



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**HIDROLOGÍA DE DESASTRES EN CHILE.
CRECIDAS CATASTRÓFICAS RECIENTES DE
ORIGEN NO METEOROLÓGICO**

REALIZADO POR:

**HUMBERTO PEÑA T.
WULF KLOHN.**

**DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación**

HIDROLOGIA DE DESASTRES EN CHILE. CRECIDAS
CATASTROFICAS RECIENTES DE ORIGEN NO METEOROLOGICO

Humberto Peña T. (1)
Wulf Klohn (2)

RESUMEN

En el trabajo se presentan los resultados de diversas investigaciones tendientes a determinar el origen, magnitud y propagación de 8 crecidas de origen no directamente meteorológico observadas en Chile en las últimas 4 décadas. De acuerdo a su origen las crecidas se han clasificado en:

- i) Crecidas generadas por el vaciamiento de represas glaciares.
- ii) Crecidas generadas por actividad volcánica,
- iii) Crecidas generadas por represamientos de tierra, como resultado de deslizamiento asociado a actividad sísmica y
- iv) Crecidas generadas por el deslizamiento de una ladera seguida de un flujo de detritos.

En el trabajo se destaca la importancia de mejorar las metodologías para evaluar estos tipos de riesgos.

DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación

- (1) Departamento de Hidrología. Dirección General de Aguas. Chile
- (2) Departamento de Hidrología y Recursos Hídricos. Organización Meteorológica Mundial.

1. INTRODUCCION

El territorio de Chile continental es una estrecha faja de tierra, de sólo unos 190 Km de ancho medio, que se extiende entre la Cordillera de los Andes y el Océano Pacífico por aproximadamente 4.000 Km, desde los 17° 30' a los 56° 00' Lat. S. (Fig. 1). Debido a su gran extensión latitudinal registra una amplia variedad de climas, que va desde los climas áridos y semi-áridos de la zona norte, al clima mediterráneo de la región central y al clima lluvioso prevaleciente en el sur del país. Este territorio presenta diversas características que favorecen la ocurrencia de crecidas de origen no directamente meteorológico, tales como las provocadas por el vaciamiento de lagos formados por glaciares, las asociadas a la actividad volcánica y sísmica, y las generadas en flujos de detritos o barro. En general estos eventos se presentan en zonas de baja densidad de población y poco desarrollo, sin embargo en el pasado reciente ellos han significado pérdidas de vidas y daños materiales, de modo que los hidrólogos y la opinión pública paulatinamente han ido tomando conciencia de la importancia que tienen para los futuros programas de aprovechamiento de los recursos hídricos y de la necesidad de proceder a su estudio sistemático.

Las principales características geográficas del país, que influyen en este comportamiento son:

- La extensa superficie cubierta de glaciares existente en el país, con un área total del orden de los 20.000 Km². Estos glaciares se encuentran en la Cordillera de Los Andes, a lo largo de todo el territorio, en condiciones climáticas extraordinariamente variadas. En las zonas áridas, los glaciares son pequeños, fríos, de escasa actividad y se encuentran a una gran elevación. En cambio, en las más húmedas existen grandes campos de hielo, con gran actividad y frentes que alcanzan al océano. Entre ambos casos extremos hay una amplia gama de situaciones intermedias.
- El relieve montañoso, que representa un 80% del territorio con más de 300 cumbres sobre 5000 msnm.
- El intenso desarrollo de la actividad volcánica y sísmica, debido a la posición geográfica de Chile, localizado sobre un margen activo de placas convergentes en el Pacífico sur-oriental. De acuerdo a lo anterior, las rocas ígneas de edad cenozoica y los centros volcánicos actuales cubren cerca del 60% del territorio, y los depósitos laháricos constituyen parte muy importante del relleno de los valles de la Zona Central del país, (Marangunic et al, 1979). Además existe un total de 48 volcanes activos, lo que equivale a algo menos del 10% de los volcanes activos reconocidos a nivel mundial. De dicho número, 24 se ubican entre los 33 y 41° Lat. S., zona que corresponde a la más poblada del país (Instituto Geográfico Militar, 1983). La actividad sísmica por su parte se refleja en la ocurrencia en una misma localidad de un gran terremoto (magnitud Richter igual o mayor que 8) una vez cada 80-100 años.

El presente trabajo tiene por objetivos resumir los resultados de diversas investigaciones tendientes a determinar la magnitud, origen y propagación de las crecidas de origen no-meteorológico observadas en Chile en las últimas 4 décadas y destacar la necesidad de mejorar las metodologías para evaluar este tipo de riesgos. Cabe señalar que los problemas que se presentan son comunes a la mayor parte de los países andinos, y posiblemente a otras regiones del mundo.



FIG. 1 PLANO DE UBICACION

2. ANTECEDENTES DISPONIBLES

En general los antecedentes disponibles en el país acerca de este tipo de fenómeno son fragmentarios, de un nivel técnico variable y se encuentran dispersos en informes inéditos en diferentes empresas y organismos, siendo por ello de difícil acceso. Los estudios formales son escasos y se refieren solamente a los eventos más recientes.

Cabe señalar que en varias de las crecidas que se presentan, el análisis de los registros regulares de la red hidrométrica nacional permitió disponer de antecedentes cuantitativos muy valiosos, que no habían sido utilizados en los estudios originales, citados en las referencias.

En el trabajo se entrega información de 8 crecidas de origen no-meteorológico. La ubicación de los lugares afectados se entrega en la Fig. N° 1. Los datos generales de las crecidas seleccionadas se presentan en el Cuadro N° 1 y sus antecedentes hidrológicos principales en el Cuadro N° 2.

En el Cuadro N° 1 se han incluido, como una forma de indicar la importancia relativa de la crecida, algunos antecedentes acerca de los daños producidos y la longitud del trayecto en el cual su caudal supera a la crecida meteorológica de período de retorno 100 años (Q100). En el Cuadro N° 2, junto a información relativa al volumen, magnitud y duración de la crecida, se hace una comparación con el valor Q100 correspondiente al lugar de inicio de la crecida. Como se puede apreciar, en todas ellas los caudales máximos en algún tramo del cauce superan en varias veces las crecidas meteorológicas de período de retorno de 100 años, aunque pueden ser muy diferentes entre sí en magnitud absoluta.

En el presente trabajo se han agrupado las crecidas en: i) crecidas generadas por vaciamiento de represas glaciares, ii) crecidas generadas por actividad volcánica, iii) crecidas generadas por represamientos de tierra, como resultado de deslizamiento asociados a actividad sísmica y iv) crecidas generadas por el deslizamiento de una ladera seguida de un flujo de detritos. A continuación se resumen las investigaciones efectuadas en cada uno de estos grupos y al final se hace una caracterización conjunta de los antecedentes entregados.

3. CRECIDAS GENERADAS POR VACIAMIENTO DE REPRESAS GLACIARES.

En el trabajo se incluyen crecidas producidas por el vaciamiento violento e imprevisto de una masa de agua represada por hielo. No se presentan algunos casos de glaciares que en forma periódica producen este tipo de fenómenos.

Estas crecidas se han observado en Chile en situaciones muy distintas, y para su análisis se clasificarán según la forma en que se genera la acumulación de agua líquida y de acuerdo al proceso de vaciamiento.

De acuerdo al proceso de acumulación de agua líquida se distinguen los siguientes casos:

- a) Formación de un lago por avance del frente de un glaciar el cual intercepta un cauce lateral. Esta situación, que es relativamente frecuente en otras regiones del mundo se ha observado solamente en uno de los casos presentados, el correspondiente a la crecida del río Olivares (Cuadro N° 1, caso 2) del 26/2/1954. El río Olivares se ubica en la Cordillera de los Andes, en la zona central del país y constituye el drenaje natural de un conjunto de 4 grandes

C U A D R O N° 1 ANTECEDENTES GENERALES DE LAS CRECIDAS DE ORIGEN NO-METEOROLOGICO QUE SE PRESENTAN

Caso	Rfo	Fecha	Lugar de Inicio Lat Long	Elevac. (msnm)	Clasificación	Distancia (Q>Q100)(*) (Km)	Lugar de término (**)	Daños
1	Manflas	14/5/85	28° 33' 69° 43'	5.200	Vaciamiento de lago subglacial por falla estructural de una pared.	105	Embalse	Pequeños (1)
2	Olivares	26/2/54	33° 10' 70° 07'	2.800	Vaciamiento de lago formado, por avance de glaciar.	50	Cauce principal	Pequeños (2)
3	Colorado	29/11/87	33° 19' 70° 02'	2.950	Deslizamiento de ladera seguida de flujo de detritos.	59	Cauce principal	Importantes (3)
4	Cachapoal	31/1/81 a 17/2/81 (4)	34° 22' 70° 07'	2.270	Vaciamiento de lagunas represadas por glaciar.	22	Cauce principal.	Pequeños (2)
5	Volcán Villarica (5)	29/12/71	39° 25' 71° 57'	2.800	Lahares	15	Lagos	Importantes (6)
6	San Pedro	26/7/60	39° 45' 72° 30'	120	Vaciamiento de lago formado por deslizamiento de tierra.	90	Océano	Pequeños (7)
7	Huemules	12/8/71; 1/73	43° 51' 73° 06'	250 (8)	Lahares	35	Océano	Importantes (9)
8	Paine	1/82; 12/82; 3/83	50° 50' 73° 08'	190	Vaciamiento de lago represado por glaciar.	32	Lago	Pequeños

- (*) Longitud del tramo, en el cual se cumple que el caudal de la crecida no meteorológica es mayor que el correspondiente a la crecida meteorológica de período de retorno igual a 100 años.
- (**) Lugar donde el caudal de la crecida no meteorológica deja de superar a la crecida meteorológica de período de retorno igual a 100 años.
- (1) Potencialmente muy elevados, si el embalse hubiera estado en su capacidad máxima.
- (2) Interrupción de operación de central hidroeléctrica.
- (3) 37 muertos. Destrucción de Central hidroeléctrica y paralización de la construcción de otra.
- (4) Son 8 crecidas en un lapso de 19 días.
- (5) Corresponde al conjunto de 4 esteros, de las laderas del Volcán Villarica.
- (6) 15 muertos. Destrucción de viviendas y de varios puentes.
- (7) Daños pequeños debido a medidas de prevención. Inundación parcial de ciudad de 50.000 habitantes.
- (8) Frente del glaciar.
- (9) Arrasado valle escasamente poblado. Varios muertos.

CUADRO N° 2. ANTECEDENTES HIDROLOGICOS DE LAS CRECIDAS DE ORIGEN NO-METEOROLOGICO QUE SE PRESENTAN.

Caso	Río	V (Hm ³)	Q máx (m ³ /s)	T	Q100 (m ³ /s)	Qmáx/Q100
1	Manflas	5,0	11.000	15 min (1)	< 1	≥10
2	Olivares	0,4	400	30 min (1)	100	4,0
3	Colorado	7,0	> 10.000	10 min	20	≥10
4	Cachapoal	1,5-2,0	150	10 horas	60	2,5
5	Volcán Villarrica	15 (2)	3.500 (1)(2)	4 horas (2)	150	≥10
6	San Pedro	2.000	7.450	10 días	2.000	3,7
7	Huemules	-	> 10.000	-	100	≥10
8	Paine	250	350	20 días	100	3,5

V : Volumen estimado en el lugar de término de la crecida (ver Cuadro N° 1)

Qmáx : Caudal máximo estimado en el lugar de inicio de la crecida

T : Tiempo base del hidrograma, en el lugar de inicio de la crecida.

Q100 : Caudal correspondiente a la crecida meteorológica de período de retorno igual a 100 años, en el lugar de inicio de la crecida.

(1) : Asumiendo un hidrograma triangular.

(2) : Valores correspondientes al conjunto de 4 esteros del Volcán Villarrica.

glaciares, con un área total de hielo de 75 Km². La crecida se produjo por el vaciamiento de una pequeña laguna de aproximadamente 0.4 Hm³ formada por el avance de uno de los glaciares, 5 años antes de esta fecha, el cual bloqueó el drenaje de los otros tres. (Chilectra, 1954; Lliboutry, 1956).

- b) Formación de una zona de acumulación de agua debido a la obstrucción del sistema normal de drenaje a través del hielo. Este es el caso de las crecidas de los ríos Paine, en el extremo sur del país, debido al glaciar Dickson (Cuadro N° 1. Caso 8) y Cachapoal, en zona central, debida al glaciar homónimo (Cuadro N° 1. Caso 4).

De acuerdo a los estudios realizados (Peña y Escobar, 1983), en el primero se produjo la obstrucción del flujo que circulaba hacia un glaciar colindante, en un sector donde convergen 2 lenguas glaciares vecinas. De este modo se formó un extenso lago marginal de 250 Hm³, el que adquirió suficiente elevación para permitir la inversión del flujo (Fig. 2).

Interesa señalar que ese sector del Hielo Patagónico Sur ha experimentado retrocesos importantes, el que alcanzó entre 1978 y 1983 a 180 m/año, afectando el equilibrio general del sistema.

El fenómeno observado en el Glaciar Dickson sin lugar a dudas no es una excepción en la Región Patagónica, ya que en ella se presentan condiciones que favorecen estas grandes acumulaciones de agua líquida, lo cual se refleja en la existencia de un gran número de lagos marginales (Peña y Escobar, 1987). La escasa población de la zona y el efecto regulador de los lagos terminales seguramente hace que muchos de estos eventos pasen desapercibidos.

En el caso del río Cachapoal, se produjo el avance rápido del hielo recubierto de detritos que constituía la zona del frente del glaciar Cachapoal, a través del cual escurrían en forma subglacial esteros laterales (Rolando, 1981). Esto posiblemente bloqueó el escurrimiento original, presentándose varios puntos de acumulación en las márgenes del hielo, lo cual generó en un lapso de 19 días, una secuencia de crecidas de un volumen característico de 1.5 a 2.0 Hm³.

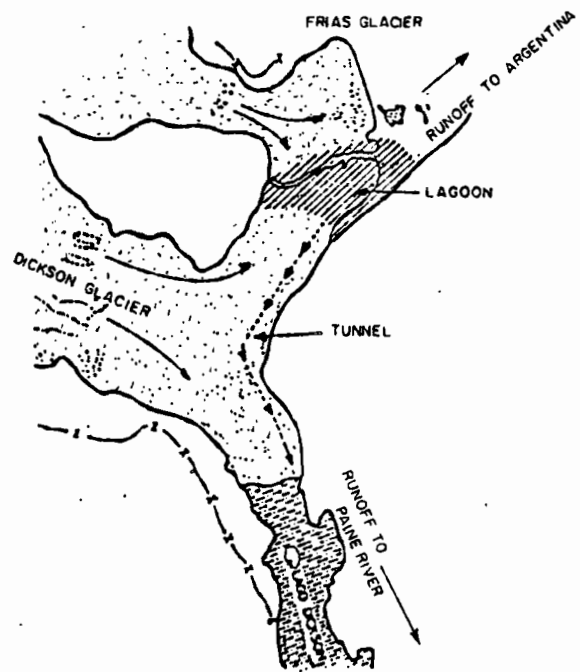


Fig. 2 Generación de las Crecidas del río Paine. Se indica formación de un lago en confluencia de 2 lenguas glaciares.

c) Formación de un lago subglacial

Se estima que la crecida del río Manflas, en el norte del país, (Cuadro N° 1, Caso 1), provocada por el glaciar río Seco de los Tronquitos (5.200 msnm) corresponde a esta categoría (Peña y Escobar, 1987). La extrema aridez de la zona y su gran elevación solo permiten la existencia de glaciares en lugares donde las condiciones topográficas favorecen la acumulación de la nieve arrastrada por el viento. Estos glaciares son pequeños, muy fríos, de escasa actividad, y se estima que el movimiento de la masa de hielo es extraordinariamente lento. En las condiciones descritas es sorprendente el almacenamiento de un volumen de agua líquida como el observado (5 Hm³). Las investigaciones desarrolladas en el terreno llevaron a concluir que se había producido un lago subglacial, de modo que el agua líquida se mantenía aislado del medio exterior. La energía para fundir el hielo y formar la caverna subglacial debió ser proporcionada por el agua de los deshielos, la cual al escurrir por las rocas aumentó su temperatura. En la fig. 3 se muestra un esquema del posible desarrollo del fenómeno.

En relación al proceso de vaciamiento se han distinguido 2 tipos:

- a) Por un vaciamiento paulatino debido al ensanche de un conducto inicial a causa de la transferencia de calor desde el líquido que escurre. La física del proceso ha sido estudiada por Nye (1976) quien dedujo las ecuaciones de conservación de masa y energía, de fluencia plástica del hielo, de hidráulica del conducto y de transferencia de calor que lo rigen. Las crecidas provocadas por los glaciares Juncal, Cachapoal y Dickson (Cuadro N° 1, Casos 2, 4 y 8) se estima que corresponden a este tipo. Cabe señalar que de las 8 crecidas consideradas, estas 3 son las de menor caudal máximo. En el caso del glaciar Dickson, que es el que se encuentra mejor documentado, las ecuaciones de Nye, aplicadas en forma simplificada han permitido reproducir la forma de las crecidas y en especial la evidente desproporción entre el volumen (250 Hm³) y el caudal máximo observado, el que solo alcanzó a 350 m³/s (Fig. 5) (Peña, Escobar, 1983).
El único caso que dispone de suficientes antecedentes (glaciar Dickson), el vaciamiento se inició cuando el nivel del agua alcanzó aproximadamente los 9/10 del espesor de hielo, valor similar al registrado en otros casos investigados en diferentes países (Young, 1985).
- b) Por falla estructural de una de las paredes de hielo. Se estima que la crecida del río Manflas, glaciar del río Seco de los Tronquitos (caso 1) corresponde a esta causa (Fig. 3), (Peña y Escobar, 1987). Este tipo de fenómeno ha sido documentado en el caso de la ruptura del lago intraglacial del glaciar Tete-Rousse el 12 de Julio de 1892, en los Alpes Franceses (en Lliboutry, 1964).

La crecida del río Manflas fue extraordinariamente violenta, con caudales al pie del glaciar de 11.000 m³/s. En los primeros 15 Km. se amortiguó rápidamente, en especial en un tramo en el cual la pendiente del cauce disminuye al 3%, alcanzando el caudal un 30% del gasto inicial (Fig. 4). Hacia aguas abajo la disminución del caudal es más lenta, llegando después de 70 Km. a ser un 10% del valor inicial. La velocidad estimada en el primer tramo es algo superior a 10 m/s y disminuye hacia aguas abajo hasta valores del orden de 5 m/s.

Finalmente, es interesante destacar que en Chile no se han presentado casos de vaciamiento de lagunas morrénicas generadas por el retroceso reciente de los glaciares, como ha sucedido en diversas ocasiones en otros países andinos (Lliboutry et al, 1977).

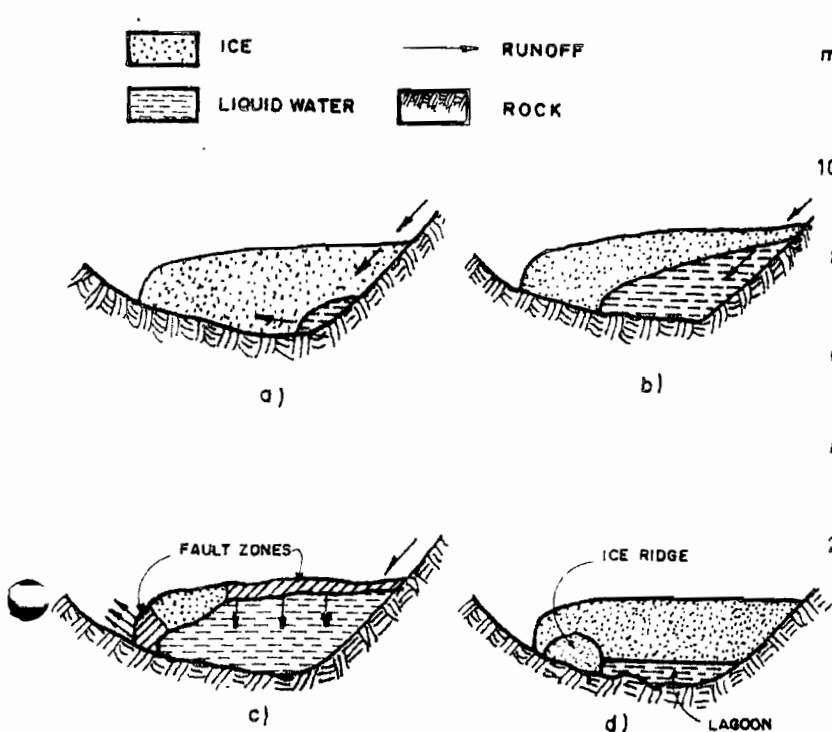


FIG. 3 Generación del R. Manflas. a) y b) el agua de deshielo, de mayor temperatura, comienza a formar un lago subglacial. c) Se produce la falla de una pared y el hundimiento de una caverna. d) Situación actual.

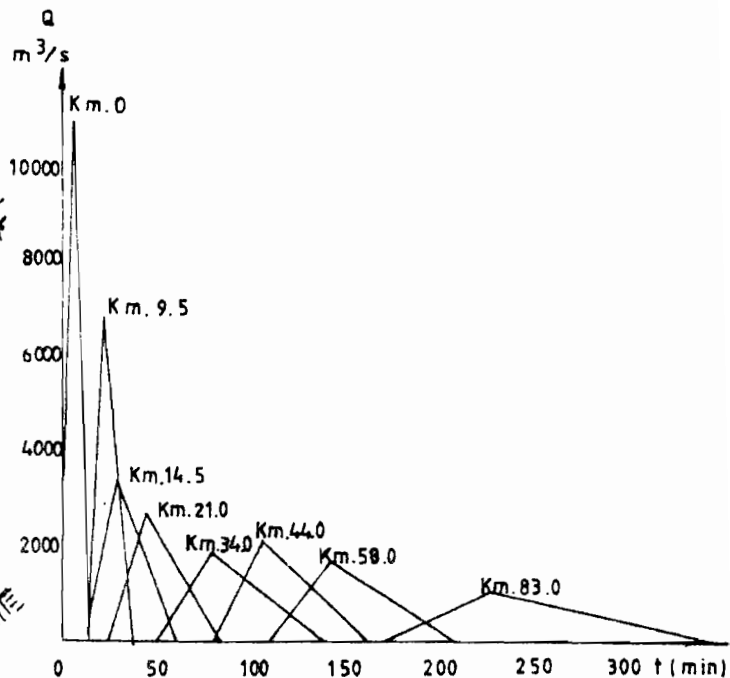


FIG. 4 Propagación de la crecida del R. Manflas, asumiendo hidrogramas triangulares. Se destaca la rápida amortiguación del caudal máximo en los primeros 15 Kms.

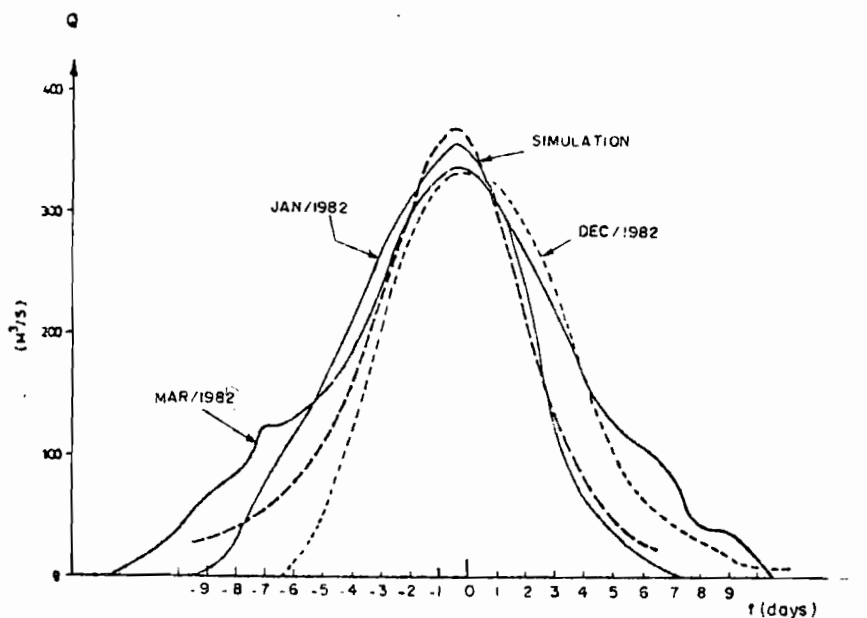


FIG. 5 Hidrogramas de crecida del río Paine. Se puede apreciar la semejanza de las 3 crecidas registradas y el ajuste obtenido mediante la simulación matemática del vaciamiento de la represa de hielo.

4. CRECIDAS GENERADAS POR ACTIVIDAD VOLCANICA

No obstante que en Chile en los últimos 40 años alrededor de 15 volcanes han entrado en erupción, solo se tiene antecedentes de 3 de ellos que han producido importantes lahares, ellos son los volcanes Villarrica (González-Ferrán, 1972; Marangunic, 1974), Hudson (Fuenzalida, 1974) y Calbuco (Klohn, 1963). En todos estos casos la generación de lahares se asoció a la presencia de glaciares y de nieve. En el presente informe se han incluido solamente los lahares del Volcán Villarrica y Hudson, que son los que produjeron daños de mayor consideración.

El Volcán Villarrica tiene una actividad volcánica muy intensa, habiendo presentado en ese lapso 4 erupciones (1948, 1963/64, 1971, 1984), 3 de las cuales (1948, 1963/64 y 1971) asociadas a lahares que causaron pérdidas de vidas, la destrucción de un villorrio y otros daños materiales. En el presente trabajo solamente se entregan antecedentes de la erupción de 1971, la cual se encuentra mejor documentada.

El volcán Villarrica (2840 msnm) está emplazado entre los lagos Villarrica y Calafquén (200 msnm) de modo que sus lahares se deslizan a través de los pequeños esteros que existen en sus laderas terminando su recorrido en dichos lagos. La regulación de estas grandes masas de agua impide la propagación de los efectos hacia aguas abajo.

De acuerdo a la descripción de González-Ferrán (1972) y Marangunic (1974), en febrero de 1971, a mitad de ladera, el hielo presentaba profundas grietas y la formación de numerosas lagunas, que delataban la existencia de actividad volcánica. El 29 de Octubre de ese año se registraron violentas explosiones en el cráter central y el 29 de noviembre se produjo el primer derrame de lava. Los derrames aumentaron paulatinamente hasta el 20 de diciembre, descendiendo la lava hasta los 2000 msnm. Dichos flujos causaron la fusión parcial de la cubierta de hielo, formando un canal en el glaciar con una profundidad que fluctuaba entre 20 y 40 mts. El 29 de diciembre el cono superior se fracturó en una longitud de 4 km. eyectando una lámina de lava que se deslizó sobre la nieve a gran velocidad, abriéndose en forma de abanico hasta alcanzar unos 400 m. de caída en su frente. El contacto entre la lava y la nieve produjo grandes cantidades de agua líquida, generándose lahares que en menos de 1 hora, siguiendo el cauce de 4 esteros, habían alcanzado los lagos. Las velocidades máximas de los lahares fueron estimadas del orden de 15-20 m/s. El volumen total de lava eyectada se estimó en 30 Hm³, siendo las cenizas y otros piroclastos de poca importancia.

De acuerdo a los registros limnigráficos de ambos lagos, el volumen total que ingresó a causa de los lahares fue de 25 Hm³, lo que se produjo en un lapso aproximado a 4 horas. Con estos antecedentes y asumiendo un hidrograma triangular, el caudal máximo del conjunto de los lahares habría sido del orden de 3500 m³/s.

El volcán Hudson (2500 msnm), el cual ha generado grandes lahares en el río Huemules, se encuentra ubicado en la Cordillera Patagónica. Su cráter es una caldera de contorno aproximadamente circular con un diámetro de 9 Km. que antes de su erupción se encontraba cubierta totalmente por el hielo. La masa de hielo daba origen a 2 lenguas glaciares, la más importante hacia el noroeste, donde se encuentra el valle del río Huemules, y una secundaria en dirección sureste, hacia el río Ibáñez. Este volcán, ubicado en una región muy despoblada y de difícil acceso, solo fue descubierto en 1970 (Fuenzalida y Espinoza, 1973) entrando sorpresivamente en actividad el 12 de agosto de 1971.

De acuerdo a las investigaciones de Fuenzalida (1974), la erupción del volcán Hudson fue muy violenta y se caracterizó por la expulsión de grandes cantidades de ceniza, las que alcanzaron la Costa Atlántica, sin embargo no se observaron lavas ni piroclastos gruesos. La erupción se inició con una explosión, la cual fue seguida por un gran lahar que arrasó el 80% de la vegetación del valle y que produjo la muerte de la mayor parte de los escasos pobladores del lugar. El lahar estaba compuesto de agua, grandes bloques de hielo y material volcánico en gran cantidad, además de troncos y otros elementos, recorriendo a gran velocidad los 35 km de longitud del valle del río Huemules hasta alcanzar el océano en el fiordo Elefantes. Al día siguiente de la erupción, dicho fiordo estaba cubierto a lo largo de 40 Km. por piedra pómez. Según los antecedentes proporcionados por Cevo (1978), el caudal máximo del lahar sería superior a los 10.000 m³/s. Se estima que el lahar se generó por la fusión parcial del hielo de la caldera junto a las tensiones introducidas por la erupción, todo lo cual significó el violento vaciamiento hacia el valle del río Huemules del agua líquida almacenada. Se desconoce si se presentó derretimiento superficial del hielo a causa de materiales expulsados por el volcán a alta temperatura. Es interesante señalar que en fotografías tomadas en 1945 se observan fracturas de la cubierta de hielo indicando actividad térmica anormal en la base. Además, en 1970 se detectó un comportamiento anómalo del río Huemules, con bruscas fluctuaciones de caudal, posiblemente debidas a la actividad volcánica en presencia de hielo.

En enero de 1973, sin que se registrara una nueva erupción del volcán Hudson, se produjo una segunda crecida catastrófica del río, originada posiblemente en el vaciamiento del agua líquida acumulada en la caldera a causa del derretimiento de los hielos provocados por la actividad geotérmica. Esta crecida correspondería a un caso típico de Jokulhlaups, similar a algunas de las mencionadas en 3. Como consecuencia de la actividad del volcán Hudson, en febrero de 1973, se estimó que el 80% del hielo que existía originalmente en la caldera se había derretido (Fuenzalida, 1974).

5. CRECIDAS GENERADAS POR DESLIZAMIENTO DE TIERRA, COMO RESULTADO DE ACTIVIDAD SISMICA.

Durante un movimiento sísmico en las zonas montañosas se producen numerosos deslizamientos de tierra y desprendimientos de roca, que tienden a obstaculizar el drenaje natural, con el consiguiente riesgo del vaciamiento violento de las aguas acumuladas. No obstante haberse registrado en Chile en los últimos 40 años unos 15 terremotos de gran magnitud (magnitud Richter, mayor que 7), en general los deslizamientos no han sido suficientemente importantes como para almacenar grandes volúmenes de agua, debido a la elevada pendiente y reducido ancho de los valles, de modo que solo se tiene antecedentes de una crecida de magnitud excepcional de este origen. Ella fue provocada por el represamiento del río San Pedro, desagüe natural del lago Riñihue, a causa del gran terremoto del 22 de Mayo de 1960 (Cuadro N° 1, caso 6).

De acuerdo a los antecedentes disponibles (ENDESA, 1960), en esa ocasión se produjeron 3 grandes deslizamientos de tierra, el mayor de los cuales, ubicado a 4,5 Km. del lago Riñihue, representó un volumen de aproximadamente 34 Hm³, tenía una elevación sobre el lecho original de 43 m y se extendía en un largo, según el eje del río, de 2,0 Km. La causa de los derrumbes fue la combinación de un sismo de gran magnitud (8,7 en la escala de Richter) con las precarias condiciones de

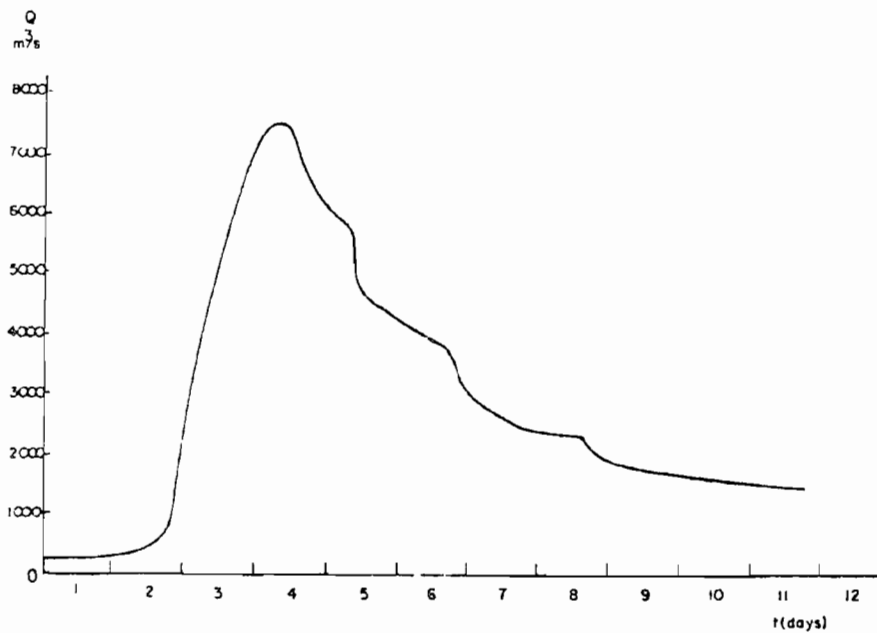


FIG. 6 Hidrograma de crecida del río San Pedro, debido al represamiento del lago Riñihue.

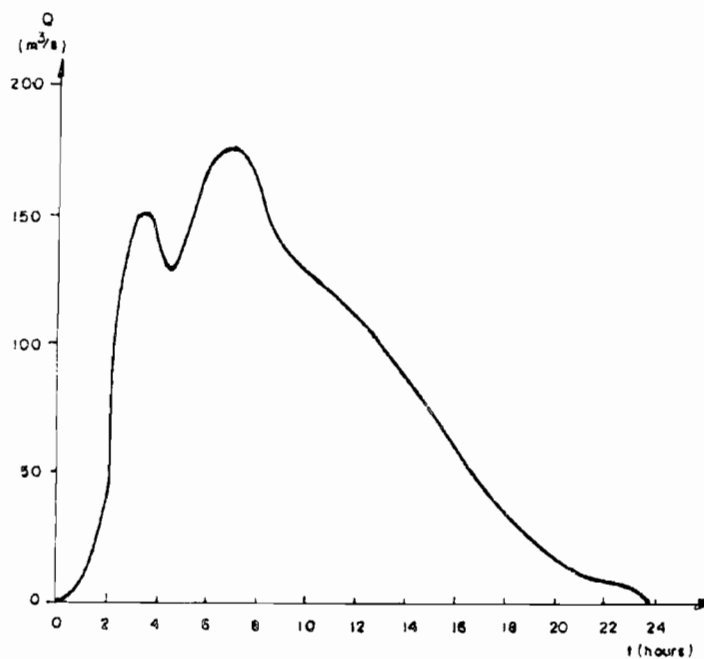


FIG. 7 Hidrograma de la crecida del 29/Noviembre/1987 del río Colorado, 220 Kms. aguas abajo del lugar de generación. Se observa que la crecida presenta 2 caudales máximos.

estabilidad de las laderas por donde el río San Pedro ha labrado su cauce, las cuales están formadas por terrenos sedimentarios de origen glaciario.

La proximidad del represamiento al lago provocó el aumento de su nivel, alcanzando después de 3 meses a acumular un volumen adicional de 2.000 Hm³, antes de que debido a la ruptura del muro los niveles comenzaran a disminuir.

Ante el riesgo que significaba esta situación los organismos públicos efectuaron diversas labores, que se orientaron por una parte a inducir la ruptura por un costado del cauce original, evitando que se produjera a través del material depositado por el deslizamiento, el cual se suponía de menos resistencia a la erosión, y por otra a utilizar un umbral de roca existente para peraltar el eje hidráulico hacia aguas arriba. De este modo se logró reducir el caudal máximo desde un valor estimado inicialmente del orden de 15.000 m³/s, al valor que realmente se registró, de 7.500 m³/s.

El proceso de ruptura del represamiento se inició en forma muy lenta y controlada, y se caracterizó por la aparición de una cascada en un sector de terreno más resistente, de modo que hacia aguas abajo de dicho punto la profundización del cauce llegó a generar una caída de 15 m, cuando el caudal pasante era de 300 m³/s. La eliminación de ese punto de control por el rebase hacia un cauce en terreno más blando, desencadenó la parte principal de la crecida, alcanzándose en 40 horas el caudal máximo (Fig. 6).

La crecida produjo la inundación parcial de la ciudad de Valdivia (50.000 hab.), pero los daños no fueron importantes debido a las precauciones adoptadas.

6. CRECIDAS GENERADAS POR EL DESLIZAMIENTO DE UNA LADERA SEGUIDA DE UN FLUJO DE DETRITOS.

Los flujos de detritos y de barro han desempeñado un papel importante en el modelado del paisaje en gran parte del territorio chileno, y constituyen el relleno cuaternario de muchos valles, en especial en la zona árida y semi-árida del país, (Segerstrom, 1964). En la actualidad la frecuencia de estos fenómenos es elevada y se ha correlacionado con la ocurrencia de períodos de alta pluviosidad, y con determinadas formaciones geológicas (Hauser, 1985). No obstante lo anterior, en la gran mayoría de los casos la generación de estos flujos de detritos tienen un corto recorrido antes de depositarse, y en consecuencia su importancia es de carácter local. En la crecida que se incluye en el presente trabajo, ocurrida el 29/11/87 en el río Colorado, Andes de Santiago, el deslizamiento de una ladera generó un flujo de detritos, el cual por incorporación de agua en su trayecto, se transformó en una gran crecida fluvial, afectando en forma muy significativa un tramo de 59 Km. a lo largo del cauce. En la actualidad este evento está siendo investigado de modo que se espera disponer en el futuro de antecedentes más completos.

De acuerdo a los primeros estudios, (Dirección General de Aguas, 1987; Chilettra, 1987) el origen del fenómeno se encontró en los nacientes de un afluente menor del río Colorado, el estero Parraguirre, donde se produjo un deslizamiento que se ha estimado de un volumen de 3,5 Hm³. Este deslizamiento se inició a una elevación de 4700 msnm y el pie de la ladera se encuentra a 1200 m más abajo, de modo que la

masa de suelo y roca que la constituía adquirió una gran energía, lo que le permitió sobrepasar un espolón de roca de más de 50 m y describir una curva de 110° antes de adquirir la dirección del cauce del Estero Parraguirre.

La causa inmediata del deslizamiento se asocia a la excepcional acumulación de nieve del año 1987, la segunda más importante de los últimos 50 años, y a las elevadas tasas de derretimiento de los días precedentes, período en el cual los ríos andinos presentaron su caudal máximo anual.

Los primeros 14 Km. del recorrido se desarrollaron en el estrecho cauce del Estero Parraguirre con una pendiente de 7%, un caudal posiblemente mayor de 10.000 m³/s y velocidades que se estiman superiores a 15 m/s. Este tramo se habría caracterizado por la incorporación de grandes cantidades de agua, acumulada en forma de nieve y contenida en el suelo parcialmente saturado, y de material fino existente en las laderas del valle, transformándose el flujo de detritos en un flujo hiperconcentrado. En este tramo, el escurrimiento presentó grandes ondas siguiendo los cambios de sección del cauce. En la confluencia con el río Colorado, la granulometría de los depósitos presentan un 50% de grava, un 20% de arena y un 30% de limos y arcillas.

En su desplazamiento por el río Colorado, el cual tiene pendientes en el sector de 3 a 2 %, se observaron velocidades medias en distintos tramos de 10 a 8 m/s, disminuyendo el caudal máximo a 1.000 m³/s después de un recorrido total desde el nacimiento del Estero Parraguirre de 59 Km.

En la confluencia del río Colorado con el río Maipo, la modificación de las condiciones hidráulicas del cauce, produjo una importante depositación de sedimentos, la que alcanzó un espesor de 5.0 m.

Es interesante señalar que por causas no conocidas, el aluvión presentó 2 peak, los cuales se observan claramente en el hidrograma registrado a 220 km. su punto de generación (Fig. 7). Según los testigos, el primero de ellos correspondía a un flujo con una concentración relativamente baja de sedimentos, mientras que el segundo era de una concentración notoriamente superior.

7. ANALISIS GENERAL Y CONCLUSIONES

El análisis conjunto de las crecidas de origen no-meteorológico que se han presentado, sugiere los siguientes comentarios:

- En países como Chile, que se caracterizan por la existencia de montañas y glaciares, que presentan una extensa cobertura de nieve estacional y una elevada actividad sísmica y volcánica, la frecuencia de este tipo de fenómenos es suficientemente elevada para ser considerada en los planes de desarrollo, en especial en lo relativo a las grandes obras hidráulicas que requieren un elevado grado de seguridad y a la ubicación de asentamientos humanos permanentes. Es interesante constatar que la casi totalidad de las crecidas no meteorológicas de las últimas décadas se han generado en base a agua almacenada en forma sólida (nieve y/o hielo) o han tenido un almacenamiento en la fase líquida producido por una represa de hielo, lo que pone en evidencia la importancia de las precipitaciones sólidas en la generación de estos fenómenos.

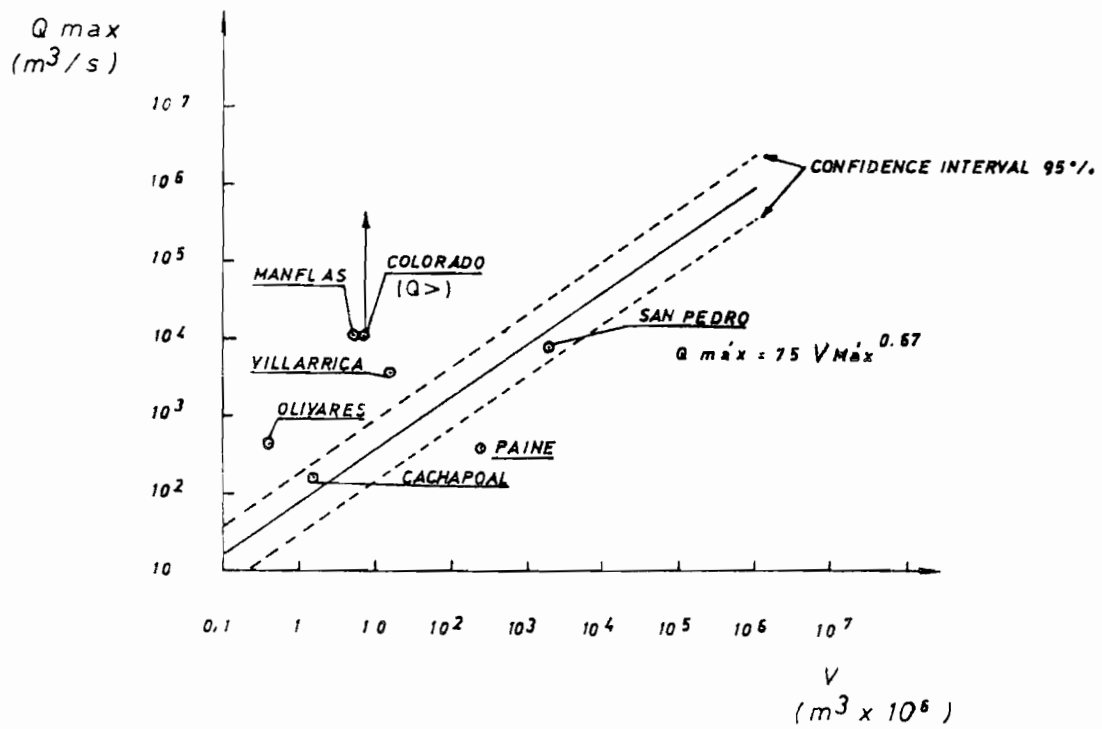


FIG. 8 Relación entre el volumen y el caudal máximo de las crecidas de origen no meteorológico presentadas. Se incluye como referencia la relación propuesta por Clague y Mathews (1973), para crecidas de origen glaciar.

- La forma del hidrograma de estas crecidas depende básicamente de los procesos físicos que las producen, de modo que el volumen de las crecidas no tiene en general relación directa con su caudal máximo. Esta situación se aprecia claramente en el gráfico volumen vs caudal máximo (Fig. 8), donde se observa una importante diferencia entre las crecidas que se generan mediante un proceso continuo de ensanche de un conducto inicial (casos 2, 4, 7 y 8 del Cuadro N° 1) y las que corresponden a un fenómeno más violento (Cuadro N° 1. Casos 1, 3, 5 y 7).
- La complejidad y diversidad de las situaciones que se presentan en la naturaleza, hacen difícilmente aplicables métodos empíricos simples, en el estudio de estas crecidas. En el caso de las crecidas por vaciamiento de represas glaciares, se observa (ver fig. N° 8), que la relación empírica deducida por Clague y Mathews (1973), no resulta concordante con los valores observados. Sin embargo, se estima que la modelación matemática del proceso de vaciamiento de represas de hielo realizada por Nye (1976), utilizando soluciones simplificadas (Clarke, 1982) o mediante procedimientos numéricos (Peña, 1985), ofrece mejores perspectivas.

Las limitaciones de los métodos empíricos se puede ejemplificar además, aplicando al caso de la crecida del río San Pedro la relación deducida para estimar el caudal máximo por ruptura de un muro de tierra (Mac Donald y Langridge-Monopolis, 1984). En ese caso el caudal máximo observado resultó 4 veces inferior al predicho.

- En todos estos eventos el arrastre de sedimentos ha sido muy superior al normal, inclusive en 3 casos (Río Manflas, Río Colorado y Volcán Villarrica) se estima que contribuyen en forma significativa al volumen de la crecida.
- En general estas crecidas han tenido para la población un carácter sorpresivo, sin embargo, la mayoría pudieran haber sido parcialmente previstas, de existir programas adecuados de vigilancia de glaciares y vulcanológicos. En este sentido, las crecidas originadas en el vaciamiento de lagos subglaciales (R. Manflas) y en flujos de detritos del tipo observado en el río Colorado, resultan de muy difícil predicción y por ello revisten especial peligrosidad.
- La importancia de las crecidas de origen no-meteorológico en el desarrollo de obras hidráulicas depende de las características de la obra y de la crecida misma. En relación a este último aspecto interesa conocer el tipo de evento esperado, su frecuencia, volumen, caudal máximo en el punto de generación, su propagación hasta el lugar del emplazamiento de la obra y las posibilidades de previsión. Para la evaluación de cada una de estas características del problema, resulta importante avanzar hacia un mejor conocimiento de los procesos físicos involucrados y de su modelación matemática, de modo de tener disponibles herramientas de análisis suficientemente flexibles para abordar la diversidad de situaciones que se presentan en la naturaleza.

BIBLIOGRAFIA

- Cevo, J. Informe Preliminar sobre erupción del Volcán Hudson Norte o Volcán Huemules. Trapananda N° 1. Coyhaique, 1978
- Clague J. y H.W. Mathews. The magnitud of Jokulhlaups. Journal of Glaciology. Vol. 12. N° 66, 1973
- Clarke, G. Glacier outburst floods from Hazard Lake, Yukon Territory, and the problem of flood magnitude prediction. Journal of Glaciology. Vol. 28 N° 98, 1982
- Chilectra. Minuta interna acerca de la crecida del río Olivares. Santiago 1954
- Chilectra Generación. Informe sobre el aluvión del 29 de Noviembre de 1987 en el área del Proyecto Alfalfal (Informe Preliminar), Santiago, 1987
- Dirección General de Aguas. Informe sobre el aluvión del 29 de Noviembre de 1987 en el río Colorado. Santiago. 1987
- ENDESA. Memoria Operación Riñihue. Santiago. 1960
- Fuenzalida, R. El volcán Hudson. Symposium Internacional de Volcanología. Santiago. 7-14/9/1974
- Fuenzalida, R. y W. Espinoza. Hallazgo de una caldera volcánica en la Provincia de Aysén. Revista Geológica de Chile. N° 1. Santiago. 1973
- Golubev, G. Avalanchas y corrientes de barro en Chile. Informaciones Geográficas. Chile. N° 17. 1969
- González-Ferran, O. La reciente erupción del volcán Villarrica. Primer Symposium Cartográfico Nacional. Santiago. 1972
- Hauser, A. Flujos de barro en la zona preandina de la región metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. Revista Geológica de Chile. N° 24. Santiago de Chile. 1985
- Instituto Geográfico Militar. Atlas de la República de Chile. Santiago. 1983
- Klohn, E. The February 1961 eruption of Calbuco Volcano. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 53, N° 6. December, 1963.
- Lliboutry, L. Nieves y Glaciares de Chile. Santiago. 1955
- Lliboutry, L. Traité de Glaciologie. Masson Cie Editeurs. Paris. 1964
- Lliboutry, L., Morales B. y B. Schneider. Glaciological Problems set by the control of Dangerous lakes in Cordillera Blanca. Perú. Journal of Glaciology Vol. 18. 1977

- Mac Donald, T. y J. Langridge-Monopolis. Breaching Characteristics of Dam Failure
Journal of the Hydraulics. Div. ASCE. Vol. 110. N° 5. 1984
- Marangunic, C. The Lahar provoked by the eruption of the Villarrica Volcano on
december 1971. Symposium Internacional de Volcanología. Santiago.
7-14/9/1974.
- Marangunic, C., Moreno, H. y J. Varela. Observaciones sobre los depósitos de relle
no de la depresión longitudinal de Chile entre los ríos Tinguiririca y
Maule. Segundo Congreso Geológico Chile. Arica. 6-11/8/1979
- Nye J.F. Water flow in glaciers: Jokulhlaups, Tunnels and Veins. Journal of gla-
ciology. Vol. 17, 1976
- Peña H. y F. Escobar. Análisis de una crecida por vaciamiento de una represa gla-
cial. VI Congreso Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
Santiago, 1983
- Peña H. y F. Escobar. Análisis de las crecidas del río Paine. Publ. Interna E.H.
N° 83/7. Departamento de Hidrología. Dirección General de Aguas. San-
tiago. 1983.
- Peña H. Simulación de Crecidas producidas por vaciamiento de represas de hielo.
VII Congreso Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
Concepción. 1985
- Peña, H. y F. Escobar. Análisis del aluvión de Mayo de 1985 del río Manflas. Cuen-
ca del río Copiapó. VIII Congreso Nacional de la Sociedad Chilena de In-
geniería Hidráulica. Santiago. 1987
- Peña, H. y F. Escobar. Aspects of Glacial Hydrology in Patagonia: Glaciological
Studies in Patagonia. 1985-1986 Bulletin of Glacier Research. N° 4, 1987
Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice.
- Rolando, G. Crecidas extraordinarias. Río Cachapoal. Nota interna. División
El Teniente. Codelco-Chile. 1981
- Segerstrom, K. Mass Wastage in North-Central Chile. XXII International Geological
Congress. India, 1964.
- Young, G. (Ed.) Techniques for Prediction of runoff from glacierized areas.
IAHS Publication N° 149. 1985

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS.



3 5617 00005 8289

