

A I I H - A I P H - I A H R
XVI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA
7 AL 11 DE NOVIEMBRE DE 1994
SANTIAGO, CHILE

**ASPECTOS HIDROMETEOROLOGICOS E HIDRODINAMICOS
DE ALGUNOS EVENTOS ALUVIONALES RECIENTES EN CHILE**

Luis Ayala Riquelme, Ph.D. (1)
Alejandro López Alvarado (2)
(1) Profesor Titular
(2) Profesor Asociado

Aldo Tamburrino Tavantzis, Ph.D. (3)
Guillermo Vera Rodríguez (4)
(3) Profesor Asistente
(4) Ayudante de Investigación

Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
Santiago, Chile

RESUMEN

Se presenta información geológica-geomorfológica, meteorológica, hidrológica e hidráulica sobre cuatro eventos aluvionales ocurridos en la última década en la zona central, norte y austral de Chile. Se analizan y discuten los antecedentes de cada uno de estos eventos, caracterizando principalmente los factores y mecanismos hidrometeorológicos vinculados a su generación, así como el comportamiento hidráulico global de los flujos de detritos o coladas de barro que ocurrieron. Se concluye que no obstante que todos estos eventos dieron origen de alguna manera a corrientes de detritos o barro aparentemente semejantes, para fines de su modelación hidrodinámica resulta básico identificar y diferenciar apropiadamente los factores desencadenantes, ya que éstos determinan en forma decisiva las hipótesis y ecuaciones de los modelos a emplear.

ABSTRACT

Geologic-geomorphic, meteorologic, hydrologic and hydraulic information of four debris flow events that occurred within the last decade in the central, northern and southern Chile are reported in this paper. The data of each of these events are analyzed and discussed, mainly characterizing the hydrometeorological factors and mechanisms associated to their generation as well as the global hydraulic behaviour of the debris and mud flows that occurred. It is concluded that notwithstanding the apparently similar flows generated during all these events, for the purpose of their hydrodynamic modelling it becomes of basic importance to properly identify and differentiate the main triggering factors since they determine in a decisive way the hypotheses and equations of the models to be used.

INTRODUCCION

En un lapso de menos de siete años, entre fines de 1987 y mediados de 1993, han ocurrido en Chile cuatro grandes desastres vinculados a eventos aluvionales que han causado varios cientos de muertos y decenas de millones de dólares en daños. Estos eventos se han manifestado como corrientes de detritos, flujos de barro y crecidas fluviales hiperconcentradas, cuyas características hidrometeorológicas e hidrodinámicas son poco conocidas.

La necesidad de incorporar estos riesgos en la planificación de ciudades, instalaciones hidroeléctricas, mineras y otras, que se desarrollan cada vez más en ambientes naturales geológica y geomorfológicamente propicios para generar este tipo de eventos, ha conducido a iniciar investigaciones sistemáticas en Chile, orientadas a documentarlos en base a información existente y a caracterizarlos tanto cualitativamente como cuantitativamente. Con ello se busca posibilitar en el mediano plazo la identificación y estudio de soluciones técnicas y económicamente factibles de materializar en nuestro país, atendida la incertidumbre que conlleva el pronóstico y evaluación de estos fenómenos tan destructivos. Un aspecto especialmente importante a considerar en relación a esto último lo contribuyen las características reológicas e hidráulica de este tipo de corrientes, cuyas concentraciones volumétricas de sólidos pueden variar desde un 10 a 20% hasta valores que superan el 60%. Esta amplia variación en el contenido de sólidos determina comportamientos mecánicos diferentes que obligan a adoptar hipótesis y ecuaciones de modelación distintos.

ALUVION DEL RIO COLORADO, CUENCA DEL RIO MAIPO (1987)

El 29 de noviembre de 1987 se produjo un desprendimiento masivo de rocas seguido de un aluvión de gran magnitud en el estero Parraguirre, afluente de uno de los principales tributarios existentes en la cuenca alta del río Maipo, llamado río Colorado. El fenómeno tuvo su origen en la cabecera del estero a unos 100 km al este de Santiago, en un sector localizado a una cota cercana a los 4500 msnm y a unos 30 km de El Alfalfal donde a la fecha se construyen diversas obras del complejo hidroeléctrico del mismo nombre. El aluvión causó la muerte de 29 personas, destruyó instalaciones y equipos del complejo, y dañó severamente la central Maitenes. En la Fig. 1 se muestra la ubicación donde se originó y desarrolló el fenómeno.

Geología, geomorfología y clima

Con motivo del aluvión se desarrollaron diversos estudios de diagnóstico y evaluación de la situación acaecida, siendo el más reciente el efectuado por Casassa y Marangunic (1993). De acuerdo con dichos estudios, el área donde se generó el deslizamiento rocoso está constituida por rocas sedimentarias, incluyendo yeso con estructura detallada desconocida. Estas rocas presentan una inclinación muy pronunciada (80°) y se encuentran muy fracturadas y desgastadas debido a agentes atmosféricos.

La geomorfología de la zona se caracteriza por un relieve montañoso con cumbres por sobre los 6000 msnm, y valles estrechos de fuertes pendientes con fondos rocosos cubiertos por material de arrastre, generalmente de gran calibre y granulometría extendida, abarcando desde finos hasta bloques de roca. Además la zona presenta un desarrollo importante de glaciares, los que se ubican de preferencia en las cabeceras de los ríos y esteros.

El clima de la zona es semi-árido, con una estación de verano marcadamente seca y precipitaciones intermitentes en invierno, las que son usualmente de tipo nival por sobre los 2000

msnm y totalizan en promedio en el año cerca de 350 mm.

Origen y características del aluvión

Se presume que el fenómeno tuvo su causa primaria en el aumento inusual del contenido de agua y presión de poros de una masa rocosa altamente meteorizada y fracturada, debido a un proceso acelerado de fusión de nieves originado por las altas temperaturas del aire que se dieron en este período. En efecto, la isoterma 0°C se situó en los días próximos al aluvión a la cota 5100 msnm lo cual contrasta marcadamente con su ubicación normal de verano que es inferior a 4200 msnm. Por otra parte, en una zona cercana al deslizamiento, a una altura de 4600 msnm, la temperatura a las 10 AM habría sido de 16°C , en tanto otro antecedente disponible señala que en días anteriores al evento, en la vecina localidad de El Yeso, la temperatura fue 5°C más alta que la media de las semanas anteriores. Hay que destacar también la excepcionalmente alta acumulación de nieve caída antes del evento durante 1987, año que aparece como el quinto más lluvioso en 138 años de estadística.

El desprendimiento ocurrió a las 10:33 AM y según Casassa y Marangunic (1993) habría comprometido un volumen cercano a 5.5 millones de m^3 que formaba parte de un afloramiento rocoso ubicado entre las cotas 4500 msnm y 4000 msnm, el cual descendió por una pendiente cercana al 85% hasta alcanzar el fondo del valle localizado a la cota 3500 msnm. El aluvión o corriente de detritos se habría formado al impactar la masa de roca y hielo desprendida el lecho del valle y escurrir hacia aguas abajo, incorporando a su paso agua de la nieve depositada en ese sector, agua proveniente del hielo de un glaciar cuyo frente pasó a llevar la corriente (al girar en unos 90° unos 2 km aguas abajo del origen), agua contenida en el suelo y subsuelo y la del propio estero Parraguirre. El flujo producido posterior al impacto de la masa de la ladera desprendida, siguió la dirección del cauce del estero Parraguirre hasta un punto ubicado aproximadamente 1,3 km aguas arriba de su desembocadura. En dicho punto el cauce cambia localmente de dirección, lo que provocó un desborde parcial del aluvión hacia el río Colorado, cuyo cauce se ubica unos 50 m más abajo que la cota del cauce del estero Parraguirre.

Según los antecedentes de que se dispone, el aluvión se habría manifestado en el curso medio del río Colorado como tres o cuatro ondas sucesivas, siendo la segunda la mayor y la más destructiva. La primera de estas ondas fue detectada en la bocatoma de la central Maitenes a las 12:14, obra que se ubicaba a 41 km del origen, en tanto la segunda llegó 23 minutos más tarde. Probablemente una de estas ondas estuvo relacionada con el desborde y el destaponamiento de una roca, de varios miles de toneladas de peso (tamaño de 10 a 20 m), que antes del aluvión bloqueaba la desembocadura del estero Parraguirre. Casassa y Marangunic reportan una cuarta onda ocurrida varias horas después durante el transcurso de la noche, lo cual correspondió a un flujo líquido de mayor altura.

En su recorrido el aluvión dejó sendas trazas en las laderas que encajonan el cauce del estero Parraguirre y el río Colorado, como se aprecia en la Foto 1. De acuerdo con ellas se estimó que las alturas que alcanzó el flujo fueron cercanas a 30 m en el tramo superior del río Colorado, en particular, en los sectores donde el cauce es más angosto. Aguas abajo de El Alfalfal las evidencias existentes indican que se produjo una atenuación significativa de las ondas; en la zona de la desembocadura en el río Maipo, los aumentos de nivel habrían estado comprendidos entre 2 y 4 m. Cerca del origen la velocidad del flujo fue estimada entre 20 y 30 m/s. Los primeros 14 km del recorrido se desarrollaron en el valle del Parraguirre, con una pendiente del 7 %, como una corriente de unos $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidades medias mayores a 15

m/s. Al incorporarse en ese tramo abundante agua y material fino, particularmente en los primeros 2 km de recorrido, el flujo se habría transformado una corriente de detritos macro viscosa. En el tramo superior del Colorado se estimaron velocidades de 8 a 10 m/s y en su curso medio, entre El Alfalfal y la desembocadura en el río Maipo, donde la pendiente media del cauce es del orden del 2%, la velocidad media habría sido aproximadamente 4 m/s.

En la confluencia del estero Parraguirre con el río Colorado, la granulometría de los depósitos presentó 5% de clastos y fragmentos de roca hasta 2m de diámetro, 50 % de grava (diámetro entre 10 y 300 mm), 30 % de arena y 15 % de limos y arcilla. En cuanto al volumen de material incorporado por el aluvión al río Maipo, se tienen dudas por cuanto el volumen de agua fue estimado por algunos investigadores en 24 millones de m³ y por otros en a lo más 7 millones de m³ (hidrograma medido en una estación fluviométrica ubicada unos 200 km aguas abajo, Maipo en Cabimbao). La primera de estas cifras habría estado asociada a un volumen de sólidos de unos 15 millones de m³ lo que conduce a una concentración en volumen media cercana a 62%. Esta estimación no parece razonable por la gran diferencia en el volumen de agua si éste se compara con el valor de 7 millones de m³ estimado del hidrograma. Por otra parte, si se acepta esta última cifra y la concentración volumétrica media de 60%, despreciándose al mismo tiempo el volumen neto sedimentado y erosionado en el valle, el cálculo demuestra que el volumen de sedimento de la corrientes de detritos habría alcanzado a unos a 4.2 millones de m³, cifra que representa un 76% del volumen de material desprendido en el origen. Esta cifra aparece como razonable si se considera el porcentaje de huecos de la masa detrítica y los grandes bloques de roca que pudieron quedar depositados a lo largo de cerca de 65 km que median entre la zona de desprendimiento y la desembocadura del río Colorado en el río Maipo. Se concluye por lo tanto, que no obstante las incertidumbres que existen en cuanto al volumen de agua escurrido, lo más probable es que la corriente de detritos tuvo una concentración de sólidos cercana al 60%, lo que demuestra que desde el punto de vista hidrodinámico, ésta presentó muy posiblemente flujo macro-viscoso sin erosión del lecho. Este tipo de antecedentes resulta relevante en la adopción de modelos para el estudio del comportamiento hidrodinámico de la corriente.

CRECIDAS ALUVIONALES DE PUNTA ARENAS, XII REGION (1990)

La ciudad de Punta Arenas, ubicada en el extremo austral de Chile, ha sido afectada desde sus inicios por las crecidas del río Las Minas. Este río nace aproximadamente a la cota 625 msnm y drena una superficie de 58.2 km². Después de recorrer una longitud de 20 km desemboca en el estrecho de Magallanes, atravesando la citada ciudad de oeste a este en sus últimos tres kilómetros de recorrido. La pendiente media de la cuenca es 14.6% y su desnivel máximo 402 m. A lo largo del río existen un conjunto de obras de defensa fluvial, puentes y pasarelas. En la parte alta y media de la cuenca se encuentra la bocatoma para el agua potable de la ciudad además de una serie de obras de contención del material de arrastre las que conformaban un conjunto de 13 diques transversales. En la Fig.2 se muestra un plano de ubicación aproximado del sector estudiado.

Los días 10 y 11 de mayo de 1990 intensas precipitaciones en la zona generaron una importante crecida del río Las Minas, la cual se caracterizó por incorporar gran cantidad de sedimentos proveniente de erosión de la cuenca y de socavaciones ocurridas en el cauce del río, situación que se complicó por el colapso de los diques. La crecida dio lugar a una inundación de barro en el sector céntrico de la ciudad de Punta Arenas que causó cuantiosos daños.

Geología, geomorfología y clima

El relieve de la península de Brunswick, en el sector donde se ubica la hoya hidrográfica del río Las Minas, se presenta bajo y compuesto en su mayor proporción por serranías suaves, entre las cuales emergen esporádicamente algunos cordones de cerros con elevaciones de hasta poco más de 600 msnm. Geológicamente la mayor parte de este territorio se encuentra cubierto por sedimentos de tipo glacial, en los que se alternan lomajes de gravas y depresiones ocupadas por lagunas y turbales.

En términos generales, las zonas medias y altas de los valles que conforman la hoya hidrográfica en estudio se encuentra frente a un proceso de evolución en su morfología de gran dinamismo. Gran cantidad de sedimentos se generan en la parte alta de la cuenca, producto de la combinación del efecto erosivo del escurrimiento y deslizamientos de cornizas, los que se desplazan bajo la forma de corrientes de arena y lodo durante las crecidas depositándose en la zona baja del cauce. Los procesos erosivos de tipo masivo se originan en las laderas adyacentes al cauce en todo el tramo medio del valle, zona donde se encuentran las gargantas más abruptas y profundas del cauce. La formación geológica donde suceden estos procesos es la denominada Loreto, la cual está constituida por bancos alternados de arenisca, arcillolita, carbonasas y limolitas algo arenosas, todos materiales deleznales y fácilmente erosionables. El mecanismo de este fenómeno se encuentra descrito en el informe elaborado por AC Ings.Consultores (1990).

Cabe señalar que las crecidas de mayor magnitud que ocurren en la cuenca son de origen netamente pluvial, estando asociadas con tormentas cuya temperatura en Punta Arenas es del orden de 4 a 5 °C en el período mayo-septiembre y de alrededor de 10 °C en el período octubre-abril, lo que determina que la cuenca pluvial aportante sea el total de su superficie. La precipitación anual media de la cuenca del río Las Minas ha sido estimada en 580 mm.

Origen y características de la crecida aluvional

El origen principal del fenómeno de mayo de 1990 se han vinculado a los problemas erosivos de la cuenca del río Las Minas, desencadenados por factores hidrometeorológicos que interactuaron con las características geológicas de la cuenca, agravados en el tramo inferior (que cruza la ciudad de Punta Arenas), por la poca capacidad hidráulica de su cauce.

En cuanto a los factores hidrometeorológicos, se sabe que previo al evento aluvional se presentó un período prolongado con precipitaciones en toda la zona, que causó en las distintas cuencas un elevado grado de saturación. Además, la tormenta causante del evento ocurrió acompañada por masas de aire con temperaturas más altas que lo normal, lo que, de acuerdo a estudios efectuados, permite afirmar que para estas condiciones climáticas toda la cuenca fue aportante de aguas lluvias.

La crecida, causante de la inundación de la ciudad de Punta Arenas, alcanzó un caudal peak de agua y lodo, del orden de 130 m³/s el día 10 de mayo a las 6:00 AM, que incluye un 10 a 20 % de sólidos. La máxima altura registrada fue de 2.30 m en la estación fluviométrica existente en el cauce aguas arriba de la ciudad. Es importante señalar que el colapso que experimentaron durante la crecida los 13 diques construidos por CONAF en la cabecera del río entre los km 7.0 a 11.88, provocaron un agravamiento de la situación al sumarse el volumen de agua y sedimentos contenidos en éstos, al volumen de agua producido normalmente en la cuenca, lo que en definitiva significó el aporte de una considerable cantidad de sedimento hacia aguas abajo, siendo necesario remover del orden de 90.000 m³ de material en el sector canalizado del

río, después de la crecida.

Muestreos efectuados en 12 puntos del sector señalado permiten caracterizar los sedimentos depositados, con diámetros D_{50} comprendidos entre 27 y 0,15 mm y desviaciones estándar de 12,35 y 0,244, lo cual demuestra que el flujo contenía principalmente sedimentos finos y medianos aunque con una dispersión granulométrica significativa.

De lo anteriormente expuesto, se establece que las causas que dieron origen a este suceso, tuvieron su origen en deslizamientos de laderas debido a precipitaciones que erosionaron la superficie de la cuenca y al aporte de gran cantidad de agua a los cauces, lo que aumentó la capacidad de arrastre del río, erosionando riberas y lecho. Adicionalmente el colapso de los diques de contención de sedimentos, incorporó más material al flujo, lo que sin duda agravó la situación en una medida no fácil de cuantificar.

El flujo detrítico originado, conforme a lo observado en cuanto a su origen, velocidad de propagación y constitución de la masa sólida, mayoritariamente conformada por sedimento fino y con menos de 50% de grava, y concentraciones del orden de 10 a 20%, corresponde principalmente a un flujo de barro diluido o crecida fluvial hiperconcentrada según el criterio de Costa (1988). Este tipo de corrientes puede ser como un flujo turbulento de agua pero con viscosidades y factores de fricción aumentados por la presencia significativa de sólidos.

ALUVIONES DE ANTOFAGASTA, II REGION (1991)

La II Región de Chile 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. En esta zona se ubica la ciudad de Antofagasta, capital regional, sobre la cual se centra el estudio del evento (Fig 3).

Durante los días 17 y 18 de Junio de 1991, la región se vio afectada por un temporal de viento y lluvia asociado a un sistema frontal que se propagó desde el sur del país, y que alcanzó gran intensidad en la zona costera, con consecuencias catastróficas para la ciudad de Antofagasta y sus alrededores. En efecto, las lluvias dieron origen a flujos torrenciales de agua y barro que se generaron en las partes altas y que convergieron hacia la ciudad por las numerosas y empinadas quebradas de los faldeos andinos occidentales y planicie litoral. El evento causó más de un centenar de víctimas fatales, damnificados y pérdidas materiales cuantiosas. La ciudad quedó varios días sin abastecimiento de agua potable y parcialmente desconectada por la destrucción de sus vías terrestres de acceso.

Geología, geomorfología y clima

La zona estudiada está constituida en gran parte por rocas de la formación La Negra. 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. El sector sur del área estudiada está constituido por rocas de la formación Caleta Coloso, integrada por conglomerados y areniscas, secuencia estratificada que sobreyace a la formación La Negra. Las rocas fundamentales, representadas por las formaciones descritas anteriormente, están cubiertas en algunos sectores, por sedimentos aluviales de relleno, constituidos por gravas, arenas y arcillas.

El relieve característico de la II Región presenta una notable variabilidad desde la costa hacia la Cordillera de los Andes. Comenzando desde la costa, se distingue primero una zona denominada Planicie Costera, faja de territorio llano y poco escarpado de un ancho medio de unos 4 km. Inmediatamente al este de la Planicie Costera se ubica la cordillera de la Costa,

cordón montañoso cuyas máximas alturas alcanzan los 2500 msnm. La ciudad de Antofagasta se desarrolla en los faldeos occidentales y planicie litoral limitada por la costa.

En la zona costera, la presencia del anticiclón del pacífico genera un clima desértico con nublados abundantes. Hacia el interior, en la zona de la depresión intermedia se desarrolla un clima de tipo desértico normal el que se caracteriza por fuertes oscilaciones térmicas diarias y falta absoluta de precipitaciones, lo que deviene en aridez casi total y fuertes vientos.

Características de los aluviones

El temporal que afectó la ciudad de Antofagasta, 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 desarrollo vertical, con lo que se incrementó su capacidad para producir precipitaciones.

La intensidad que alcanzó la lluvia en la zona costera, dió origen a torrentes de agua y barro que escurrieron por no menos de 15 quebradas de los faldeos occidentales y planicie litoral, donde se ubica la ciudad de Antofagasta. Al dejar sus cauces encajonados, y como consecuencia de su gran velocidad y alto contenido de sedimentos, estos terrenos descargaron violentamente masas de agua y material sólido a la ciudad.

Como es usual en este tipo de fenómenos, existe una gran disparidad del valor de los caudales y concentraciones de sólidos presentados en los distintos informes que se emitieron analizando el fenómeno. Los valores dados en el estudio del CRH de la U. de Chile (1993), fueron el resultado de un análisis en el cual se compatibilizaron las estimaciones hidráulicas con la información y análisis hidrológico del fenómeno. De este modo, se estimaron precipitaciones con intensidades medias máximas entre los 19 y 25 mm/hr para las cuencas pequeñas (superficies menores a 1 km²) y entre 6 y 14 mm/hr para las restantes cuencas. Además se estimaron caudales con concentraciones de sólidos que superan en la mayoría de las quebradas el 50 al 60% en volumen y un volumen de detritos descargado, en el rango de 550.000 a 750.000 m³, pudiendo llegar inclusive al millón sin considerar el aporte de la quebrada La Negra. El caudal detrítico máximo estimado corresponde al de la quebrada La Negra, de 116 m³/s y una concentración en volumen de 40%. La altura del escurrimiento varió en general entre 1.5 y 4 m, llegando a tenerse una altura de 8 a 9 m en una hondonada de la Quebrada El Toro.

Muestreos efectuados tanto en quebradas como del material aluvional depositado, permitieron establecer que el D₈₄ se extiende entre 13.2 mm como máximo y 3.76 mm como mínimo, el D₅₀ entre 2.99 y 1.03 mm y el D₁₆ entre 0.83 y 0.25 mm.

De acuerdo con todos estos antecedentes, este fenómeno tuvo un origen de tipo meteorológico, presentando variabilidades importantes en cuanto a las intensidades de precipitaciones observadas para las distintas quebradas que descargan hacia la ciudad, debido al carácter convectivo de la tormenta. Las precipitaciones caídas transportaron los materiales detríticos disponibles que constan básicamente de depósitos coluviales y eólicos. Los primeros presentan una granulometría variada que va desde partículas muy finas hasta bloques y los eólicos están constituidos principalmente por arenas con buena selección y de formas redondeadas. Acorde con los materiales detríticos disponibles, y las características hidrodinámicas del flujo, este correspondería en todas las quebradas a flujos de barro que en la mayoría de las quebradas

no causaron erosión apreciable de los lechos. En atención a ello, su modelación hidrodinámica debería considerar más probablemente al flujo como macro-viscoso.

ALUVIONES DE LA ZONA CENTRAL, REGIONES METROPOLITANA, V Y VI (1993)

El evento ocurrido comprometió una extensa región del territorio andino central de Chile, comprendido entre los 32 y 35 ° latitud sur. Los problemas de mayor gravedad se registraron en quebradas de la Región Metropolitana (Quebradas de Macul y de Ramón, Fig. 4) y de la V y VI región. En la primera fueron afectados sectores densamente poblados con resultado de pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales, en tanto en las segundas se vieron comprometidas diversas instalaciones industriales y de infraestructura vial, principalmente en la precordillera y cordillera.

Geología, geomorfología y clima

Esta zona presenta una geología de composición sumamente compleja, debido a los diferentes fenómenos que la afectaron y por su variada composición litológica. Se encuentran rocas de tipo volcánicas hasta intrusivas, pasando por las metamórficas. Sus elementos constituyentes están compuestos por andesitas, conglomerados volcánicos, tobas, rocas tobáceas, sedimentarias y calizas, jugando todas ellas un papel importante en la producción de sedimentos.

Desde el punto de vista de la geomorfología de las regiones en estudio, la cordillera y precordillera andina constituyen el factor más significativo. La evolución de la precordillera se debe principalmente a la actividad tectónica, períodos alternativos de hielo-deshielo, a la actividad volcánica y a la actividad torrencial y fluvial la que ha formado los principales ríos, quebradas y arroyos cordilleranos. Como en toda la cordillera de la zona central, el relieve es montañoso con grandes alturas, valles estrechos de fuertes pendientes con fondos rocosos, cubiertos por material de arrastre usualmente de gran tamaño y granulometría extendida.

Del mismo modo que la geomorfología de los Andes centrales es similar en una extensión que abarca desde la V a la VI Región, el clima de esta zona es también similar, caracterizándose por ser semi-árido, con una estación de verano marcadamente seca y precipitaciones intermitentes en invierno, las que son usualmente de tipo nival por sobre los 2000 msnm y totalizan en promedio en el año cerca de 350 mm, con un aumento gradual de norte a sur.

Características de los aluviones

El fenómeno climático que afectó a las regiones en estudio, se caracterizó por intensas precipitaciones líquidas ocurridas los días 2 y 3 de Mayo de 1993 que cayeron en la zona central de Chile conjuntamente con temperaturas por sobre lo normal. La isoterma 0 °C se ubicó por encima de los 3900 msnm durante dicho frente de mal tiempo, por lo que se incrementó la superficie de la cuenca que recibió precipitaciones líquidas, incorporando además los sectores de mayor pendiente de las cuencas. Desde los primeros informes emitidos describiendo el origen de los aluviones (Edwards, 1993; Naranjo y Varela, 1993) hay unanimidad al afirmar que no hubo deslizamientos de grandes masas que hayan bloqueado el cauce y gatillado el proceso, sino que la gran cantidad de agua caída y el aporte superficial de las zonas más altas de los cerros, se tradujo en la disminución de la infiltración y saturación de los suelos lo que facilitó la erosión local, siendo éste el material transportado por el flujo. La cantidad de material rápidamente fue creciendo, incorporando bloques disponibles de coluvios laterales y antiguos caídas de rocas, conformando una masa altamente viscosa de bloques y barro que escurrió sobre las laderas y

tributarios de alta pendiente, incorporando cada vez más material sólido al flujo, hasta llegar al cauce principal con un aporte significativo de sólidos. Esta situación originó violentas crecidas de barro y detritos que afectaron la zona oriente de la ciudad de Santiago y las regiones V y VI en especial.

En la quebrada de Macul en Santiago, Naranjo y Varela (1993) indican que en el sector del Zanjón de la Aguada, el aluvión se presentó como dos ondas separadas por un intervalo de 10 minutos. El frente de la primera onda tenía una altura de 1-1,2 m, una velocidad de alrededor 4 m/s y era una masa viscosa con rocas de hasta 1 m de diámetro, troncos y barro. La segunda ola mucho más significativa, tenía bien definida la forma característica de flujo de detritos (ver, por ejemplo, Takahashi, 1991, Fig. 1.4) y al entrar a la zona urbana el frente tenía una altura superior a los 3 m en su eje central y llevaba una velocidad superior a los 8,5 m/s. Alrededor de media hora después del primer frente, el flujo había evolucionado y tenía un aspecto similar al de grandes crecidas de años anteriores, pero con cauces de agua barrosa.

Las estimaciones de las características del aluvión varían dependiendo de los distintos estudios efectuados. Es así como en su estudio preliminar Edwards (1993) estima que en la quebrada de Macul se tuvo un caudal líquido máximo, de alrededor de 60 m³/s. A partir de la cantidad de material depositado, el gasto sólido estimado es de 83 ton/s, significando un caudal máximo de la mezcla de 90 m³/s y una concentración volumétrica de 33%. Por su parte, el informe del Dictuc (1993) estima una concentración de 40% y caudales líquidos y sólidos de 72 y 48 m³/s, respectivamente. Finalmente, el estudio de AC Ings.Consultores (1993) estimó un volumen de material sólido en depósito de 840.000 m³, caudal líquido máximo de 50 m³/s, caudal total de 80 m³/s, con concentraciones de alrededor de un 38 %.

El escurrimiento de la quebrada de Ramón no resultó tan catastrófico como el de Macul, debido a que los depósitos de sedimentos de tamaños mayores fueron más frecuentes antes de llegar a la zona urbana, aunque igualmente el desborde de barro causó aquí cuantiosos daños. Observadores indicaron que la ola tenía más 6 m de alto al llegar a la cota 800 msnm, unos 200 m antes de alcanzar la zona urbana (Naranjo y Varela, 1993).

El escurrimiento por los cauces de las quebradas de Macul y de Ramón tuvo un poder altamente erosivo. Edwards (1993) reporta que entre las cotas 725 y 1150 msnm de la quebrada de Macul, el cauce fue profundamente socavado y ensanchado, significando un volumen de material removido en ese tramo importante. Como se indicó, la diferencia de pendientes en las partes altas medias de las quebradas de Macul y Ramón, significó que el tamaño del material incorporado al flujo fue distinto. Es así como en la primera de ellas el arrastre presentó sedimentos de distintos tamaños, comprendiendo rocas de diámetros del orden de 1 m o más, hasta arenas y finos. En la segunda el escurrimiento arrastró básicamente material fino, socavando en gran forma el cauce a la entrada de la zona más plana, como puede verse en la Foto 2. Muestreos efectuados del material aluvional fino depositado en tres sectores de la quebrada de Macul (18 de mayo de 1993), dieron el siguiente rango para los diámetros que se indican: $D_{90}=21-5$ mm; $D_{84}=12-2$ mm; $D_{50}=0.8-0.2$ mm; $D_{16}=0.018-0.012$ mm. Muestreos realizados de material aluvional depositado en las márgenes de la quebrada de Ramón, dieron los siguientes rangos para los mismos parámetros: $D_{90}=8-0.9$ mm; $D_{84}=5.2-1.16$ mm; $D_{50}=1.2-0.15$ mm; $D_{16}=0.21-0.12$ mm.

El frente de mal tiempo que afectó la zona central, produjo además un importante flujo de detritos en la cuenca alta del río Coya y de su principal afluente, el río Teniente, ubicados en la cuenca alta del río Cachapoal en la VI región. Del estudio de AC Ings.Consultores, se

estimó un caudal líquido de 90 m³/s, caudal sólido 16 m³/s y concentraciones que van del 14 al 17 %, resultando caudales totales de entre 95 y 115 m³/s. Además se dan los valores estimados de los volúmenes depositados aguas arriba y abajo de la confluencia de los ríos Coya y Teniente respectivamente: 216.725 m³, 22.631 m³ y 206.045 m³. El caudal líquido y concentración de sólidos en el río Coya fueron estimados en 40 y 30-35% respectivamente. Los valores correspondientes al río Teniente son 47 m³/s y 4-5%.

De lo expuesto se concluye que este evento aluvional dio origen a diversas corrientes de detritos con características macro viscosas, que en algunas cauces fueron acompañadas de una socavación importante del lecho.

DISCUSION

Los antecedentes presentados demuestran que en un lapso relativamente corto se han producido en Chile importantes eventos aluvionales cuya causa primera han sido fenómenos hidrometeorológicos inusuales. En tres de los cuatro casos presentados, los aluviones fueron desencadenados por lluvias invernales intensas poco habituales, con temperaturas medias más altas que las normales. Con ello las áreas aportantes fueron las totales, en circunstancias que en invierno es frecuente que las cuencas tengan parte de su área cubierta de nieve. En el otro caso (aluvión del río Colorado, 1987), el origen del aluvión se vincula a una supuesta acelerada fusión de hielo y nieve en la alta cordillera, provocada por una inusualmente alta temperatura de Primavera. También ha sido característica la gran variabilidad espacial de las precipitaciones caídas.

Desde el punto de vista de las características y comportamiento hidrodinámico de las corrientes, se ha constatado que en algunos casos el fenómeno se manifestó claramente como corrientes de detritos (concentración de sólidos que superan el 40% en volumen y con composiciones granulométricas que contienen más de 50% de material grueso de gravas, bolones y fragmentos de rocas) como es el caso del aluvión del Colorado y de los aluviones de la zona central de 1993, en tanto en otros como coladas de barro (concentración de sólidos mayores al 40% pero con sólidos dominados con fracciones más finas, como es el caso de los aluviones de Antofagasta). Así también aparece documentada una crecida hiperconcentrada con concentraciones de sólidos estimadas entre el 10 y 20%, como la ocurrida en 1990 en Punta Arenas.

Otro aspecto que cabe resaltar, es que sólo en algunos eventos aparece la erosión del cauce como un factor significativo en el aporte de sólidos. Tal es el caso de los eventos sucedidos en algunas quebradas de la zona central durante mayo de 1993. Hay que destacar también la características impermanente de los eventos aluvionales. Aunque es bien conocido que estos fenómenos se presentan como ondas con formas bien caracterizadas, a menudo ni siquiera se menciona este hecho en algunos informes. La razón quizás se debe a que, dada la complejidad de los flujos de detritos, así como el estado del arte en lo referente a su cuantificación, incorporar la variabilidad temporal en el problema no tenga todavía mayor sentido, dadas las limitaciones actuales para estimar las características del fenómeno en condiciones permanentes. Sin embargo, son interesantes las descripciones hechas por Cassaca y Marangunic (1993) y por Naranjo y Varela (1993) de las ondas observadas en los aluviones del Río Colorado y de la quebrada de Macul, respectivamente.

También debe destacarse la gran variabilidad del rango de caudales y concentraciones estimados en los distintos informes para un mismo evento, debido en gran medida a suposiciones

e informaciones empleada en los cálculos. Resulta aconsejable contrastar o cerrar dichas estimaciones con cálculos obtenidos mediante otro análisis o métodos, como se hizo en el informe del CRH, para los eventos de Antofagasta de 1991, en el que se compatibilizan las estimaciones y mediciones de gastos sólidos, concentraciones, cálculos hidráulicos y cálculos hidrológicos.

Desde el punto de vista de la modelación hidrodinámica de las corrientes, los antecedentes presentados demuestran que deben tenerse cuidadosamente en cuenta la diferenciación en cuanto a crecidas fluviales, corrientes de barro y corrientes de detritos puesto que sus características reológicas y por lo tanto pérdida de carga y comportamiento mecánico, pueden llegar a ser muy distintas (Costa, 1988). Por otro lado, su efecto sobre el cauce puede traducirse en aporte de sólidos adicionales a la corriente lo cual también determinará diferentes formas e hipótesis de modelación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y al FONDECYT que han concurrido al financiamiento de la presente investigación a través del Proyecto N°1940545 del año 1994.

BIBLIOGRAFIA

- Ayala R., L, Peña T., H, 1992, "Desastres Asociados a Fenómenos Hidrológicos Extremos, Parte I y Parte II", En: Rev. de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol.6, N°3, Vol.7, N°1.
- AC Ingenieros Consultores, 1990, "Diagnóstico del Comportamiento del Río De Las Minas y Estero Llau- Llau en Crecidas, Provincia de Magallanes XII Región". Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- AC Ingenieros Consultores, 1993, "Estudio Técnico del Aspecto Fluvial de los Ríos Coya y Teniente, y su Incidencia en el Complejo La Junta". División El Teniente de Codelco-Chile.
- AC Ingenieros Consultores, 1993, "Proyecto para el Control de Aluviones en la Quebrada de Macul". Departamento de Obras Fluviales, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Casassa, G, Marangunic, C, 1993, "The 1987 Río Colorado Rockslide and Debris Flow, Central Andes, Chile". Association of Engineering Geologists, Vol. XXX, N°3, pp. 321-330
- Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, 1993, "Crecidas Súbitas y Corrientes de Detritos Ocurridas el 18 de Junio de 1991 en Antofagasta" (Publicación CRH 93-81-1), Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Costa, J.E., 1988, "Rheologic, Geomorphic and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hiperconcentrated Flows and Debris Flows", Chapt 7, Flood Geomorphology, Editors: Baker, Kochel y Patton, John Wiley & Sons, Inc., N.Y.
- DICTUC, 1993, "Análisis y Diagnóstico de los Eventos del 3 de Mayo de 1993, Regiones V, VI y Metropolitana". Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Naranjo S., J, Varela B., J, 1993, "Flujo de Detritos y Barro que Afectaron al Sector Oriente de Santiago, el 3 de Mayo de 1993", Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- Takahashi, T., 1991, "Debris Flow", IAHR, Monograph Series, AA. Balkema/Rotterdam/Brookfield.

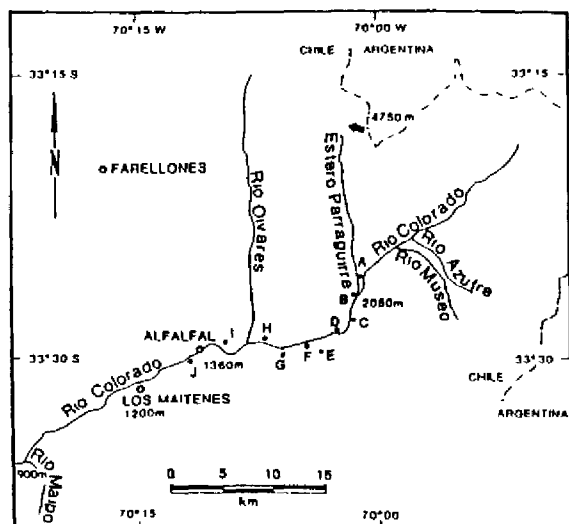


Fig. 1.- ZONA DE ORIGEN DEL ALUVION DEL RIO COLORADO (Casassa y Marungunic, 1993)

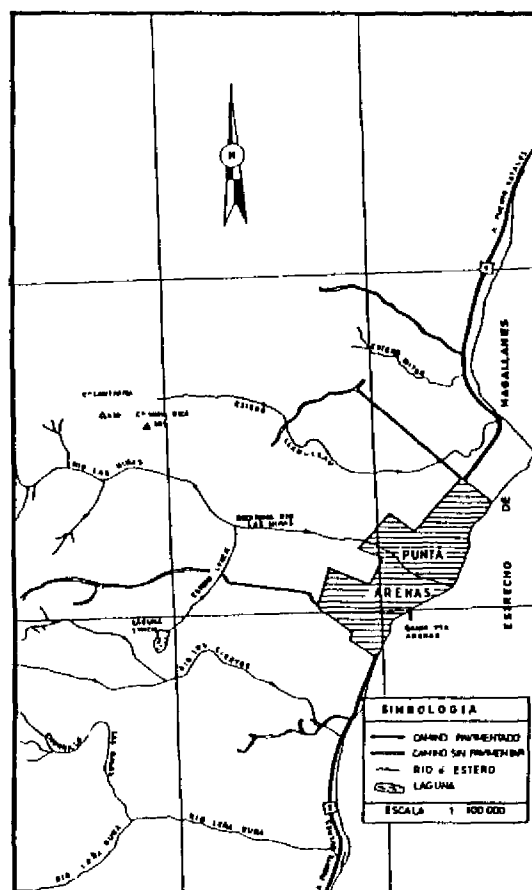
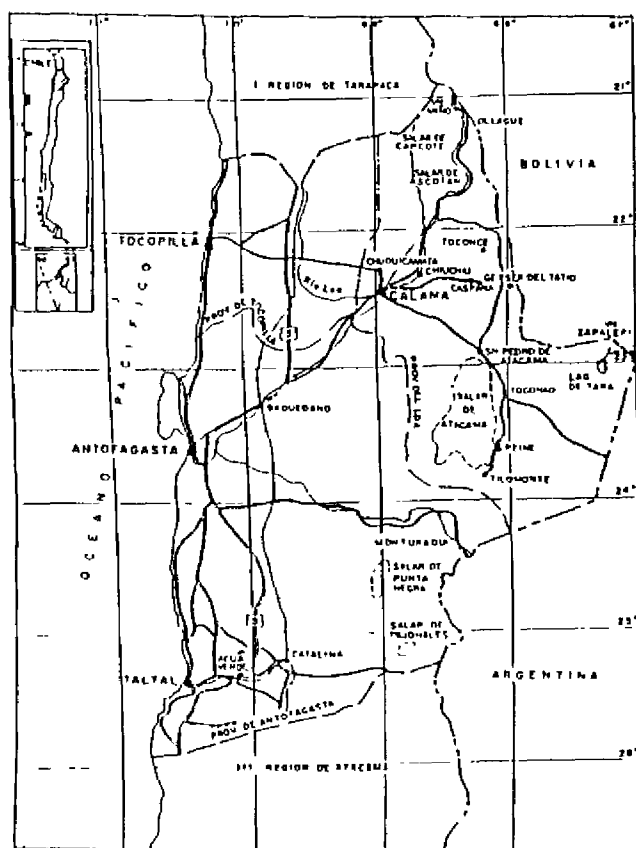


Fig. 2.- CRECIDAS ALUVIONALES DE PUNTA ARENAS: PLANO DE UBICACION DEL SECTOR ESTUDIADO (AC Ingenieros Consultores, 1990)



**Fig. 3.- ALUVIONES DE ANTOFAGASTA:
PLANO DE UBICACION DE LA ZONA
EN ESTUDIO (CRH, 1993)**

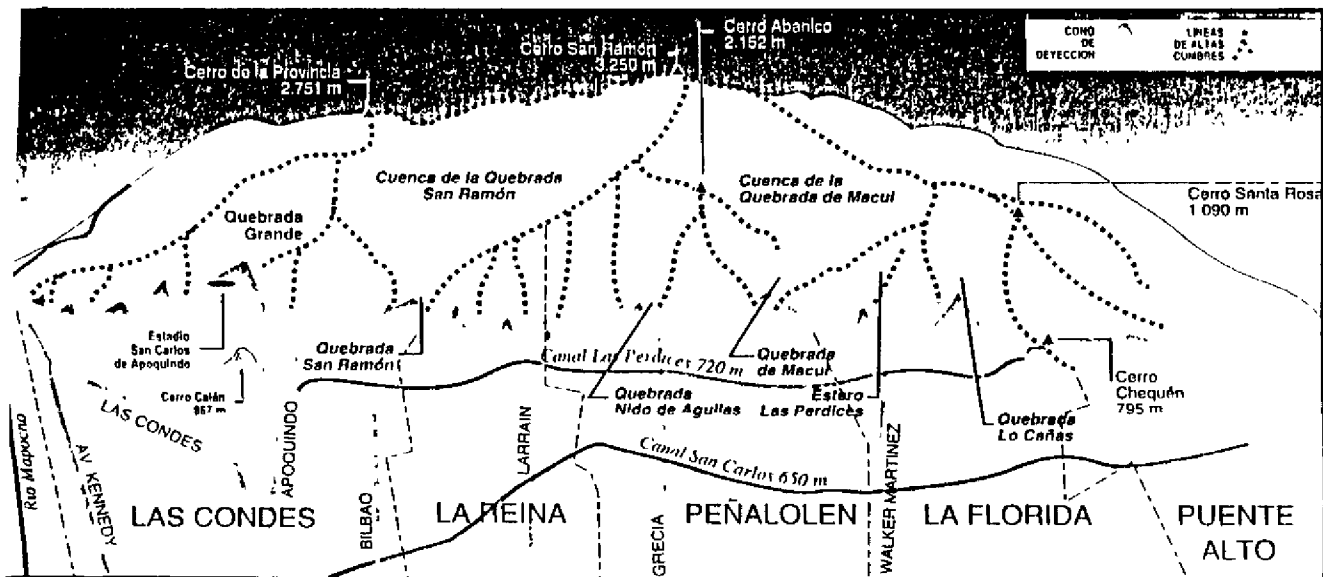


Fig. 4.- ZONAS DE LA REGION METROPOLITANA COMPROMETIDAS POR EL ALUVION DE MAYO DE 1993 (Diagrama Diario El Mercurio)



Foto 1.- TRAZAS INDICANDO LA ALTURA MAXIMA DEL FLUJO EN EL RIO COLORADO



Foto 2.- QUEBRADA DE RAMON. EROSION DEL CAUCE DEBIDO AL ALUVION