	21.38			1.29		0.64	
	S3	21.38			1.55		0.61	
El Toro	S1	13.73	2.83	1.89		0.58	0.39	
	S2	13.73	4.29	2.76		0.78	0.50	
	S3	13.73	3.57	2.30		0.58	0.37	
Caliche Norte	S2	24.67			0.58		0.66	
	S3	24.67			1.13		0.82	
La Negra	S1	14.00	72.05	53.05		0.07	0.05	
	S2	14.00	69.17	50.40		0.07	0.05	
	S3	14.00	87.85	63.97		0.09	0.06	
La Negra(en Vertientes)		14.00	54.88	39.54		0.06	0.04	
La Negra(Sector Terminal 1)		14.00	94.08	68.67		0.09	0.07	
La Negra(Sector Terminal 2)		14.00	106.87	77.87		0.11	0.08	
U. de Antofagasta	S1	14.00	3.20	2.11		0.82	0.54	
	S2	14.00	3.04	2.00		0.70	0.46	
El Huascar	S1	14.00	4.32	3.10		0.63	0.45	
	S2	14.00	6.20	4.43		0.66	0.47	
	S3	14.00	8.20	5.91		0.80	0.58	
Del Guay		14.00	14.36	10.29		0.02	0.02	
De Mateo(ag. ar. Del Guay)		14.00	29.97	21.68		0.02	0.01	
De Mateo(ag. ab. Del Guay)		14.00	42.48	30.66		0.02	0.01	
De Mateo		14.00	12.66	8.92		0.02	0.01	

**TABLA 6.18 CAUDALES LIQUIDOS Y COEFICIENTES DE ESCORRENTIA
(MODELOS EMPIRICOS)**

Cuencas	Seccion	Im (mm/hr)	Caudales Liquidos (m3/s)					Coeficiente de Escorrentia						
			RUSO	OFPM	OFPM	OFPM	VMSH	RUSO	OFPM	OFPM	OFPM	VMSH		
			c=55%	c=45%	c=55%	c=65%	c=70%	c=55%	c=45%	c=55%	c=65%	c=70%		
Club Hípico	S1	5.67			2.84					2.39			0.64	0.54
	S2	5.67	1.51		4.00				3.33		0.32		0.84	0.70
Bonilla Norte	S1	5.67		1.29	0.91				1.02			0.26	0.18	0.20
	S2	5.67		1.58	1.10				1.05			0.29	0.21	0.20
	S3	5.67		2.28	1.80				1.50			0.42	0.30	0.28
Bonilla Sur	S1	5.67		2.28	1.81				1.69			0.51	0.36	0.36
	S2	5.67		2.22	1.57				1.89			0.48	0.33	0.35
Salar del Carmen	S3	5.67		16.92	11.26				9.77			0.33	0.24	0.21
Salar del Carmen N2		5.67	3.94		10.16				8.43	0.18		0.46		0.38
S. del Carmen o Caracoles		5.67	7.45							0.28				
La Cadena	S1	11.57	4.68	17.27	12.21				10.74	0.09	0.32	0.23		0.20
	S2	11.57	5.74	21.35	15.09				12.03	0.10	0.39	0.28		0.22
	S3	11.57	5.98	21.13	14.94				12.37	0.09	0.31	0.22		0.18
El Ancla Norte	S3	18.50	0.29			0.48				0.57			0.93	
El Ancla Sur	S1	10.50		1.92	1.36				1.50		0.63	0.44		0.49
	S2	10.50		1.73	1.22				1.41		0.54	0.38		0.44
	S3	10.50		2.59	1.83				1.98		0.79	0.56		0.60
Riquelme	S2	19.44	0.32			0.51				0.45			0.72	
	S3	19.44				0.71	1.06						0.66	0.98
Baquedano	S1	20.38	1.23			1.93				0.53			0.83	
	S2	20.38	1.82			2.53				0.57			0.89	
Uribe	S1	21.38	0.69			1.27	1.60			0.46			0.86	1.08
	S2	21.38	1.01			1.87				0.50			0.83	
	S3	21.38	1.22			1.84				0.48			0.72	
El Toro	S1	13.73		1.86	1.32		1.29				0.38	0.27		0.27
	S2	13.73		3.38	2.39		2.18				0.61	0.43		0.39
	S3	13.73		3.83	2.57		2.44				0.59	0.42		0.40
Caliche Norte	S1	24.87	0.25			0.40				0.51			0.82	
	S2	24.87					0.60							0.88
	S3	24.87				0.84	1.19						0.61	0.87
La Negra	S1	14.00	14.94	68.89	47.29		23.18			0.02	0.07	0.05		0.02
	S2	14.00	14.75	66.60	47.08		24.39			0.01	0.07	0.05		0.02
	S3	14.00	15.14	60.12	42.51		27.72			0.02	0.06	0.04		0.03
La Negra(en Vertientes)		14.00		41.31	29.21		18.81				0.04	0.03		0.02
La Negra(Sector Terminal 1)		14.00		66.40	46.94		29.08				0.07	0.05		0.03
La Negra(Sector Terminal 2)		14.00		75.73	53.54		33.40				0.08	0.05		0.03
U. de Antofagasta	S1	14.00		2.60	1.84		1.80				0.67	0.47		0.46
	S2	14.00		2.60	1.84		1.75				0.60	0.43		0.41
Jardin del Sur	S3	14.00	13.13				22.69			0.37				0.64
El Huáscar	S1	14.00		2.30	1.63		1.39				0.34	0.24		0.20
	S2	14.00		4.04	2.86		2.18				0.43	0.30		0.23
	S3	14.00		4.32	3.06		2.53				0.42	0.30		0.25
Del Guay		14.00		11.53	8.15		5.24				0.02	0.01		0.01
De Mateofag. ar.Del Guay)		14.00		35.03	24.77		11.66				0.02	0.02		0.01
De Mateofag. ab.Del Guay)		14.00		46.48	32.86		16.31				0.02	0.02		0.01
De Mateo		14.00		13.97	9.87		6.53				0.02	0.01		0.01

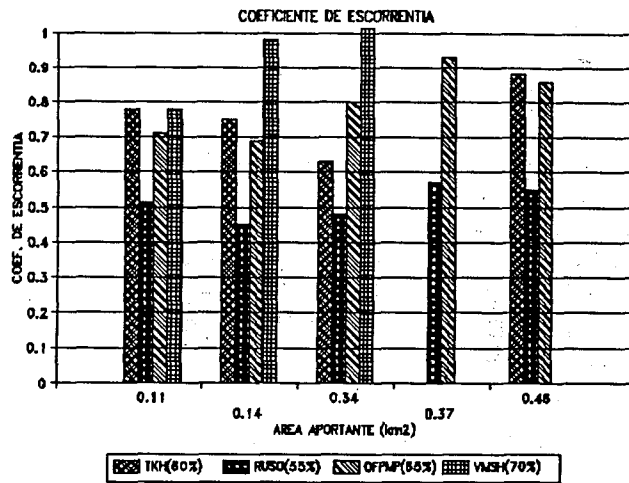


Fig 6.13 (a) Coeficientes de Escorrentía para Cuencas de Area Menor que 1 km² (Tipo A)

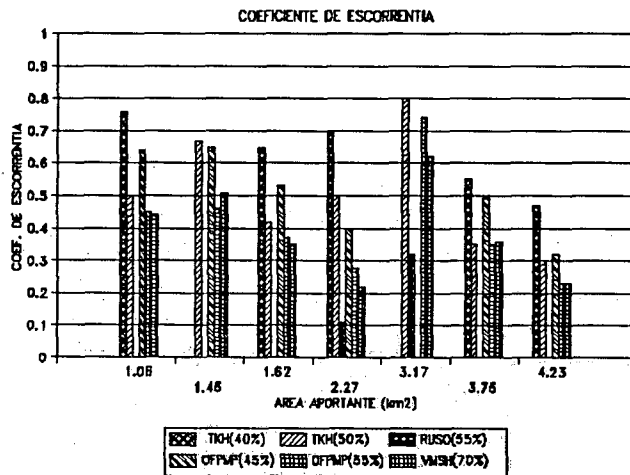


Fig 6.13 (b) Coeficientes de Escorrentía para Cuencas de Area Comprendidas entre 1 y 10 km² (Tipo B)

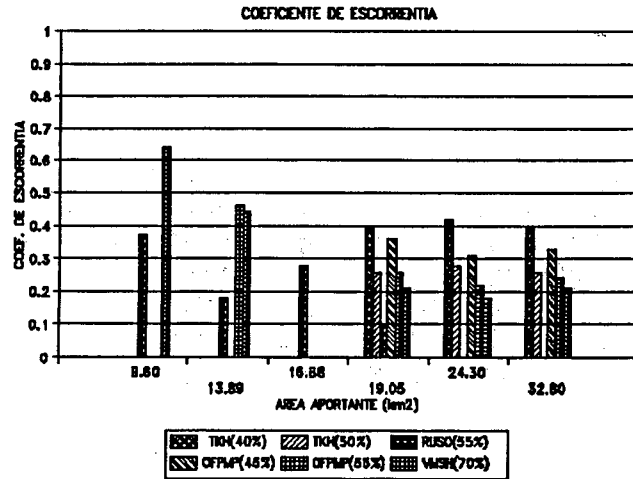


Fig 6.13 (c) Coeficientes de Escorrentía para Cuencas de Area Comprendidas entre 10 y 100 km² (Tipo C)

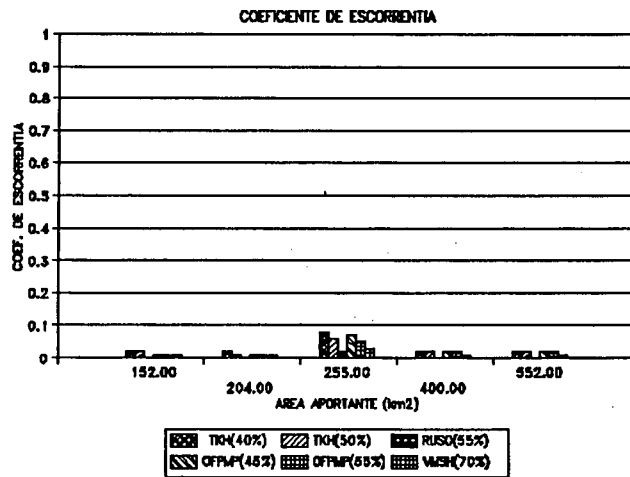


Fig 6.13 (d) Coeficientes de Escorrentía para Cuencas de Area Superiores a y 100 km² (Tipo D)

TABLA 6.19 COEFICIENTES DE ESCORRENTIA, CONCENTRACIONES VOLUMETRICAS Y COEFICIENTES DE RUGOSIDAD

Quebradas	Seccion	Ap (km ²)	Coef. de Escorrentia		Cv (%)	Caudal Detritico		Coef. de Rugosidad	
			Cmin	Cmax		Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	min	max
Club Hípico	S1	2.82	0.55	0.70	55	5.43	6.91	0.033	0.041
	S2	3.01	0.55	0.70	55	5.79	7.37	0.040	0.051
Bonilla Norte	S1	3.24	0.30	0.45	50	3.06	4.59	0.023	0.034
	S2	3.40	0.30	0.45	50	3.21	4.82	0.019	0.029
	S3	3.40	0.30	0.45	50	3.21	4.82	0.026	0.039
Bonilla Sur	S1	2.83	0.40	0.60	55	3.96	5.94	0.022	0.033
	S2	3.06	0.40	0.60	55	4.28	6.42	0.021	0.031
Salar del Carmen	S3	30.25	0.30	0.45	45	25.97	38.96	0.022	0.032
La Cadena	S1	16.77	0.25	0.40	45	24.49	39.18	0.024	0.038
	S2	17.03	0.25	0.40	45	24.87	39.80	0.029	0.046
	S3	21.56	0.30	0.40	45	37.78	50.37	0.025	0.034
El Ancla Norte	S3	0.10	0.80	0.95	65	1.17	1.39	0.046	0.054
El Ancla Sur	S1	1.05	0.50	0.65	60	3.83	4.98	0.027	0.035
	S2	1.10	0.50	0.65	60	3.99	5.19	0.026	0.033
	S3	1.13	0.50	0.65	60	4.10	5.33	0.036	0.047
Riquelme	S2	0.13	0.80	0.85	65	1.60	1.70	0.041	0.044
	S3	0.20	0.80	0.85	65	2.47	2.62	0.034	0.036
Baquedano	S1	0.41	0.85	0.90	65	5.64	5.97	0.048	0.051
	S2	0.50	0.85	0.90	65	6.87	7.28	0.052	0.055
Uribe	S1	0.25	0.70	0.85	65	2.97	3.61	0.034	0.042
	S2	0.34	0.70	0.85	65	4.04	4.90	0.044	0.053
	S3	0.43	0.70	0.85	65	5.11	6.20	0.049	0.060
El Toro	S1	1.27	0.40	0.65	50	3.88	6.30	0.020	0.032
	S2	1.45	0.40	0.65	50	4.42	7.19	0.029	0.047
	S3	1.61	0.40	0.65	50	4.91	7.98	0.022	0.035
Caliche Norte	S1	0.07	0.70	0.80	65	0.97	1.11	0.051	0.058
	S2	0.13	0.70	0.80	65	1.77	2.02	0.025	0.028
	S3	0.20	0.70	0.80	65	2.74	3.13	0.033	0.037
La Negra	S1	255.00	0.05	0.07	40	82.64	115.69	0.019	0.026
	S2	255.00	0.05	0.07	40	82.64	115.69	0.018	0.026
	S3	255.00	0.05	0.07	40	82.64	115.69	0.023	0.032
U. de Antofagasta	S1	1.00	0.50	0.70	50	3.89	5.44	0.022	0.031
	S2	1.11	0.50	0.70	50	4.32	6.04	0.019	0.027
Jardin del Sur	S3	9.13	0.40	0.65	60	35.52	57.72	0.044	0.071
El Huascar	S1	1.76	0.45	0.65	45	5.60	8.09	0.017	0.024
	S2	2.43	0.45	0.65	45	7.73	11.17	0.018	0.025
	S3	2.63	0.45	0.65	45	8.37	12.09	0.021	0.030

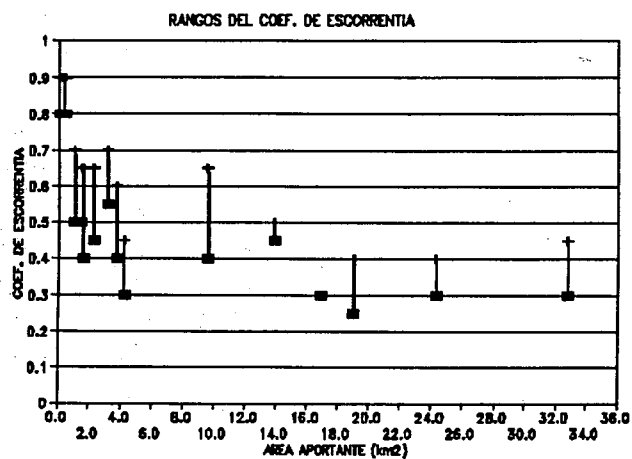


Fig 6.14 Rangos del Coeficiente de Escorrentía en Función de las Areas Aportantes

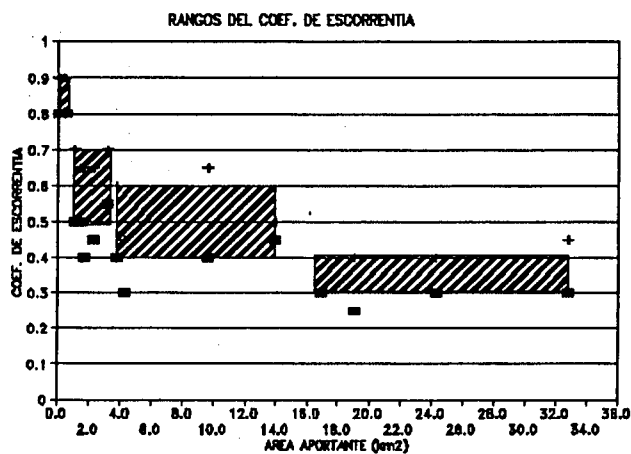


Fig 6.15 Rangos Globales del Coeficiente de Escorrentía para Cuencas de Area Inferior a 50 km²

TABLA 6.20 RANGOS INDIVIDUALES Y GLOBALES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTIA

Quebradas	Tipo	Ap (km ²)	Coef.de Ecorrentia Individual		Cv (%)	Coef.de Escorrentia Global	
			Cmin	Cmax		Cmin	Cmax
Caliche Norte	AX3*	0.11	0.70	0.80	65		
Riquelme	AX3	0.14	0.80	0.85	65		
Uribe	AX3	0.34	0.70	0.85	65	0.8	0.9
El Ancla Norte	AX3	0.37	0.80	0.95	65		
Baquedano	AX3	0.46	0.85	0.90	65		
U. de Antofagasta	BY1	1.06	0.50	0.70	50		
Caliche Sur(2)	BY2	1.18	0.50	0.70	60		
El Ancla Sur	BY1	1.45	0.50	0.65	60		
El Toro	BY2	1.62	0.40	0.65	50	0.5	0.7
Huascar	BY1	2.27	0.45	0.65	45		
Club Hipico	BY2	3.17	0.55	0.70	55		
Farellones(2)	BZ1	3.57	0.40	0.60	50		
Bonilla Sur	BY2	3.75	0.40	0.60	55		
Bonilla Norte	BY3	4.23	0.30	0.45	50	0.4	0.6
Jardin del Sur	BY1	9.60	0.40	0.65	60		
Salar del Carmen N2	CZ1	13.89	0.45	0.50	60		
S. del Carmen o Caracoles	CZ1	16.88	0.30		55		
La Cadena (S1,S2)	CZ1	19.05	0.25	0.40	50		
La Cadena (S3)	CZ1	24.30	0.30	0.40	45	0.3	0.4
Salar del Carmen (S3)	CZ1	32.80	0.30	0.45	45		
Del Guay	DZ1	152.00	0.02	0.03	55	0.02	0.03
De Mateo	DZ1	204.00	0.01	0.02	55		
La Negra(1)	DZ1	255.00	0.05	0.07	40	0.05	0.07
De Mateo (ag.ar.Del Guay)	DZ1	400.00	0.01	0.03	55	0.01	0.03
De Mateo (ag.ab.Del Guay)	DZ1	552.00	0.01	0.02	55		

(1): La Negra incluye los valores obtenidos con mediciones de la DGA; los coeficientes de escorrentia, en este caso se han adoptado tambien como rango global.

(2): Coeficientes de escorrentia obtenidos por interpolacion.

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.

Sobre la base de los análisis efectuados, y de los parámetros que se adoptaron como representativos de cada quebrada o cuenca, se procedió a efectuar estimaciones de los caudales líquidos y detríticos totales en las secciones de salida de las quebradas a la ciudad de Antofagasta para el evento ocurrido en 1991.

La estimación del rango de caudales líquidos peak se realizó usando la fórmula racional considerando el rango de coeficientes de escorrentía determinado para cada hoyo y las intensidades medias para duraciones de 1.5 hrs en las cuencas de área inferior a 1 km² y de 3 hrs en las restantes cuencas. Las precipitaciones que se toman como base en el cálculo de las intensidades corresponden, según se ha señalado, al del centro de gravedad de las cuencas de acuerdo la distribución espacial linealmente creciente de norte a sur adoptada. En el caso de cuencas no incluidas dentro del estudio de coeficientes de escorrentía, se hizo uso de valores asimilados de cuencas hidrológicamente similares.

Los caudales detríticos peak en tanto, se calcularon a partir de los caudales líquidos anteriores y de las concentraciones de sólidos resultantes en cada quebrada. Para ellas se determinó un rango dado por los límites inferiores y superiores del coeficiente de escorrentía y de caudales líquidos obtenidos. Por motivos de carencia de información topográfica de los cauces en estas secciones las estimaciones no han podido ser verificadas desde el punto de vista de los coeficientes de rugosidad.

Los valores resultantes aparecen resumidos en la Tabla 6.21 en conjunto con los datos básicos empleados en el cálculo: identificación del tipo de cuenca, área total aportante, intensidad media de la lluvia sobre la cuenca y el rango de coeficientes de escorrentía que corresponde.

Si estos caudales se comparan con los obtenidos en anteriores estudios (Capítulo 3), se puede apreciar que difieren bastante con ellos, siendo los de la Tabla 6.21 en general mayores. Ello se explica principalmente por el uso que se ha hecho en el presente trabajo de un coeficiente de escorrentía diferenciado según las características fisiográficas y topográficas de las cuencas, y también por concentraciones volumétricas de sólidos significativamente mayores que las supuestas a priori en esos estudios.

Dado que el procedimiento empleado en el presente estudio para estimar los caudales detríticos totales depende en forma directa de las concentraciones de sólidos, se ha estimado necesario efectuar una última verificación de los resultados,

**TABLA 6.21 RANGOS DE CAUDALES GENERADOS A LA SALIDA DE LAS
LAS CUENCAS DE ANTOFAGASTA. TEMPORAL 18/6/91**

Quebradas	A (km ²)	Im(1.5hr) (mm/hr)	Im(3hr) (mm/hr)	Coef. de Escorrentia		Caudales Liquidos		Cv (%)	Caudales Detriticos	
				Cmin	Cmax	Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)		Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)
Club Hipico	3.2		5.7	0.55	0.70	2.77	3.53	55	6.2	7.8
Bonilla Norte	3.4		5.7	0.30	0.45	1.61	2.41	50	3.2	4.8
Bonilla Sur	3.3		5.7	0.40	0.60	2.08	3.12	55	4.6	6.9
Farellones	3.8		5.7	0.40	0.60	2.39	3.59	50	4.8	7.2
Salar del Carmen	33.2		5.7	0.30	0.45	15.68	23.52	45	28.5	42.8
La Cadena	24.3		11.6	0.30	0.40	23.42	31.23	45	42.6	56.8
El Ancla Norte	0.1	18.5		0.80	0.95	0.41	0.49	65	1.2	1.4
El Ancla Sur	1.2		10.5	0.50	0.65	1.75	2.28	60	4.4	5.7
Riquelme	0.2	19.4		0.80	0.85	0.86	0.92	65	2.5	2.6
Baquedano	0.6	20.4		0.85	0.90	2.89	3.06	65	8.2	8.7
Uribe	0.5	21.4		0.70	0.85	2.08	2.52	65	5.9	7.2
El Toro	3.2		13.7	0.40	0.65	4.88	7.93	50	9.8	15.9
Caliche Norte	0.2	24.7		0.70	0.80	0.96	1.10	65	2.7	3.1
Caliche Sur	2.0		14.0	0.50	0.70	3.89	5.44	60	9.7	13.6
La Negra	255.0		14.0	0.05	0.07	49.58	69.42	40	82.6	115.7
U. de Antofagasta	1.2		14.0	0.50	0.70	2.33	3.27	50	4.7	6.5
Jardin del Sur	9.2		14.0	0.40	0.60	14.31	21.47	60	35.8	53.7
El Huascar	2.7		14.0	0.45	0.65	4.73	6.83	45	8.6	12.4

6-47

en términos globales e independientes de las ya realizadas, orientada a determinar el volumen de material sólido asociado con los hidrogramas detríticos definidos por los caudales peak calculados. Con esta finalidad, se emplearon dos métodos independientes: el primero resulta de considerar la envolvente definida en el Capítulo 2 a partir de los datos de Takahashi (1991), que permite estimar el volumen de escorrentía a partir del caudal detrítico peak; el segundo surge de suponer un hidrograma para la corriente de detritos de forma triangular con tiempo base igual a la duración de la lluvia y altura igual al caudal peak.

La primera estimación se basa en el uso de la ec. (2.31) cuya versión para el volumen de material sólido en depósito está dada por:

$$V_d = 1500 \cdot \left(\frac{Q_d}{1 - c_v} \right) \quad (6.4)$$

siendo V_d el volumen de sólidos arrastrados considerado en depósito expresado en m^3 , Q_d el caudal detrítico total en m^3/s y c_v la concentración volumétrica de sólidos en tanto por uno. En esta expresión se ha supuesto una razón densidad de sólidos-densidad global del depósito cercano a 1,5.

La estimación basada en el hidrograma detrítico, resulta de considerar el volumen de sedimento más agua bajo la curva afectado de la razón entre la concentración volumétrica de la corriente y la concentración máxima en estructura compacta del material depositada (70%), lo que conduce a la expresión:

$$V_d = 1800 Q_d \cdot T_T \cdot (c_v / c_{vmax}) \quad (6.5)$$

siendo en este caso T_T la duración de la lluvia (3 hrs) expresadas en horas y c_{vmax} la concentración volumétrica máxima.

Los resultados que se obtienen de aplicar estas dos relaciones en cada quebrada, tomando como base los caudales máximos y mínimos anteriormente estimados, se han incluido en la Tabla 6.22. Más que el resultado individual de cada quebrada, interesa destacar en esta tabla el volumen total de material depositado. En efecto su valor puede ser comparado con la cifra global citada en estudios anteriores acerca de la cantidad de sedimento removido de la ciudad después del temporal. Se puede apreciar que descontada la quebrada La Negra los volúmenes asociados a los caudales mínimos oscilan entre 320.000 y 740.000 m^3 , según se adopte uno u otro método de cálculo, en tanto los asociados a los caudales máximos están en el rango de 440.000 a 1.040.000 m^3 .

**TABLA 6.22 ESTIMACION DEL VOLUMEN DE SOLIDO
A LA SALIDA DE LAS QUEBRADAS**

Quebradas	Caudales Detriticos		Cv (%)	Volumen Solido en Deposito (m3)			
	Qmin (m3/s)	Qmax (m3/s)		Relacion Experimental		Relacion Teorica	
				Vmin	Vmax	Vmin	Vmax
Club Hípico	6.16	7.84	55	11287	14365	26121	33244
Bonilla Norte	3.21	4.82	50	4817	7225	12386	18579
Bonilla Sur	4.62	6.93	55	8465	12698	19590	29386
Farellones	4.79	7.18	50	7178	10767	18457	27686
Salar del Carmen	28.51	42.76	45	34983	52475	98953	148430
La Cadena	42.59	56.78	45	52265	69687	147836	197114
El Ancla Norte	1.17	1.39	65	3272	3886	5890	6994
El Ancla Sur	4.38	5.69	60	9844	12797	20250	26325
Riquelme	2.47	2.62	65	6877	7306	12378	13152
Baquedano	8.25	8.73	65	22979	24330	41362	43795
Uribe	5.94	7.21	65	16542	20087	29776	36157
El Toro	9.77	15.87	50	14649	23804	37669	61211
Caliche Norte	2.74	3.13	65	7635	8726	13743	15706
Caliche Sur	9.72	13.61	60	21875	30625	45000	63000
La Negra	82.64	115.69	40	82639	115694	510000	714000
U. de Antofagasta	4.67	6.53	50	7000	9800	18000	25200
Jardin del Sur	35.78	53.67	60	80500	120750	165600	248400
El Huascar	8.59	12.41	45	10543	15229	29823	43077
	Total (Incluye La Negra)			403349	560251	1252833	1751455
	Total (No incluye La Negra)			320710	444557	742833	1037455

G-49

En promedio el rango de volúmenes sólidos depositados a la salida de las quebradas, sería entonces de 550.000 a 750.000 m³, cifras que se comparan favorablemente con los 400.000 a 700.000 m³ que citan los estudios anteriores acerca del material removido. Hay que considerar, en todo caso, que una parte importante del material depositado en muchas quebradas como Farellones (sector escuela), Baquedano y el Toro (sector regimiento) no fue extraído ni por lo tanto contabilizado en los estudios anteriores. Por tal motivo, es probable que las estimaciones hechas con la relación teórica (ec. 6.5), que se sitúa en el rango de 700.000 a 1.000.000 m³, sea más cercana a la realidad.

Los antecedentes anteriormente expuestos sirven de comprobación global de los rangos de caudales estimados que han sido presentados y discutidos en base a la Tabla 6.21 ya que, según se ha podido apreciar, conducen a volúmenes de sedimento depositados perfectamente compatibles con la situación vivida en Antofagasta con ocasión del temporal del 18 de Junio de 1991. Hay que hacer notar, eso si, que en casos aislados en los cuales las estimaciones se relacionan con condiciones de rugosidad más bajas (Tabla 6.19) es posible suponer que los caudales que pudieron realmente escurrir hacia la ciudad, sean más cercanos el límite inferior del rango que al superior indicado en la Tabla 6.21. Tal sería el caso de las quebradas La Negra, El Huáscar y posiblemente Universidad de Antofagasta.

6.6 Estimación de Caudales para Eventos Futuros.

Los antecedentes que han sido presentados en los puntos precedentes de este Capítulo permiten realizar pronósticos preliminares para eventos futuros de características y períodos de retorno distintos al del 18 de Junio de 1991.

Según se ha explicado, este evento tuvo la particularidad de presentar precipitaciones notoriamente variables de norte a sur de la ciudad, debido a un carácter convectivo de la tormenta, con intensidades que estarían asociadas a un período de retorno de unos 89 años.

Estos antecedentes podrían servir de base para realizar prediseños de obras hidráulicas menores pero no resultarían aceptables para fines de diseño y proyecto de obras destinadas a mitigar consecuencias adversas y daños futuros, sobre todo, en consideración a que tales obras se localizarían en la zona alta donde sus riesgos de colapso o falla pueden significar graves consecuencias para la ciudad y sus habitantes.

Por tal motivo resulta imprescindible en este caso considerar situaciones futuras más desfavorables que las del año 1991, tanto desde el punto de vista de la frecuencia o período de retorno del evento como de su distribución espacial.

Como valor de referencia, se piensa que puede adoptarse preliminarmente un período de retorno de 100 años aunque esta cifra podría ser necesario revisarla analizando más en detalle los riesgos que implicaría la falla de obras sobrepasadas por eventos más infrecuentes. Para este período de retorno, en el Punto 6.4 se ha determinado que la intensidad media máxima es de 16 mm/hr en tormentas de 3 hrs de duración.

Por otro lado, la información pluviométrica que se ha analizado demuestra que no todos los eventos se comportan en forma semejante desde el punto de vista de la distribución de los montos de lluvia a lo largo de la ciudad. Este hecho amerita especial consideración por cuanto no es posible asegurar que la heterogeneidad observada en el evento del año 1991 se repita en eventos futuros. Por tal razón, para efectos de un pronóstico dentro del marco de diseño de obras de cierta envergadura resulta recomendable suponer un valor único para toda el área como el indicado en el párrafo anterior.

El otro aspecto que es necesario tener presente en el pronóstico es que la distribución temporal de la tormenta, es decir, su hietograma, puede presentar bloques tanto o más desfavorables que los identificados para el evento recién pasado. No existen antecedentes ni fundamentos, sin embargo, que permitan recomendar distribuciones distintas, además que ello afectaría en mayor medida sólo a las cuencas de menor área. Por lo tanto, para ellas parece razonable suponer situaciones no más desfavorables que las de esta tormenta.

Tampoco cabe teorizar sobre el uso de duraciones asemejadas a los tiempos de concentración de las cuencas, por cuanto no existe certeza alguna sobre la validez de las relaciones de cálculo de estos tiempos en zonas áridas como Antofagasta. Hay que tener presente que el movimiento de las masas de agua y sedimento removido de los suelos de las cuencas, es con seguridad más lento que el del agua sobre suelos poco erosionables saturados como los que existen en otras regiones climáticas. Por tanto, las estimaciones del tiempo de concentración basadas en las fórmulas clásicas como las de California, Giandotti y otras, conducirían a subestimaciones muy poco realistas lo que en definitiva llevaría a sobrestimar significativamente las intensidades de lluvia.

Consecuente con lo arriba explicado, en los cálculos de pronóstico efectuados, se ha considerado que las intensidades de cuencas cuyas áreas son inferior a 1 km^2 deben asociarse a duraciones de 1.5 hrs en tanto las de mayor tamaño, a duraciones iguales a 3 hrs.

En cuanto a los coeficientes de escorrentía, procede adoptar los rangos globales que se han seleccionado en la Tabla 6.20 ya que no es posible discriminar a un nivel de detalle mayor, dadas las limitaciones de los antecedentes empleados como también

del procedimiento de cálculo utilizado. Ello también es válido para las concentraciones volumétricas de sólidos que se han indicado en dicha tabla.

Los caudales líquidos y detríticos totales que se han obtenido al considerar los supuestos de cálculo y procedimiento antes explicados, han sido resumidos en la Tabla 6.23. Esta información ha sido complementada con los volúmenes de sólido arrastrados y depositados a la salida de las quebradas que se consigan en la Tabla 6.24.

De acuerdo con la información consignada en la primera de estas tablas, un evento de período de retorno de 100 años como el que se ha supuesto en el cálculo, el cual daría origen a una precipitación de 16 mm uniformemente distribuida en la ciudad de Antofagasta, generaría corrientes de detritos de mayor magnitud que las estimadas para el evento de Junio de 1991. En las cuencas de tamaño mediano localizadas más al norte de la ciudad, los caudales serían unas 3 a 4 veces las de este último evento, reduciéndose este factor a 1,5 a 3 para las cuencas más grandes como Salar del Carmen y La Cadena. En las demás cuencas ocurrirían flujos cuyos caudales de agua y barro no superarían en más de un 30 a 50% los del evento pasado.

Por último, los datos de la Tabla 6.24 señalan que los volúmenes de detritos que eventualmente se depositarían a la salida de las quebradas o en el casco urbano, descontada la quebrada de La Negra, estarían dentro del rango de 900.000 m³ a 1.200.000 m³, siendo más posible una cifra más cercana al límite superior de este rango. Estas cifras equivalen a un aumento de un 20 a 30% en relación al evento ocurrido el 18 de Junio de 1991.

TABLA 6.23 CAUDALES LIQUIDOS Y DETRITICOS PARA EVENTOS DE PERIODO DE RETORNO DE 100 ANOS.

Quebradas	A (km ²)	Im(1.5hr) (mm/hr)	Im(3hr) (mm/hr)	Coef. de Escorrentia		Caudales Liquidos		Cv (%)	Caudales Detriticos	
				Cmin	Cmax	Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)		Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)
Club Hípico	3.2		16.0	0.5	0.7	7.1	10.0	55	15.8	22.1
Bonilla Norte	3.4		16.0	0.4	0.6	6.0	9.1	50	12.1	18.1
Bonilla Sur	3.3		16.0	0.4	0.6	5.9	8.8	55	13.0	19.6
Farellones	3.8		16.0	0.5	0.7	8.4	11.8	50	16.9	23.6
Salár del Camen	33.2		16.0	0.3	0.4	44.3	59.0	45	80.5	107.3
La Cadena	24.3		16.0	0.3	0.4	32.4	43.2	45	58.9	78.5
El Ancla Norte	0.1	22.6		0.8	0.9	0.5	0.6	65	1.4	1.6
El Ancla Sur	1.2		16.0	0.5	0.7	2.7	3.7	60	6.7	9.3
Riquelme	0.2	22.6		0.8	0.9	1.0	1.1	65	2.9	3.2
Baquadano	0.6	22.6		0.8	0.9	3.0	3.4	65	8.6	9.7
Uribe	0.5	22.6		0.8	0.9	2.5	2.8	65	7.2	8.1
El Toro	3.2		16.0	0.5	0.7	7.1	10.0	50	14.2	19.9
Caliche Norte	0.2	22.6		0.8	0.9	1.0	1.1	65	2.9	3.2
Caliche Sur	2.0		16.0	0.5	0.7	4.4	6.2	60	11.1	15.6
La Negra	255.0		16.0	0.1	0.1	56.7	79.3	40	94.4	132.2
U. de Antofagasta	1.2		16.0	0.5	0.7	2.7	3.7	50	5.3	7.5
Jardin del Sur	9.2		16.0	0.4	0.6	16.4	24.5	60	40.9	61.3
El Huascar	2.7		16.0	0.5	0.7	6.0	8.4	45	10.9	15.3

**TABLA 6.24 ESTIMACION DEL VOLUMEN DE SOLIDOS
A LA SALIDA DE LAS QUEBRADAS PARA
PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.**

Quebradas	Caudales Detriticos		Cv (%)	Volumen Solido en Deposito (m3)			
	Qmin (m3/s)	Qmax (m3/s)		Relacion Experimental		Relacion Teorica	
				Vmin	Vmax	Vmin	Vmax
Club Hipico	15.80	22.12	55	28971	40560	67048	93867
Bonilla Norte	12.09	18.13	50	18133	27200	46629	69943
Bonilla Sur	13.04	19.56	55	23901	35852	55314	82971
Farellones	16.89	23.64	50	25333	35467	65143	91200
Salar del Carmen	80.48	107.31	45	98777	131702	279397	372530
La Cadena	58.91	78.55	45	72298	96397	204499	272665
El Ancla Norte	1.44	1.62	65	4002	4502	7204	8104
El Ancla Sur	6.67	9.33	60	15000	21000	30857	43200
Riquelme	2.87	3.23	65	8004	9005	14408	16209
Baquedano	8.62	9.70	65	24013	27014	43223	48626
Uribe	7.18	8.08	65	20011	22512	36019	40522
El Toro	14.22	19.91	50	21333	29867	54857	76800
Caliche Norte	2.87	3.23	65	8004	9005	14408	16209
Caliche Sur	11.11	15.56	60	25000	35000	51429	72000
La Negra	94.44	132.22	40	94444	132222	582857	816000
U. de Antofagasta	5.33	7.47	50	8000	11200	20571	28800
Jardin del Sur	40.89	61.33	60	92000	138000	189257	283886
El Huascar	10.91	15.27	45	13388	18744	37870	53018
	Total (Incluye La Negra)			600614	825248	1800989	2486549
	Total (No incluye La Negra)			506169	693026	1218132	1670549

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Principales Conclusiones.

El estudio realizado permite extraer las siguientes conclusiones acerca del fenómeno hidrometeorológico ocurrido los días 17 y 18 de Junio de 1991 en Antofagasta.

a) Aspectos Meteorológicos.

La ciudad mostró los días 16 y 17 de Junio una situación prefrontal con presiones atmosféricas del orden de 2 hPa por debajo de lo normal (1016 hPa), vientos del norte intensos y temperaturas del aire unos 2 °C por encima de los valores climatológicos usuales (14 °C).

El carácter advectivo de la situación pre-evento, se aprecia en la ausencia del típico ciclo diario en las temperaturas y vientos. Las presiones se recuperaron y excedieron los valores normales recién el día 18 de Junio, aún cuando los vientos siguieron mostrando una dirección norte con velocidades anormalmente altas (10 nudos)

Las precipitaciones observadas el día 18 de Junio entre La Serena y Taltal fueron del orden de 40 a 50 mm, en tanto en la zona de Antofagasta a Tocopilla se registraron montos medios del orden de 15 mm.

Los datos aerológicos de Cerro Moreno muestran que la inversión de subsidencia que se observa en forma casi permanente en la zona, desapareció por completo el día 18 de Junio siendo reemplazada por una capa saturada hasta los 3700 m (gradiente de temperaturas adiabático-saturado)

Un aspecto que aparece especialmente relevante en el desencadenamiento de la inestabilidad convectiva, lo constituye el desplazamiento al norte del chorro subtropical puesto de manifiesto por una velocidad de 150 nudos de los vientos en el nivel de 200 hPa el día anterior al evento, lo que se tradujo en una propagación del máximo de velocidad de los vientos desde los niveles superiores hacia la tropósfera media, alcanzándose el día 18 de Junio el doble de la velocidad esperada en promedio (95 nudos) en el nivel característico del chorro del frente polar (nivel 300 hPa).

- El período en que ocurrió el evento se enmarca dentro de la etapa de desarrollo de un evento cálido de la Oscilación del Sur (El Niño 1991-1992), que se ha vinculado a un incremento de las precipitaciones en Chile Central. El desvío de las trayectorias ciclónicas hacia esta zona del país por efecto del bloqueo austral (las que pudieron

penetrar más al norte por la mayor anomalía negativa de presión en este sector del anticiclón subtropical), apareció de manifiesto como un lento desplazamiento de un anticiclón a partir del 11 de Junio que cruza hacia el Atlántico Sur el día 21.

Las cartas sinópticas de superficie muestran que el mayor avance frontal hacia el norte por la costa, se produjo el día 17 de Junio entre las 06 UTC y las 12 UTC, avanzando luego muy lentamente hasta alcanzar marginalmente la zona de Antofagasta la noche de ese día, debilitándose y desapareciendo por completo en el transcurso del día siguiente. Por otra parte, las cartas del nivel 500 hPa revelan que los máximos vientos costeros sobre la ciudad de Antofagasta se produjeron hacia las 12.00 UTC del día 18 (WNW con 60 nudos), coincidiendo con la profundización y desplazamiento hacia el este de la vaguada.

Las cartas de tropopausa muestran que las corrientes en chorro del frente polar y subtropical se encontraban muy próximas entre sí el día 16 de Junio, fundiéndose en una sola corriente el día 17 y excediéndose en los núcleos respectivos, velocidades de 120 nudos. El corrimiento hacia el norte de la corriente en chorro subtropical y su posible refuerzo, por un avance más al norte de lo habitual de una masa de aire frío (resultante de una situación de bloqueo en latitudes altas del Pacífico suroriental durante los eventos cálidos de la Oscilación del Sur), explican al menos cualitativamente la posibilidad de generación local de inestabilidad y el desencadenamiento de actividad convectiva.

Las imágenes infrarrojas de satélites, permiten establecer importantes características a escala subsinóptica del evento del 17 y 18 de Junio de 1991, a saber: 1° la existencia de dos bandas frontales con gran desarrollo; 2° la existencia de elementos de fuerte convección en la banda delantera. Estos dos elementos permiten concluir que el frente en ningún momento alcanzó a la ciudad de Antofagasta, sino más bien se trató de un margen frontal en la que la inestabilidad convectiva se desencadenó probablemente en conexión con el núcleo de la corriente de chorro.

El análisis de las imágenes visibles de satélite, permiten agregar más evidencia acerca del carácter convectivo que tuvo el evento en Antofagasta ya que se aprecia una disminución no uniforme del albedo entre los días 14 y 18 de Junio producto de variaciones espaciales de la humedad del suelo en ese período.

b) Aspectos Geológicos-Geomorfológicos.

La zona estudiada está constituida en gran parte por rocas de la formación La Negra dentro de las cuales quedan incluidas lavas andesíticas de colores grises y verdes, con intercalaciones de brechas y areniscas rojizas formando una secuencia monoclinial que miente hacia el oeste.

En algunos sectores, en especial aquellos localizados al sur de la quebrada La Negra, la roca se presenta intruída por cuerpos menores o stocks graníticos de edad Jurásico Superior; a la formación La Negra se le ha asignado una edad del Jurásico Medio a Superior.

El sector sur del área estudiada está constituido por rocas de la formación Caleta Coloso, la cual incluye conglomerados y areniscas de colores rojizos. Se trata de una secuencia que sobreyace a la formación La Negra.

Las rocas de las formaciones La Negra y Caleta Coloso, están en algunos sectores cubiertas por sedimentos aluviales de relleno constituidos por gravas, arenas, y arcillas.

Las fuentes principales de materiales removidos y movilizados por los flujos de detritos ocurridos el 18 de Junio de 1991, corresponden por una parte a depósitos coluviales y por otra, a depósitos eólicos.

Los depósitos coluviales se presentan en forma de mantos superficiales o conos de deyección, dispuestos en los sectores medios e inferiores de la zona rellenando de preferencia valles y quebradas.

Los depósitos coluviales constituyen importantes apilamientos, de origen local principalmente gravitatorio, presentando tamaños muy variados de granos desde partículas muy finas hasta bloques, formas angulosas, bastante caóticos y sin estratificación interna, y de composición simple directamente relacionada con la constitución mineralógica de la roca de la cual se originan por procesos de intemperización.

Los depósitos eólicos están constituidos por arenas con buena selección de tamaños y partículas de forma redondeada. Están compuestos principalmente por granos de cuarzo y feldespatos, con un leve contenido de materiales ferromagnesianos y granos líticos de la formación La Negra.

Los depósitos eólicos han sido acarreados y depositados sobre las laderas y quebradas, cubriendo incluso depósitos coluviales más antiguos, por el viento que los ha removido de la zona costera donde se han originado por procesos de erosión y meteorización de rocas graníticas.

- Se ha establecido que en el área situada al sur de la quebrada El Toro, la fuente principal y casi exclusiva de sedimentos corresponde a arenas eólicas.

- En el área ubicada al norte de la quebrada El Toro, la fuente principal y casi exclusiva de material sólido la constituye los depósitos coluviales y de antiguas corrientes de detritos o coluvios removidos, que han quedado depositados en laderas y fondos de quebradas.

- La diferencia entre las fuentes de sedimentos de las quebradas ubicadas al sur y norte de El Toro, ha quedado claramente de manifiesto en los remanentes de las corrientes detríticas generados durante el evento del año 1991. En la quebrada El Toro, la situación es mixta puesto que sus laderas y fondo del curso medio e inferior se encuentran constituidos por material coluvial in situ y removilizado, pero las del curso superior aparecen recubiertas por arenas eólicas.

- Además de las fuentes de material señaladas, ha existido en algunas quebradas un importante aporte de detritos que aparecen vinculados a faenas de extracción de áridos. Tal es el caso de las quebradas La Cadena, El Ancla y Baquedano donde también hay evidencias de la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa del tipo de derrumbes o deslizamientos, en especial en las dos últimas.

c) Aspectos Hidrológicos e Hidráulicos.

- La información pluviométrica de las estaciones existentes en Antofagasta (Cerro Moreno, Portezuelo, Dirección General de Aguas y Universidad Católica del Norte), en el período concurrente de sus registros que abarca desde 1979 a 1991, muestra que existe aparentemente una tendencia hacia el aumento de la precipitación media anual de norte a sur. Sin embargo, existen años en que esta tendencia se invierte en forma significativa, precipitando más lluvia en el sector norte que en el sur de la ciudad.

- Las tormentas individuales presentan una variabilidad espacial importante, asociada probablemente a actividad convectiva similar a la observada durante el evento del 18 de Junio de 1991.

- Al analizar eventos específicos se ha encontrado que incluso se registran lluvias en ciertos sectores de la ciudad, en tanto en otros no. El comportamiento de las tormentas no es único en cuanto a su distribución espacial ya que en algunos las magnitudes precipitadas son mayores en el norte y en otros en el sur de la ciudad.

- En relación al temporal ocurrido el 18 de Junio de 1991, se detectó precipitaciones de 17 mm en la estación de la DGA (ubicada en el sector central norte) y 42 mm en la estación de la Universidad Católica del Norte (ubicada en el sector central sur). Esta diferencia aparece corroborada no sólo por la variabilidad observada

en anteriores tormentas más intensas sino también por el carácter convectivo del fenómeno según se deduce del análisis y conclusiones de los aspectos meteorológicos del evento.

- La duración de la tormenta ha sido estimada en 3 hrs pero el monto mayor de precipitación se produjo en la segunda mitad de este período. De los 42 mm medidos en la estación Universidad Católica del Norte (UCN), se ha estimado que cayeron 37 mm en la segunda hora y media del temporal.

- Sobre la base de suponer por un lado, una variación linealmente creciente de la precipitación de norte a sur en la ciudad y por otro, una distribución temporal con un bloque de lluvia mucho más importante la segunda mitad de la duración de la tormenta, se ha llegado a la conclusión que las corrientes de detritos generadas en las quebradas están asociadas a intensidades medias máximas distintas tanto por el tamaño de las cuencas como por la ubicación del centro de gravedad de su área a lo largo de una línea imaginaria paralela a la costa.

- Se ha estimado que las intensidades medias máximas de la lluvia que dieron origen a corrientes de detritos en las distintas cuencas y quebradas, varió entre unos 19 mm/hr y 25 mm/hr, para las cuencas más pequeñas (área < 1 km²) donde predominó el efecto del bloque de lluvia más intenso de 1,5 hrs de duración, y entre 6 mm/hr y 14 mm/hr en las restantes cuencas.

- El análisis de frecuencias para precipitaciones de 3 hrs de duración, que son los eventos de menor duración que aparecen documentados desde 1925 hasta 1991 en la bibliografía, señala que una intensidad media máxima del orden de 4 mm/hr ocurriría en promedio una vez cada 20 años. De acuerdo con la información histórica revisada, se concluye que esta es la intensidad media máxima para la cual comenzarían a generarse corrientes de detritos de cierta importancia en la zona.

- Para precipitaciones de una hora de duración, se ha estimado que el umbral de generación de corrientes de detritos está asociado a intensidades de 6 mm/hr.

- El análisis de frecuencias permite concluir asimismo que para efectos de diseño de obras de ingeniería, debería utilizarse la curva de frecuencias definida con la información de la estación UCN con la cual, para un período de retorno de 100 años, resulta una intensidad media máxima de 16 mm/hr para tormentas de 3 horas de duración.

- En relación a la estimación de los caudales líquidos y de detritos que escurrieron el 18 de Junio de 1991 por las quebradas que descargan en la ciudad durante, debido a limitaciones de información y del conocimiento más básico del

escurrieron el 18 de Junio de 1991 por las quebradas que descargan en la ciudad durante, debido a limitaciones de información y del conocimiento más básico del comportamiento mecánico de este tipo de corrientes, fue necesario recurrir a un procedimiento mixto hidrológico e hidráulico en el cual se conciliaron exigencias relacionadas con los procesos hidrológicos de las cuencas y las condiciones de escurrimiento de las masas sólido-líquidas en los cauces.

- Sobre la base de las estimaciones efectuadas se ha llegado a la conclusión los caudales son en general superiores que los consignados en diversos informes anteriores. Ello se explica por intensidades medias máximas y coeficientes de escorrentía mayores diferenciados según las características fisiográficas y topográficas de las cuencas, pero también por concentraciones de sólidos que superan en la mayoría de las quebradas el 50 a 60 % en volumen, cifra significativamente más grande que el 30 a 40 % estimada en anteriores estudios.

- Para este mismo evento, los caudales calculados permiten estimar un volumen de detritos descargados por las quebradas que se sitúa en el rango de 550.000 750.000 m³, con posibilidades que se hubiese alcanzado incluso 1.000.000 m³, descontando los aportes de la quebrada La Negra.

- La estimación de los caudales líquidos y sólidos para un evento futuro asociado a un período de retorno de 100 años, para el cual la intensidad media máxima de lluvias de 3 hrs de duración alcanza a los 16 mm/hr, supuesta uniformemente distribuida dentro de la ciudad, lleva a la conclusión que éstos aumentarían si se comparan al evento del año 1991. En las cuencas de tamaño mediano localizadas en el sector norte de la ciudad, los caudales detríticos serían unas 3 a 4 veces los calculados para este evento, reduciéndose a 1,5 a 3 veces para cuencas mayores como Salar del Carmen y La Cadena. En las restantes cuencas los flujos de detritos no superarían a los del evento pasado en más del 30 a 40 %.

- Por último, los volúmenes de detritos para este evento futuro estarían comprendidos entre los 900.000 y 1.200.000 m³, siendo más posible una cifra cercana a 1.700.000 m³, habiéndose descontado en estas cifras el caudal descargado por la quebrada La Negra.

**TABLA 7.1 RESUMEN DE CAUDALES DE DETRITOS PARA EL EVENTO DEL
18 DE JUNIO DE 1991 Y EVENTO FUTURO DE T = 100 ANOS**

Quebradas	Evento 18 Junio de 1991					Evento Futuro T=100 anos		
	A (km ²)	Cv (%)	Im (mm/hr)	Caudales Detriticos		Im (mm/hr)	Caudales Detriticos	
				Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)		Qmin (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)
Club Hipico	3,2	55	5,7	6,2	7,8	16,0	15,8	22,1
Bonilla Norte	3,4	50	5,7	3,2	4,8	16,0	12,1	18,1
Bonilla Sur	3,3	55	5,7	4,6	6,9	16,0	13,0	19,6
Farellones	3,8	50	5,7	4,8	7,2	16,0	16,9	23,6
Salar del Carmel	33,2	45	5,7	28,5	42,8	16,0	80,5	107,3
La Cadena	24,3	45	11,6	42,6	56,8	16,0	58,9	78,5
El Ancla Norte	0,1	65	18,5	1,2	1,4	22,6	1,4	1,6
El Ancla Sur	1,2	60	10,5	4,4	5,7	16,0	6,7	9,3
Riquelme	0,2	65	19,4	2,5	2,6	22,6	2,9	3,2
Baquadano	0,6	65	20,4	8,2	8,7	22,6	8,6	9,7
Uribe	0,5	65	21,4	5,9	7,2	22,6	7,2	8,1
El Toro	3,2	50	13,7	9,8	15,9	16,0	14,2	19,9
Caliche Norte	0,2	65	24,7	2,7	3,1	22,6	2,9	3,2
Caliche Sur	2,0	60	14,0	9,7	13,6	16,0	11,1	15,6
La Negra	255,0	40	14,0	82,6	115,7	16,0	94,4	132,2
U. de Antofagasta	1,2	50	14,0	4,7	6,5	16,0	5,3	7,5
Jardin del Sur	9,2	60	14,0	35,8	53,7	16,0	40,9	61,3
El Huascar	2,7	45	14,0	8,6	12,4	16,0	10,9	15,3
Volumen de Detritos Total (m ³)				828.091	1.155.853	1.200.802 1.655.898		
Volumen de Detritos Excluyendo La Negra (m ³)				531.772	741.006	862.151 1.181.787		

7-9

7.2 Recomendaciones.

Las principales recomendaciones que surgen del estudio desarrollado pueden sintetizarse como sigue:

- Existe una evidente carencia de información hidro-meteorológica local que debe ser subsanada con urgencia para posibilitar el estudio sistemático de los fenómenos relacionados con la generación de crecidas súbitas y corrientes de barro como los ocurridos en Antofagasta el año 1991.

- Es necesario tener presente que una ciudad como Antofagasta, como otras de la Segunda Región, es altamente vulnerable a este tipo de fenómenos. Por lo mismo deben establecerse programas de investigación orientados a adquirir un cabal conocimiento de todos los procesos físicos involucrados en este tipo de fenómenos y especialmente de aquellos que pueden producir problemas.

- Los resultados que se obtengan de programas de investigación sistemática de estos fenómenos permitirán por un lado materializar medidas estructurales de mitigación de los desastres realmente efectivas y eficientes, y por otro, implementar sistemas de alerta o de pronóstico de corto plazo para salvaguardar la integridad física de su población e incluso activar a tiempo sistemas de emergencia.

- En atención a la variabilidad espacial y temporal de las tormentas causantes de estos fenómenos y a la dependencia evidente que ellos muestran no sólo con el monto de agua caída sino también con la intensidad de la lluvia, resulta imprescindible suplementar la red pluviométrica, instalando al menos un par de pluviómetros en la parte alta de algunas de las cuencas más representativas del sector y agregándole pluviógrafos a algunas de las estaciones pluviométricas y/o meteorológicas.

- Resulta recomendable disponer también de algún sistema de medición de caudales en algunas quebradas, teniendo cuidado de diseñar instalaciones aptas para operar con efectividad frente al escurrimiento de corrientes infrecuentes de agua y detritos o bien, estacar los escurrimientos y/o crecidas en algunos tramos de las quebradas inmediatamente después de producida una precipitación (la no existencia de escurrimiento indicaría qué precipitaciones pueden considerarse como críticas).

- Es necesario establecer un programa de levantamientos topográficos locales y muestreos granulométricos orientado a posibilitar una caracterización de la geometría hidráulica y características en detalle de los cauces y del material que los constituyen.

- También aparece como una necesidad investigar en mayor detalle las fuentes de sedimentos, sean éstas naturales o debidas a actividades de extracción de áridos o de disposición de residuos sólidos en las quebradas, estableciendo además si existen zonas localizadas donde procesos de remoción en masa puedan constituir una fuente adicional de sedimentos durante un temporal.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

A. CATASTROFES NATURALES, RIESGOS GEOFISICOS, PREVENCION Y MITIGACION

Ayala, L., 1984, "Sobre los Problemas de Erosión y Sedimentación", Curso El Recurso Agua y su Manejo. Escuela de Temporada 1984 - Departamento de Extensión, Dirección General Académica - Universidad de Chile. pp. 32.

Hays, W.W. (Edit), 1981, "Facing Geologic and Hydrologic Hazards. Earth Science Considerations Geological Survey Professional Paper 1240-B, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., pp. 108.

Naciones Unidas, 1977, "Directrices para la Prevención y Regulación de las Pérdidas Países a las Inundaciones en los Países en Desarrollo", Departamento de Asuntos Económicos y Sociales - Recursos Naturales/Serie del Agua N°5, pp. 215.

Wold Jr., R.L and Jochim, C.L., 1989, "Landsline Loss Reduction: a Guide for State and Local Government Planning", FEMA-Federal Emergency Management Agency, Earthquake Hazards Reduction Series 52, pp. 50.

B. CASUISTICA DE FLUJOS DE DETRITOS

Abele, 1984, "Derrumbes de Montañas y Morrenas en los Andes Chilenos", Revista de Geografía Norte Grande, 11, pp. 17-30

Abele, G., 1992, "El Lahar Tinguiririca: Su Significado entre los Lahares Chilenos" Informaciones Geográficas Chile, 29 pp. 21-34.

A.C. Ingenieros Consultores Ltda, 1988, "Análisis Preliminar de las Consecuencias del Aluvión del Río Colorado del 29/11/1987, Proyecto Hidroeléctrico Alfafal. Compañía Chilena de Generación Hidroeléctrica S.A, Enero, pp.42.

Beverage, J.P and Culbertson, J.K, 1964, "Hyperconcentrations of Suspended Sediment", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings ASCE, Vol.90, N°HY6, Nov.

Bradley, J.B and McCutcheon, S.C, "The Effects of High Sediment Concentration on Transport Processes and Flow Phenomena", International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, September 3-5, 1985, Tsukuba, Japan pp. 219-225.

Cai Ze-Yi, 1992, "A Preliminary Study of the Relationship Between Heavy Rainfall and Serious Debris Flows", Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS, Publ. N°209, 1992 pp. 201-205.

Carrillo, A., 1986, "Grandes Desprendimientos y Derrumbes en Los Andes Peruanos", Taller Mitigación de Peligros Debidos a Eventos Naturales Extremos en América, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayaguez, pp. 1-8.

Castro, M., Mothes, P., Hidalgo, X. y Sánchez, A., 1992, "Uso del Modelo HEC-1 para el Estudio de los Lahares del Volcán Cotopaxi", XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIH-IAHR, Cartagena de Indias, Colombia, pp. 435-444.

Costa, J.E., 1988, "Rheologic, Geomorphic and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrate Flows and Debris Flows" in Chapt 7, Flood Geomorphology edited by Baker, Kochel y Patton, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 113-122.

Costa, J.E y Wiecaorek, 1987, "Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation", Reviews in Engineering Geology, Vol VII, The Geological Society of America, Boulder, Colorado.

Coussot, P., Leonov, A.I y Pian, J.M., 1992, "Rheological Modelling and Peculiar Properties of Some Debris Flows". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 207-216.

Deeb, A. y Ordóñez J., 1993, "Análisis de Riesgo Hidráulico Asociado con los Lahares del Volcán Nevado del Ruiz", XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Paulo, Brasil, pp.

Golubev, G., 1973, "Avalanchas y Corrientes de Barro en Chile", pp. 31-74.

Gori U. y Tonelli, G., 1992, "Flow Slide Movement in Clayey Terrains of the Italian Northern Apennines". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July, IAHS, Publ. N°209, 1992 pp. 227-236.

Jong C.de., 1992, "A Catastrophic Flood/Multiple Debris Flow in a Confined Mountain Stream: an Example from Schmiedlaine, Southern Germany". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 237-247.

Kang Zhichenz y Wan Yuzhang, 1992, "A Study of the Relationship Between Deposit Density and Debris Flow Type". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 247-252.

Mac Phail, D.D., 1973, "The Geomorphology of the Río Teno Lahar, Central Chile", *The Geographical Reviews*, Oct., pp. 517-532.

Marangunic, C., Moreno, H. y Varela, J., 1979, "Observaciones sobre los Depósitos de Relleno de la Depresión Longitudinal de Chile entre los Ríos Tinguiririca y Maule", Segundo Congreso Geológico Chileno, Agosto 6-11, Arica, pp. 129-139.

Marden M., Phillips, C.J, Jackson R.J, Zhang, X.B and Ekanayake, J., 1992, "A Decade of Earthflow Research and Interrelated Studies in the North Island of New Zealand". *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium*, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 236-271.

Mirinova E.M y Yablonskiy, V.V., 1992, "A Mathematical Model of Shear Debris Flow". *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium*, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 273-282.

Marangunic, C., 1974, "The Lahar Provoked by the Eruption of the Villarrica Volcano on December 1971", *International Symposium Volcanology*, Santiago, pp. 48.

Pierson, T.C., 1985, "Initiation and Flow Behaviour of the 1980 Pine creek and Muddy River Lahars, Mount St. Helenes, Washington, *Geological Society of America Bulletin*, V. 96, pp. 1056-1069.

Salikhova D.H y Liahorvskaya L.F., 1992, "Mudflood Activity in the Foothills of Central Asia". *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium*, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 283-288.

Segerstrom, K., 1965 "Mass Wastage in North-Central Chile", *Sedimentary Geology and Sedimentation*, pp. 120-140.

Strunk, H., 1992, "Reconstructing Debris Flow Frequency in Southern Alps Back to AD 1500 using Dendrogeomorphological Analysis". *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium*, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 299-396.

Takahashi, T., 1991, "Debris Flow", *International Association for Hydraulic Research, IAHR - AIRH, Monograph Series*, A.A. Balkensa/Rotterdam/Brookfield.

USGS, WRD., 1986, "Bibliographic Information for Mount St. Helens Studies and for Volcano Hazards in California, Sept. 12, pp. 1-15.

Van Dine, F.F., 1984 "Debris Flows and Debris Torrents in Southern Canadian Cordillera", 37th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Sept.

Wang Ying y Zhov Bifan, 1992, "Conversion Mechanisms of Gravelly Soil to Viscous Flow". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS, Publ. N°209, pp. 315-323.

Wang Zuo-Shu, 1992, "Meteorological Conditions Associated with Severe Regional Debris Flows in China". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS, Publ. N°209, pp. 325-336.

Wei Wenshow y Gao Cunhai, 1992, "Studies of Ice-Snow Melt Debris Flows in the Western Tian Shan Mountains, China". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 329-336.

Whipple, K.X., 1992, "Predicting Debris Runout and Deposition on Fans; The Importance of the Flow Hydrograph". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July, IAHS, Publ. N°209, pp. 337-345.

Yablonskiy, V.V., Tishchenko, A.S., Deziron, A.V y Boeva, E.G., 1992, "Debris Flows in the Uksaine: Some Results of Field and Experimental Studies". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS, Publ. N°209, pp. 361-367.

C. PROCESOS, CUANTIFICACION Y MODELACION

Bradley, J.B and Mc Cutcheon, S.C., 1985, "The Effects of High Sediment Concentration on Transport Processes and Flow Phenomena", International Symposium on Erosión, Debris Flow and Disaster Prevention, September 3-5, Tsukuba, Japan pp. 219-225.

Costa, J.E., 1988, "Rheologic, Geomorphic and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrate Flows and Debris Flows" in Chapt 7, Flood Geomorphology edited by Baker, Kochel y Patton, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 113-122.

Costa, J.E y Wiecaorek, 1987, "Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation", Reviews in Engineering Geology, Vol VII, The Geological Society of America, Boulder, Colorado.

Coussot, P., Leonov, A.I y Pian, J.M. 1992, "Rheological Modelling and Peculiar Properties of Some Debris Flows". Erosión, pp. 207-216.

Davies, T.R.H., 1990, "Debris-Flow Surges-Experimental Simulation", *Journal of Hydrology (N.Z)*, Vol. 29, N°1 pp. 18-46.

Davies, T.R., Phillips, C.J., Pearce, A.Jy Zhang, X.B., 1992, "Debris Flow Behaviour - An Integrated Overview". *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS, Publ. N°209, pp. 217-225.

Davies, T.R., Phillips, C.J., Pearce, A.J, Zhang Xin Bao, 1991, "New Aspects of Debris Flow Behaviour", *Japan- US Workshop on Snow Avalanche, Landslides, Debris Flow Prediction and Control*, Sept. 30-Oct. 2, Tsukuba, Japan.

Enos, P., 1977, "Flow Regimes in Debris Flow", *Sedimentology*, 24, pp. 133-142.

Fink, J.H; Malin, M.C.; D'Alli, R.E.; Greely, R., 1981, "Rheological Properties of Mudflows Associated with the Spring 1980 Eruptions of Mount St Helens Volcano, Washington", *Geophysical Research Letters*, Vol.8 N°1, Jan, pp. 43-46.

Fisher, R.V. and Mattinson, J.M., 1968, "Wheeler Gorge Turbidite-Conglomerate Series, California; Inverse Grading", *Journal of Sedimentary Petrology* Vol.38, pp.1013-1023.

Guy, H., 1971, "Flood Flow Downstream form Slide", *Journal of the Hydraulic Division*, Proceeding of the ASCE, Vol.97, N°HY4, April.

Hampton, M.A., 1975, "Competence of Fine - Grained Debris Flows", *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 45, N°4, pp. 834-844.

Hampton, M.A., 1979, "Bouyancy in Debris Flows", *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol.49, N°3, pp. 0753-0758.

Hanes, D.M and Inman, F.L., 1985, "Observations of Rapidly Flowing Granular - Fluid Matrials", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.150, pp. 357-380.

Hays, W.W. (Editor), 1981, "Facing Geologic and Hydrologic Hazards. Earth-Science Considerations", *Geological Survey Professional Paper 1240-B*, U.S Government Printing Office, Washington, D.C.

Hollingsworth, R. and Kovacs, G.S., 1981, "Soil Slumps and Debris Flows: Prediction and Protection", *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. XVIII, N°1, pp. 17-28.

Hsu, K., 1975, "Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls", *Geological Society of America Bulletin*, Vol.86, pp. 129-140, Jan.

Hungr O., Morgan, G.C and Kellerhals, R, 1984, "Quantitative Analysis of Debris Torrent Hazards for Design of Remedial Measures", Canadian Geotechnical Journal, Vol.21, pp. 663-677.

Jenkins, J.T and Savage, S.B, 1983 "A Theory for the Rapid Flow of Identical Smooth Nearly Elastic Particles", Journal of Fluid Mechanics, Vol.130, pp. 187-202.

Johnson, P.A., Mc Cuen, R.H and Hromadka T.V, 1991, "Magnitude and Frequency of Debris Flows", Journal of Hydrology, 123, pp. 69-82.

Johnson, A.M, 1970, "Physical Processes in Geology", Freeman, Cooper, San Francisco, pp. 577.

Kang Zhichenz y Wan Yuzhang, 1992, "A Study of the Relationship Between Deposit Density and Debris Flow Type". Erosion pp. 247-252.

McCuen, R.H., Ayyub, B.M. and Hromadka, T.V, 1990 "Risk of Debris-Basin Failure", Journal of Water Resources Planning and Management Proceedings ASCE, Vol.116, N°4, July/August.

Naylor, M.A, 1980 "The origin of Inverse Grading in Muddy Debris Flow Deposits - A Review", Journal of Sedimentary Petrology, Vol.50, N°4, pp. 1111-1116.

Peña, H. y Klöhn, W., 1990, "Hidrología de Desastres en Chile. Crecidas Catastróficas Recientes de Origen No Meteorológico", Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol.5, N°1, Abr.

Pierson, T.C and Scott, K.M, 1985, "Downstream Dilution of a Lahar: Transition From Debris Flow to Hyperconcentrated Streamflow", Water Resources Research, Vol.21, N°10, pp. 1511-1524, Oct.

Rickenmann, D., 1991, "Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes", Journal of Hydraulic Engineering, Proceed ASCE, Vol. 117, N°11, Nov.

Shen, H and Achermann, N.L, 1982, "Constitutive Relationships for Fluid-Solid Mixtures", Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings ASCE, Vol.108, N°EM5, Oct.

Takahashi, T., 1980, "Debris Flow on Prismatic Open Channel", Journal of the the Hydraulics Division, Proceedings ASCE, Vol.106, N°HY3, March, pp. 381-396.

Takahashi, T., 1981, "Debris Flow", Annual Reviews in Fluid Mechanics, Vol. 13, pp. 57-77.

Takahashi, T., 1991, "Debris Flow", IAHR-AIRH, Monograph Series, AA Balkema/Rotterdam/Bnvokfield/1991.

Varnes, D.J., 1978, "Slope Movement Types and Processes" In Landslides; Analysis and Control, Edited by R.L. Schuster and R.J. Krizck. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., Special Report 176, pp. 11-33.

Wang Ying y Zhov Bifan, 1992, "Conversion Mechanism of Gravelly Soil to Viscous Flow". Erosión pp. 315-323.

Whipple, K.X., 1992, "Predicting Debris Runout and Deposition on Fans; The Importance of the Flow Hydrograph". Erosión pp. 337-345.

Zhu Pengcheng, 1992, "A Discussion on the Velocity of Debris Flow". Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions, Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS, Publ. N°209, pp. 369-374.

D. ANTECEDENTES SOBRE FLUJOS DE BARRO EN LA SEGUNDA REGION.

Araya, V., 1992, "Riesgo de Aluviones Perjudiciales en las Quebradas de la Cordillera de La Costa de la Segunda Región", Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, pp. 404.

Covarrubias, A., Misetic, V. y Araya, V., 1991, "El Aluvión del 18 de Junio desde el Punto de Vista de la Hidrología", Dpto. Ing. Civil U. de Antofagasta, pp. 28.

Karzulovic, J., Arenas, M. y Araya, V., 1991, "Los Aluviones del 18 de Junio de 1991 en Antofagasta", Ingeniería y Geotecnia Ltda., pp. 30.

Skorin Ingenieros, 1991, "Estudios Aluvionales en Antofagasta, Proposición de Soluciones Urbanísticas", Skorin Ingenieros, pp. 126.

Skorin Ingenieros, 1992, "Daños y Amenazas posibles sobre Vías del F.A.C.A.B., Incidencia del Nuevo Camino en Quebrada La Negra", Skorin Ingenieros, pp. 13.

Van Sint Jan, M., Talloni, P., Aracena, I. y Gallardo, A., 1992, "Aluvión en Antofagasta el 18 de Junio de 1991", Escuela de Ingeniería, Universidad Católica de Chile, pp. 37.

E. ANTECEDENTES METEOROLOGICOS

DMC, 1991: 'Hoja de Ruta Nacional Norte'. Confeccionada por la Dirección Meteorológica de Chile.

Kondrat'yev, K., 1965, "Actinometry", N.A.S.A., pp. 373-374. Washington. EE.UU.

NOAA, 1991, "Climate Diagnostics Bulletin: June 1991. Near Real-Time Analyses".

Rutllant, J., 1985, "Aspectos Generales de El Niño 1982-83", Investigación Pesquera, Vol. 32, 5-7.

Rutllant, J. y Fuenzalida H., 1991, "Synoptic Aspects of the Central Chile Rainfall Variability Associated with the Southern Oscillation", Int. Journal of Climatology, Vol. 11, 63-76.

Rutllant, J., P. Aceituno, A. Montecinos, 1992, "Análisis Comparativo de Aspectos Atmosféricos de El Niño/Osilación de Sur de 1982-83, 1986-87 y 1991-92", Investigación Pesquera. IFOP., CHILE.

Uccellini, L. y Johnson D., 1980, "The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms", Mon. Wea. Rev., Vol. 107, 682-703.

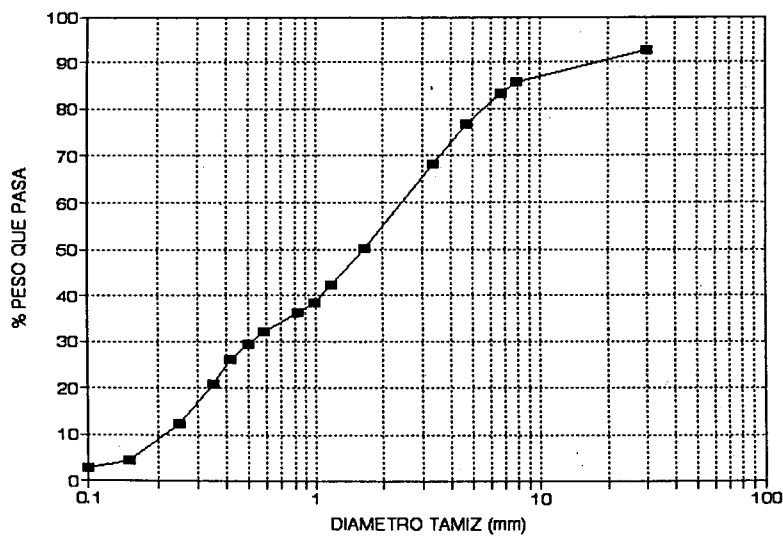
ANEXO I

Granulometría de las Cuencas de Antofagasta

**TABLA A1. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: LA NEGRA
MUESTRA N:14-A**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL QUE PASA
30.0	61.5			
30.0	61.5	7.37	7.37	92.63
7.9	56.7	6.80	14.17	85.83
6.7	20.3	2.43	16.60	83.40
4.7	56.6	6.79	23.39	76.61
3.3	69.9	8.38	31.77	68.23
1.7	149.9	17.97	49.74	50.26
1.2	67.2	8.06	57.80	42.20
1.0	30.6	3.67	61.47	38.53
0.8	18.7	2.24	63.71	36.29
0.6	34.7	4.16	67.87	32.13
0.5	23.8	2.85	70.72	29.28
0.4	27.0	3.24	73.96	26.04
0.4	42.2	5.06	79.02	20.98
0.3	71.5	8.57	87.59	12.41
0.2	66.7	8.00	95.59	4.41
0.1	15.9	1.91	97.49	2.51
0.0	20.9	2.51	100.00	0.00
TOTAL	834.1	100		

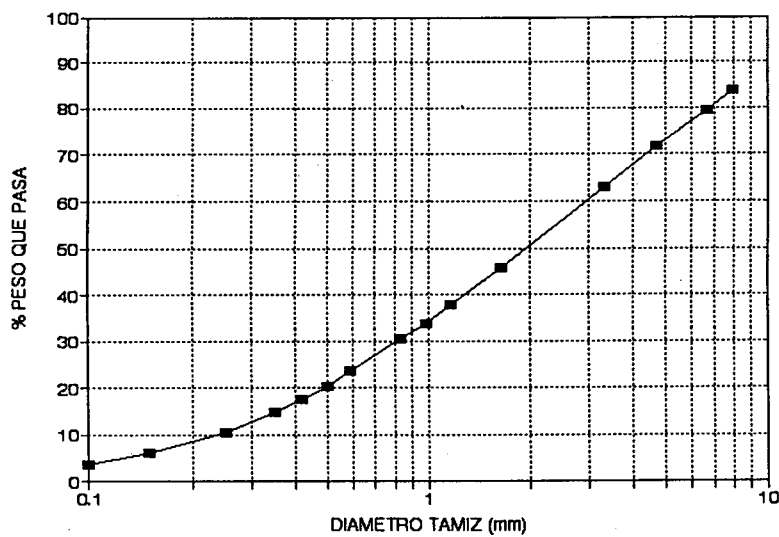
**CURVA GRANULOMETRICA
Q. LA NEGRA.**



**TABLA A2. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: EL ANCLA
MUESTRA N:18-A**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL QUE PASA
15.00		0.00	0.00	100.00
7.92	67.9	16.11	16.11	83.89
6.68	18.7	4.44	20.54	79.46
4.70	32.4	7.69	28.23	71.77
3.33	37.2	8.82	37.05	62.95
1.65	71.9	17.05	54.10	45.90
1.17	34.4	8.16	62.26	37.74
0.99	18.0	4.27	66.53	33.47
0.83	13.3	3.15	69.69	30.31
0.59	28.5	6.76	76.45	23.55
0.50	14.2	3.37	79.81	20.19
0.42	11.0	2.61	82.42	17.58
0.35	11.7	2.78	85.20	14.80
0.25	19.3	4.58	89.78	10.22
0.15	18.0	4.27	94.05	5.95
0.10	10.6	2.51	96.56	3.44
0.00	14.5	3.44	100.00	0.00
TOTAL	421.6	100		

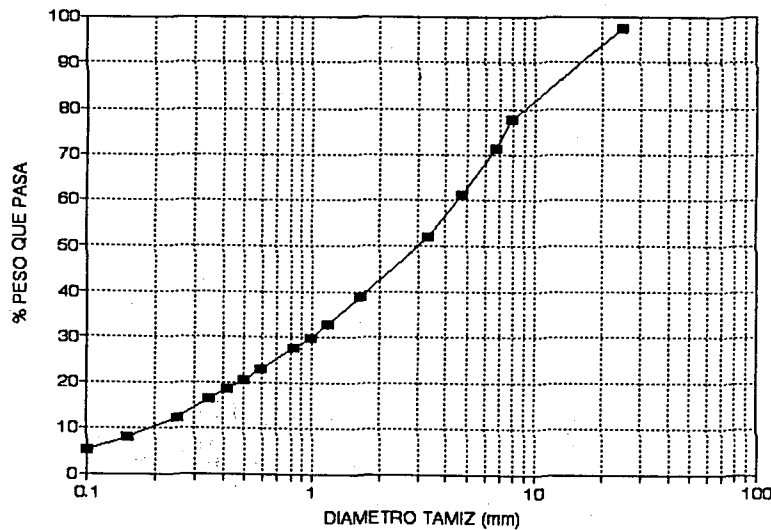
**CURVA GRANULOMETRICA
Q. EL ANCLA**



**TABLA A3. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: LA CADENA
MUESTRA N:13-A**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL QUE PASA
39.10				
24.70	17.2	2.64	2.64	97.36
7.92	127.1	19.51	22.15	77.85
6.68	42.7	6.55	28.70	71.30
4.70	66.4	10.19	38.89	61.11
3.33	58.2	8.93	47.83	52.17
1.65	86.6	13.29	61.12	38.88
1.17	39.8	6.11	67.23	32.77
0.99	20.1	3.09	70.31	29.69
0.83	14.5	2.23	72.54	27.46
0.59	30.7	4.71	77.25	22.75
0.50	15.7	2.41	79.66	20.34
0.42	12.5	1.92	81.58	18.42
0.35	13.6	2.09	83.67	16.33
0.25	26.8	4.11	87.78	12.22
0.15	28.5	4.37	92.16	7.84
0.10	17.7	2.72	94.87	5.13
0.00	33.4	5.13	100.00	0.00
TOTAL	651.5	100		

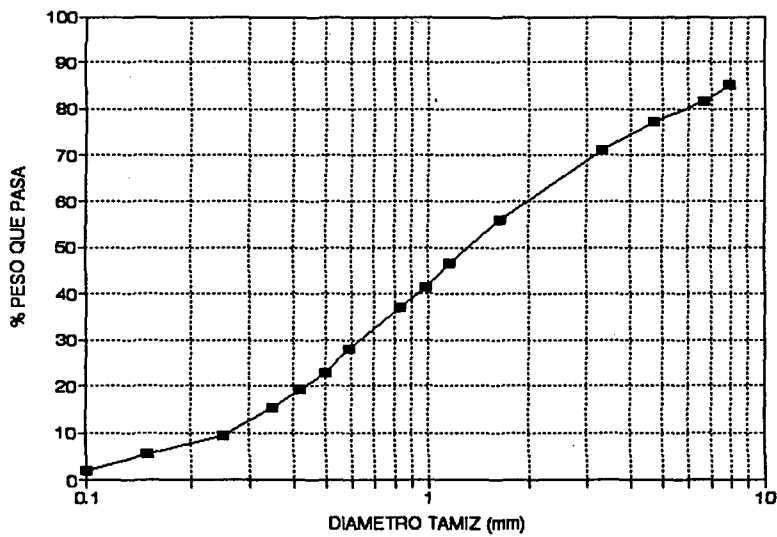
**CURVA GRANULOMETRICA
Q. LA CADENA**



**TABLA A4. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: CARACOLES
MUESTRA N:1-A**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETENACUM.	% PESO ACUMULA QUE PASA
40.00		0.00	0.00	100.00
7.92	50.3	14.80	14.80	85.20
6.68	11.5	3.38	18.18	81.82
4.70	15.1	4.44	22.62	77.38
3.33	20.6	6.06	28.68	71.32
1.65	52.7	15.50	44.19	55.81
1.17	31.3	9.21	53.40	46.60
0.99	18.3	5.38	58.78	41.22
0.83	14.4	4.24	63.02	36.98
0.59	31.0	9.12	72.14	27.86
0.50	17.0	5.00	77.14	22.86
0.42	12.7	3.74	80.88	19.12
0.35	13.1	3.85	84.73	15.27
0.25	20.2	5.94	90.67	9.33
0.15	13.2	3.88	94.56	5.44
0.10	11.8	3.47	98.03	1.97
0.00	6.7	1.97	100.00	0.00
TOTAL	339.9	100		

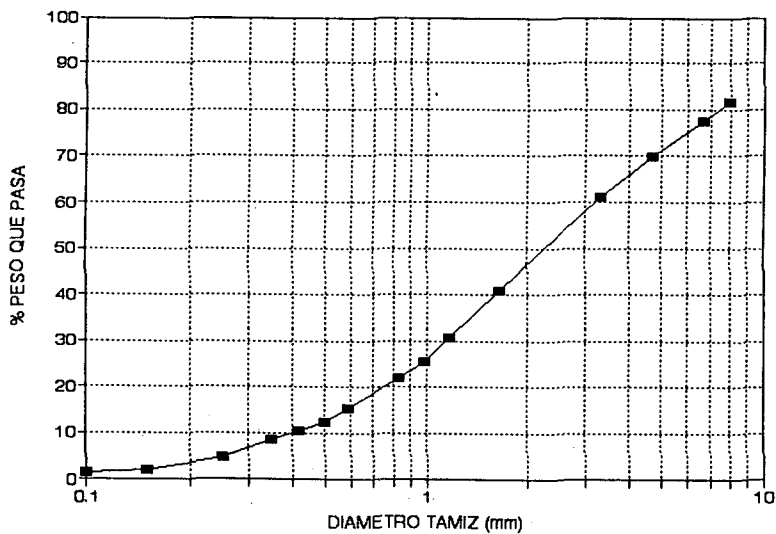
**CURVA GRANULOMETRICA
Q. CARACOLES**



**TABLA A5. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: EL TORO
MUESTRA N:2-A**

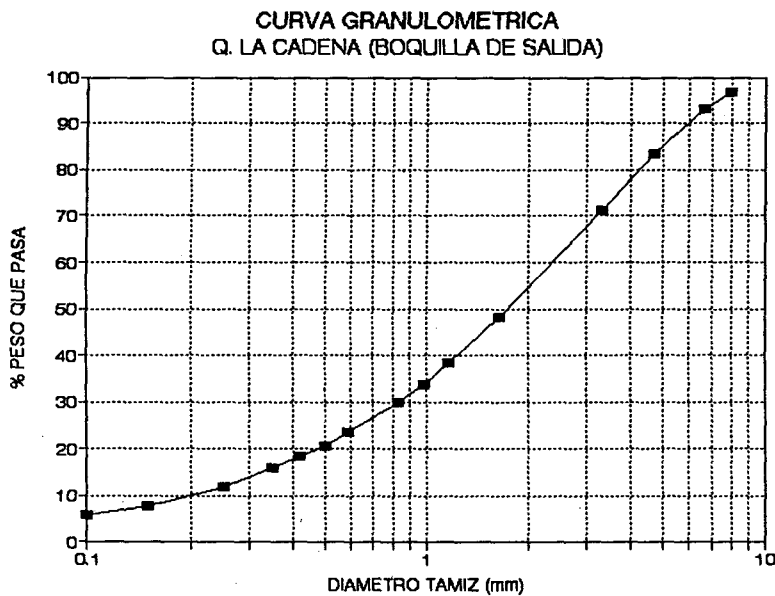
D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL QUE PASA
41.60		0.00	0.00	100.00
7.92	111.1	18.41	18.41	81.59
6.68	24.6	4.08	22.48	77.52
4.70	46.7	7.74	30.22	69.78
3.33	52.5	8.70	38.92	61.08
1.65	122.2	20.25	59.16	40.84
1.17	61.8	10.24	69.40	30.60
0.99	31.0	5.14	74.54	25.46
0.83	21.7	3.60	78.13	21.87
0.59	40.2	6.66	84.79	15.21
0.50	17.0	2.82	87.61	12.39
0.42	11.6	1.92	89.53	10.47
0.35	12.2	2.02	91.55	8.45
0.25	23.5	3.89	95.44	4.56
0.15	15.4	2.55	98.00	2.00
0.10	4.5	0.75	98.74	1.26
0.00	7.6	1.26	100.00	0.00
TOTAL	603.6	100		

**CURVA GRANULOMETRICA
Q. EL TORO**



**TABLA A6. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: LA CADENA (BOQUILLA DE SALIDA)
MUESTRA N:3**

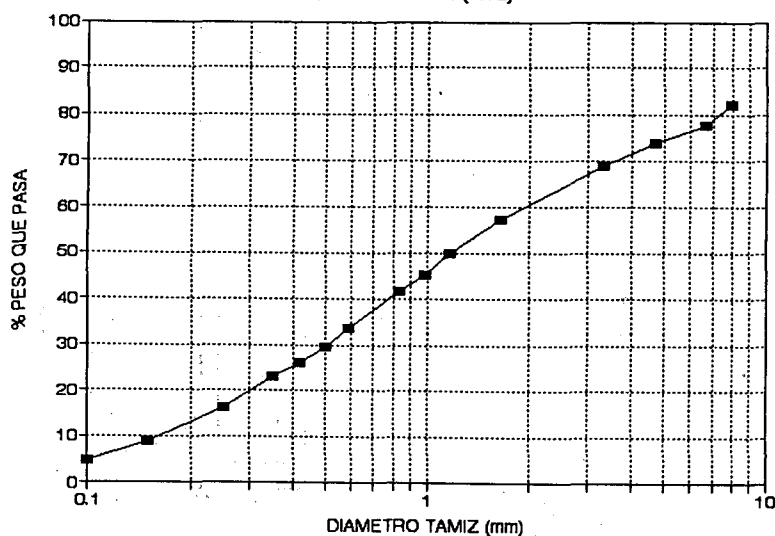
D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (g)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL. QUE PASA
15.00		0.00	0.00	100.00
7.92	14.6	3.28	3.28	96.72
6.68	15.8	3.55	6.83	93.17
4.70	42.7	9.59	16.42	83.58
3.33	54.1	12.15	28.57	71.43
1.65	102.6	23.04	51.61	48.39
1.17	44.8	10.06	61.67	38.33
0.99	21.7	4.87	66.54	33.46
0.83	15.2	3.41	69.95	30.05
0.59	29.1	6.53	76.49	23.51
0.50	13.2	2.96	79.45	20.55
0.42	10.5	2.36	81.81	18.19
0.35	9.8	2.20	84.01	15.99
0.25	18.7	4.20	88.21	11.79
0.15	18.2	4.09	92.30	7.70
0.10	9.8	2.20	94.50	5.50
0.00	24.5	5.50	100.00	0.00
TOTAL	445.3	100		



**TABLA A7. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: LA CADENA
MUESTRA N: 10**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL. QUE PASA
15.00		0.00	0.00	100.00
7.92	82.00	17.81	17.81	82.19
6.68	19.30	4.19	22.00	78.00
4.70	18.00	3.91	25.91	74.09
3.33	23.20	5.04	30.95	69.05
1.65	53.50	11.62	42.57	57.43
1.17	34.90	7.58	50.15	49.85
0.99	21.10	4.58	54.74	45.26
0.83	16.80	3.65	58.38	41.62
0.59	36.90	8.01	66.40	33.60
0.50	18.70	4.06	70.46	29.54
0.42	16.40	3.56	74.02	25.98
0.35	13.70	2.98	77.00	23.00
0.25	31.40	6.82	83.82	16.18
0.15	35.10	7.62	91.44	8.56
0.10	18.40	4.00	95.44	4.56
0.00	21.00	4.56	100.00	0.00
TOTAL	460.4	100		

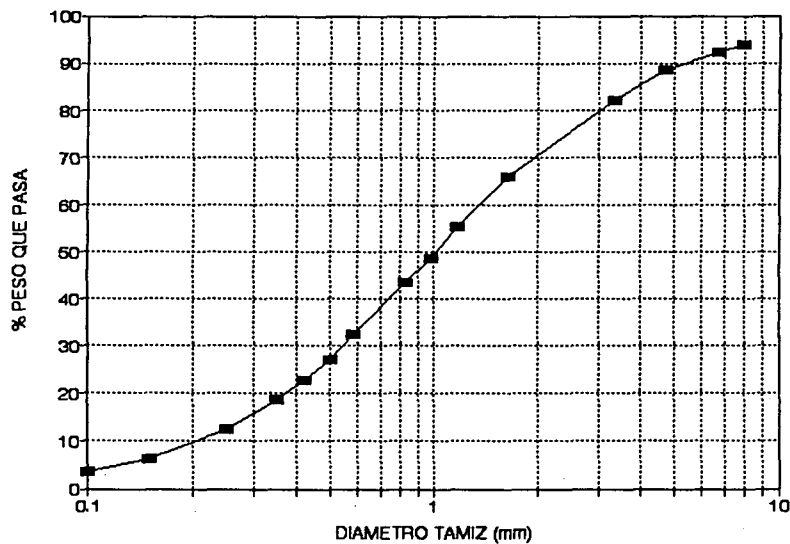
**CURVA GRANULOMETRICA
Q. LA CADENA (N10)**



**TABLA A8. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: LA CADENA (SECTOR ALTO)
MUESTRA N: 8**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL QUE PASA
7.92	34.70	6.20	6.20	93.80
6.68	9.40	1.68	7.88	92.12
4.70	20.90	3.73	11.61	88.39
3.33	35.50	6.34	17.95	82.05
1.65	89.90	16.06	34.01	65.99
1.17	59.70	10.66	44.68	55.32
0.99	37.80	6.75	51.43	48.57
0.83	28.90	5.16	56.59	43.41
0.59	60.60	10.83	67.42	32.58
0.50	30.90	5.52	72.94	27.06
0.42	23.80	4.25	77.19	22.81
0.35	23.20	4.14	81.33	18.67
0.25	33.90	6.06	87.39	12.61
0.15	36.80	6.57	93.96	6.04
0.10	14.30	2.55	96.52	3.48
0.00	19.50	3.48	100.00	0.00
TOTAL	559.80	100.00		

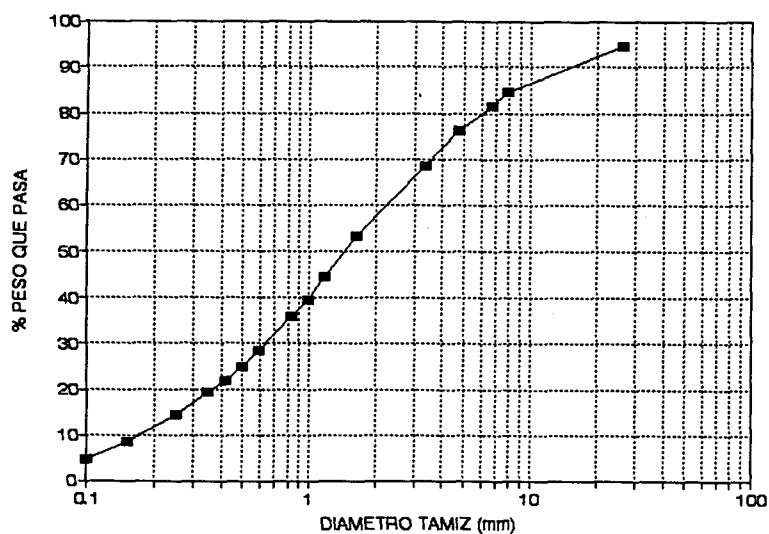
**CURVA GRANULOMETRICA
Q. LA CADENA (SECTOR ALTO)**



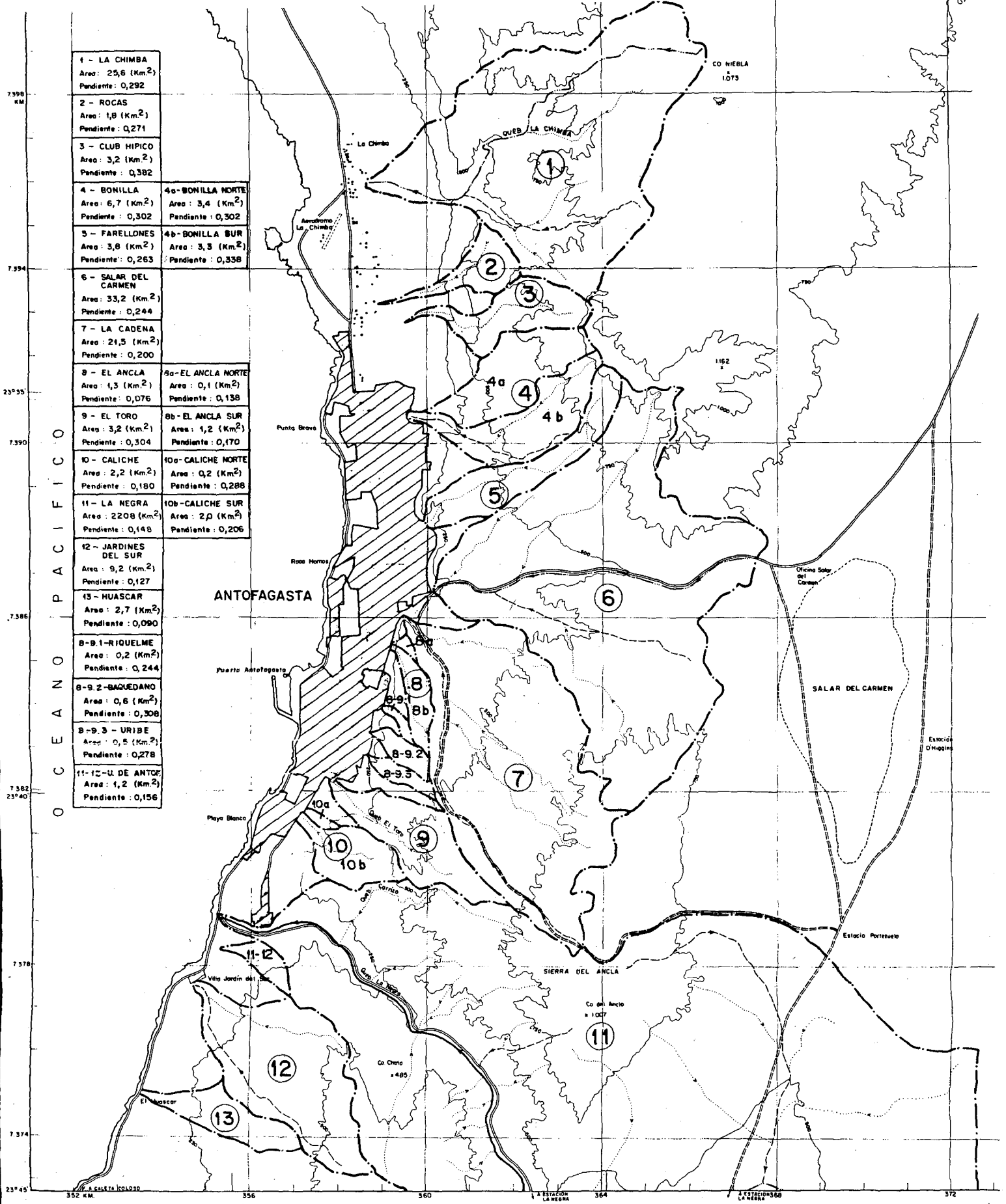
**TABLA A9. ESTUDIO DE ALUVIONES EN ANTOFAGASTA
CURVA GRANULOMETRICA DE QUEBRADAS
QUEBRADA: SALAR DEL CARMEN
MUESTRA N: 6**

D.TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% PESO RETENIDO	% PESO RETEN.ACUM.	% PESO ACUMUL. QUE PASA
26.20				
26.20	30.10	5.44	5.44	94.56
7.92	54.30	9.81	15.25	84.75
6.68	17.90	3.24	18.49	81.51
4.70	28.90	5.22	23.71	76.29
3.33	41.60	7.52	31.23	68.77
1.65	86.00	15.54	46.77	53.23
1.17	48.40	8.75	55.52	44.48
0.99	27.40	4.95	60.47	39.53
0.83	20.20	3.65	64.12	35.88
0.59	41.50	7.50	71.62	28.38
0.50	20.20	3.65	75.28	24.72
0.42	15.70	2.84	78.11	21.89
0.35	14.70	2.66	80.77	19.23
0.25	27.50	4.97	85.74	14.26
0.15	32.50	5.87	91.61	8.39
0.10	20.80	3.76	95.37	4.63
0.00	25.60	4.63	100.00	0.00
TOTAL	553.30	100.00		

**CURVA GRANULOMETRICA
Q. SALAR DEL CARMEN**



1 - LA CHIMBA Area: 25,6 (Km ²) Pendiente: 0,292	
2 - ROCAS Area: 1,8 (Km ²) Pendiente: 0,271	
3 - CLUB HIPICO Area: 3,2 (Km ²) Pendiente: 0,382	
4 - BONILLA Area: 6,7 (Km ²) Pendiente: 0,302	4a- BONILLA NORTE Area: 3,4 (Km ²) Pendiente: 0,302
5 - FARELLONES Area: 3,8 (Km ²) Pendiente: 0,263	4b- BONILLA SUR Area: 3,3 (Km ²) Pendiente: 0,358
6 - SALAR DEL CARMEN Area: 33,2 (Km ²) Pendiente: 0,244	
7 - LA CADENA Area: 21,5 (Km ²) Pendiente: 0,200	
8 - EL ANCLA Area: 4,3 (Km ²) Pendiente: 0,076	8a- EL ANCLA NORTE Area: 0,1 (Km ²) Pendiente: 0,138
9 - EL TORO Area: 3,2 (Km ²) Pendiente: 0,304	8b- EL ANCLA SUR Area: 4,2 (Km ²) Pendiente: 0,170
10 - CALICHE Area: 2,2 (Km ²) Pendiente: 0,180	10a- CALICHE NORTE Area: 0,2 (Km ²) Pendiente: 0,288
11 - LA NEGRA Area: 2208 (Km ²) Pendiente: 0,148	10b- CALICHE SUR Area: 2,0 (Km ²) Pendiente: 0,206
12 - JARDINES DEL SUR Area: 9,2 (Km ²) Pendiente: 0,127	
13 - HUASCAR Area: 2,7 (Km ²) Pendiente: 0,090	
8-9-1-RIQUELME Area: 0,2 (Km ²) Pendiente: 0,244	
8-9-2-BAGUEDANO Area: 0,6 (Km ²) Pendiente: 0,308	
8-9-3-URIBE Area: 0,5 (Km ²) Pendiente: 0,278	
11-12-U. DE ANTOF Area: 1,2 (Km ²) Pendiente: 0,156	

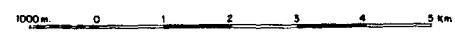


O C E A N O P A C I F I C O

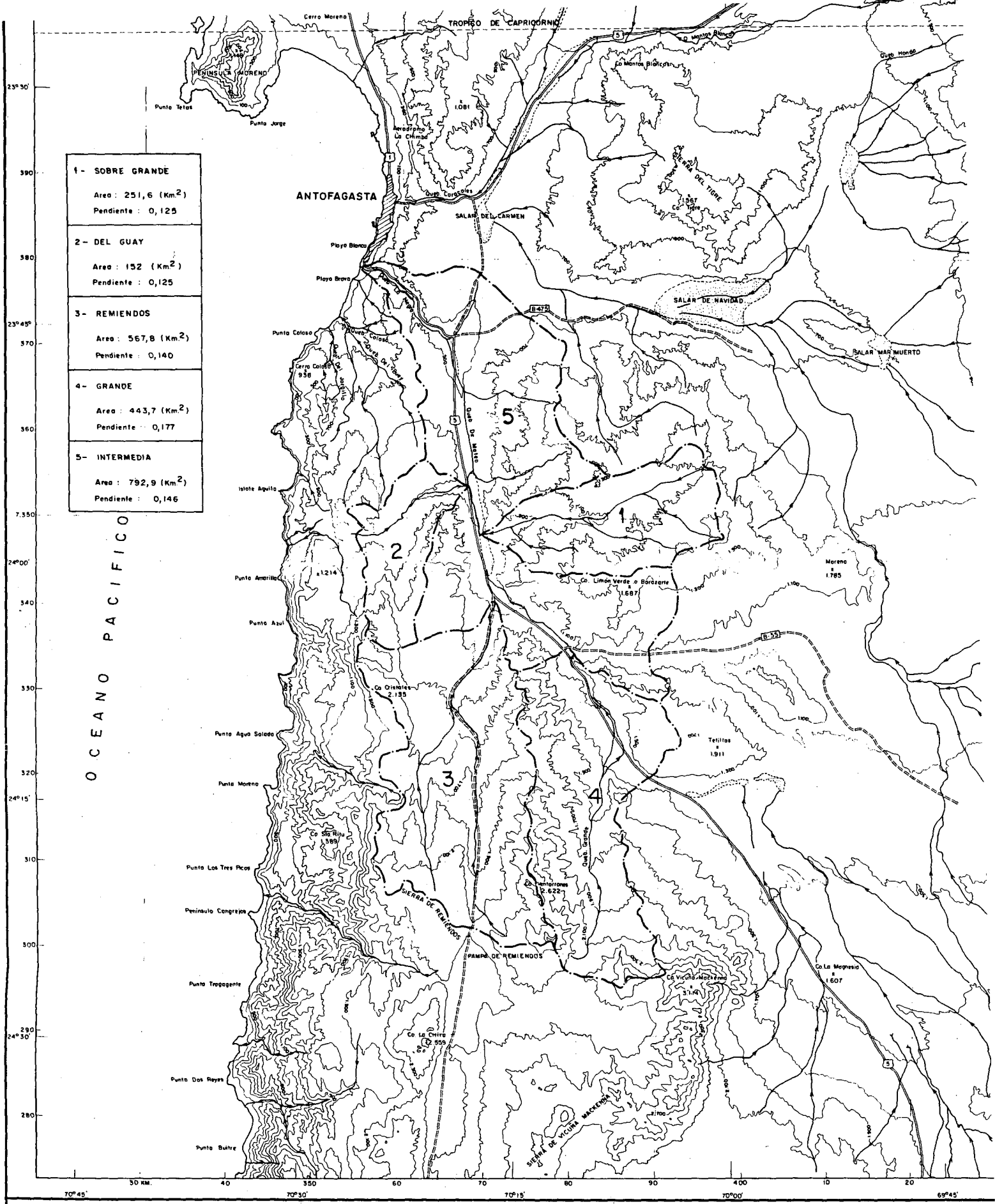
ANTOFAGASTA

SIMBOLOGIA

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| CAMINO PAVIMENTADO | CAUCE DE PRIMER ORDEN |
| CAMINO SIN PAVIMENTAR | CAUCE DE SEGUNDO ORDEN |
| CURVA DE NIVEL | CAUCE DE TERCER ORDEN |
| AREA URBANA | CAUCE DE QUINTO ORDEN |
| DIVISORIA DE CUENCAS | |



DIRECTOR GENERAL DE AGUAS		MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS DIRECCION GENERAL DE AGUAS DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS		NOMBRE DEL PLANO DELIMITACION DE CUENCAS	
JEFE DEPTO DE ESTUDIOS	UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD CS. FISICAS Y MATEMATICAS DEPTO INGENIERIA CIVIL	NOMBRE DEL PROYECTO CRECIDAS SUBITAS Y CORRIENTES DE DETRITOS OCURRIDAS EL 18 DE JUNIO DE 1991 EN ANTOFAGASTA		ESCALA 1: 50.000	PLANO N° 1
FECHA EJECUCION MAYO, 1993	FECHA APROBACION:			LAMINA 2 de 2	



1- SOBRE GRANDE
Area : 251,6 (Km ²)
Pendiente : 0,125
2- DEL GUAY
Area : 152 (Km ²)
Pendiente : 0,125
3- REMIENDOS
Area : 567,8 (Km ²)
Pendiente : 0,140
4- GRANDE
Area : 443,7 (Km ²)
Pendiente : 0,177
5- INTERMEDIA
Area : 792,9 (Km ²)
Pendiente : 0,146

OCEANO PACIFICO

SIMBOLOGIA

- CAMINO PAVIMENTADO
- CAMINO SIN PAVIMENTAR
- CURVA DE NIVEL
- AREA URBANA
- DIVISORIA
- CAUCE Y DIRECCION
- SALAR



DIRECCION GENERAL DE AGUAS		MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS		NOMBRE DEL PLANO	
JEFE DEPTO DE ESTUDIOS		DIRECCION GENERAL DE AGUAS		DELIMITACION DE CUENCAS	
UNIVERSIDAD DE CHILE		DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS			
FACULTAD CS FISICAS Y MATEMATICAS		NOMBRE DEL PROYECTO		ESCALA	
DEPTO INGENIERIA CIVIL		CRECIDAS SUBITAS Y CORRIENTES DE DETRITOS OCURRIDAS EL 18 DE JUNIO DE 1991 EN ANTOFAGASTA		1:250.000	
FECHA EJECUCION		FECHA APROBACION		PLANO N°	
MAYO, 1993				I	
				LAMINA	
				1 de 2	
				REVI	

ANEXO II

Análisis Fotogeológico

Huáscar

Reconocimiento de erosión y transporte de arena con recubrimiento de caminos en el faldeo y erosión y recubrimiento en el caserío de el Huáscar. Al parecer erosión de arenas eólicas y transporte de ellas.

Jardín del Sur

Notoria erosión en el ápice del cono formado por flujos de detritos, eliminación de un terraplén en antiguo camino o FFCC (o cañería agua?) Erosión también en la parte alta del barranco (que es pequeño aquí). Hoya arenosa eólica ?. La erosión al parecer es bastante puntual y remitida al cauce solamente (no es laminar, ni por hilillos múltiples).

Erosión profunda en una especie de salto inmediatamente abajo del terraplén del camino. Cobertura del flujo de detritos en casas que se interponen al cauce (en el sector axial del cono)

Carrizo

En desembocadura de quebrada Carrizo en La Negra se aprecia erosión en todo el sector como una recanalización. La depositación ocurrió en la quebrada La Negra misma (o confluyó con el flujo respectivo).

La Negra

Se advierte erosión y eliminación de toda estructura existente en el fondo de la quebrada. Cerca de la desembocadura se produce un salto por erosión.

En la desembocadura hay erosión y recubrimiento de la Carretera. El fenómeno se remite solo al cauce de La Negra. Acceso a la parte superior por el camino de quebrada La Cadena (?)

Caliche

Erosión al parecer de arenas en la parte superior (alto del barranco costero), Hoya arenosa eólica? Eliminación del corte y terraplén del tendido de agua potable en el faldeo. Depositación en un cono de flujo de detritos, en el pié de falda contra edificios de mediana altura (atrás del edificio curvo). Deposición y erosión en un frente relativamente ancho en la base. Riesgo notorio en caso de repetición del fenómeno. Area de riesgo. Ruptura tendido de Agua potable. Peligro de flujo no encauzado.

El Toro

En quebrada El Toro sur erosión en el fondo alto de quebrada y lavado de parches de arena en las laderas (en especial de ladera sur). (Poca disponibilidad de material suelto en laderas rocosas al parecer). Rotura de la cañería en sector amplio (casi total) aguas arriba de la Cantera. La hoya de esta quebrada no es arenosa prácticamente. Erosión del material de lastre de la Cantera, rellenamiento de depresiones. Eliminación de Regimiento en la base de la hondonada. Erosión en sector de cabecera de la hondonada producida por antigua Cantera. Peligro inmediatamente aguas abajo del desmonte, en especial de flujo no encauzado y en zona axial.

Baquedano Sur

Erosión en sector de antigua área de extracción de materiales (gravillas o rocas ?) Erosión en el sector de la vuelta (área del estanque de agua) Erosión en la zona apical del cono inferior. Rellenamiento en sector distal del cono (sector de antigua hondonada) en que hay construcción (Escuela)

Baquedano Norte

Acceso a la parte superior por el camino de quebrada La Cadena. Erosión y eventualmente pequeños derrumbes en el sector de la vuelta y salto en su tramo medio. Al parecer roca en mal estado en ese sector. Erosión en la zona apical del cono (aguas arriba del camino). Erosión por ensanchamiento lateral y/o desmoronamiento en donde se abre el cono (aguas arriba del camino). Relleno en el sector del camino y erosión luego en el sector que continua mas abajo de él (se abre un canal dentro del ya existente o mas bien se profundiza el existente). Sedimentación en la zona del plano inferior, inmediata al camino de circunvalación.

El Ancla

No mucha erosión (poca mas bien) en el tramo superior. Acceso por quebrada La Cadena a dicho sector alto. Erosión en el sector del salto de la quebrada y erosión en zona apical y desembocadura en el plano inferior (inmediatamente aguas arriba del camino) Depositación en las calles que bajan por el cono.

La Cadena

Erosión y alisamiento del fondo de la quebrada en la parte superior (eliminación de irregularidades: Basuras, costra, excavaciones de áridos, etc) Erosión y alisamiento en el tramo inferior inmediato al ápice del cono. Erosión y destrucción en el ápice del cono. Depositación en el cuerpo o manto del cono y extensión posiblemente mas allá

hasta la zona de FFCC al juntarse con flujos de quebrada Salar del Carmen. Posible centro de depositación en hondonada y pequeño barranquito que limita el cono por el sur.

Salar del Carmen

Erosión al parecer poco marcada (quizás mas bien laminar delgada) en el curso medio e inferior de la quebrada. Erosión en zona de desembocadura de quebradas tributarias menores. Depositación en el manto del cono y en especial al parecer en una hondonada que limita el cono en su parte norte, con un pequeño barranquito. Depositación y prolongación por la zona axial del cono, pendiente abajo hasta la zona del FFCC.

Farellones

Sedimentación en tramo superior de la quebrada (luego de una 1º fase de erosión?) Escaso aprovisionamiento de sedimentos en la parte superior. Erosión y alisamiento (eliminación de excavaciones de extracción de áridos) en la zona apical, relleno en la zona inmediatamente aguas arriba del camino. Escaso flujo y cobertura en la zona del manto del cono.

Bonilla

Erosión en parte superior, mediano aporte o aprovisionamiento de sedimentos en ese sector. Alisamiento (erosión y/o relleno) en la parte apical situada inmediatamente agua arriba del estanque. Alisamiento (rellenamiento y algo de erosión) en sector apical, aguas abajo del estanque. Zona muy irregular, con hondonadas y hoyos (zanjas) de extracción de áridos. El cauce corre muy excavado en el cono antiguo. Rellenamiento en sector distal, cobertura pequeña, hasta unas 1,5 cuadras abajo.

ANEXO III

Información Pluviométrica

TABLA A3.1 ESTACION CERRO MORENO
LATITUD : 23°26'
LONGITUD : 70°23'
ALTURA : 119 m

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1969	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.5	4.0	0.1	0.0	0.1	0.0	7.7
1970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.1	0.0	0.6	0.0	2.3
1971	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
1972	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.7
1973	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
1974	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.3	0.0	0.0	0.0	2.4
1975	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
1976	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.1	5.0	0.0	0.0	0.0	15.2
1977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	2.0
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
1979	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5
1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4	0.8	0.0	0.0	0.0	1.6
1983	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.8
1984	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	4.1
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.1	0.0	0.0	0.1	0.0	1.3
1986	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	0.0	0.0	1.4
1987	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	8.8
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1
PROM	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	0.8	0.5	0.0	0.1	0.0	3.0

TABLA A3.2 ESTACION DGA
LATITUD : 23°41'
LONGITUD : 70°25'
ALTURA : 50 m

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1979	0.3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4
1981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	3.0	0.5	0.0	0.0	7.5
1983	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	3.0	2.5	1.0	0.0	0.0	0.0	12.9
1984	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1986	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.2	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	18.9
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0
PROM	0.5	0.0	0.1	0.0	0.1	1.5	1.6	0.6	0.4	0.1	0.0	0.0	4.8

TABLA A3.3 UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE
LATITUD : 23°40'
LONGITUD : 70°24'19"
ALTURA : ?

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1969	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4
1970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1971	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6
1972	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.2	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8
1973	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1974	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9
1975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
1976	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1977	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
1979	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
1980	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	2.0	0.0	0.0	2.4
1981	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
1982	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	1.0	1.2	0.0	0.0	0.0	7.7
1983	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	4.4
1984	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.9
1985	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
1986	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	23.6
1988	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.0
PROM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.0	1.1	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0	4.2

TABLA A3.4 ESTACION PORTEZUELO
LATITUD : ?
LONGITUD : ?
ALTURA : ?

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1904	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5
1905	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5
1906	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	2.6	4.9
1907	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.6	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0	9.0
1908	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	2.2
1909	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1910	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	3.5
1911	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0
1912	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	1.7	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	6.4
1913	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	0.0	0.0	0.0	6.3
1914	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-
1915	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1916	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1917	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1918	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1919	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1920	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	6.2
1921	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
1922	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.5
1923	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.7
1924	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	6.8	0.0	0.0	0.0	7.3
1925	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.3	10.9	1.6	0.0	0.0	0.0	28.8
1926	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1927	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	12.8
1928	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.3
1929	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	4.0	0.0	-
1930	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.2	0.0	0.0	0.2	0.0	28.4
1931	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	1.0	0.0	4.4
1932	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0
1933	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0
1934	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2
1935	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.1	9.7	0.0	0.0	11.2
1936	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.3	1.3	0.0	0.0	4.1
1937	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0
1938	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	2.0	0.0	3.0
1939	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	8.0

TABLA A3.4 ESTACION PORTEZUELO (Cont.)

LATITUD : ?

LONGITUD : ?

ALTURA : ?

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1940	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.4	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	56.9
1941	0.0	0.0	0.0	8.0	1.0	4.0	0.0	0.0	0.6	5.1	0.0	0.0	18.7
1942	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.2	0.5	0.0	0.0	1.3
1943	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1944	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1945	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1946	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1947	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1948	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1949	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1950	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1951	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1952	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1953	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1954	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1955	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1956	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	1.4
1957	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1958	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1959	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.4	0.0	0.0	0.0	4.9
1960	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8
1961	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
1962	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	1.5
1963	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
1964	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
1965	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5
1966	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1967	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	2.2	2.3	0.0	1.2	0.0	6.5
1968	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PROM	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	1.0	1.4	0.8	0.6	0.5	0.3	0.1	4.7

TABLA A3.5 REGISTROS PARA TALTAL
LATITUD : 25°25'
LONGITUD : 70°34'
ALTURA : 39 m

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1913	0	0	0	0.4	0	0.8	0	9.8	0.2	2.1	0	0	13.3
1914	0	0	0	0.6	0	1.7	0	0.5	8	3	0	0	13.8
1915	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	-
1916	0	0	0	0	7.9	0	0	0	0	4.2	0	0	12.1
1917	0	0	0	0	0	0	2.8	0	0	0	0.4	0	3.2
1918	0	0	0	0	24.8	5.4	0.7	-	-	-	-	0	-
1919	0	0	0	0	0.7	6.6	0.4	0.8	2.1	0	3.5	0	10.6
1920	0	0	0	0	0	14	1.5	5.1	2	6.2	0	0	28.8
1921	0	0	0	0	0.8	0	0	2	0	1	1.4	0.5	4.9
1922	0	0	0	0	3.4	2.9	0	2.8	0.3	0.3	3.9	3.5	17.1
1923	2	0	0	1	0	1	12	2	0	3	1	0	20
1924	1.7	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0.4	0.3	14.4
1925	0	0	0	0	0	0	0	19	1	0.6	0.2	0	20.8
1926	0	0	0.3	0	1.5	25	0	0.7	1.2	3.5	0.1	0.4	32.7
1927	0	0	0	1.3	0	40.5	26.3	0	2.4	0	0	1.8	72.3
1928	0	0	0	0	0	0	40.3	0.6	0	0	1.4	0	42.3
1929	0	0	0	0	9	29	0	0	1	0	1	0	40
1930	0	0	0	0	5	0	0	1	0	0	0	0	6
1931	0	0.1	0	1.8	0	0	0	0	0	9	4	0	14.9
1932	0	0	0	5	0	0	30	0	0	1	1	0	39
1933	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	6
ESTACION CLAUSURADA - REINSTALADA EN 30/SEP/71													
1971	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1972	0	0	0	0	0	1.1	5	6.5	11	0	0	0	23.6
1973	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3
1974	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1975	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
1976	0	0	0	0	3.5	0	4	0	0	0	0	0	7.5
1977	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLA A3.6 REGISTROS PARA TALTAL
LATITUD : 25°25'
LONGITUD : 70°34'
ALTURA : 9 m

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-
1987	0	0	0	0	0	0	54.5	0	3.5	4.5	0.5	1	64
1988	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.3	0	0.5	0	1
1989	0	0	0	0	0	0	0	1.8	0	2.5	0	0	4.3
1990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0	35.5	0	0	0	0	0	0	0