

M

O

P



**ANALISIS DE LAS CRECIDAS
DEL RIO PAINE - XII REGION**

PUBLICACION INTERNA E. H. Nº 83/7

DGA
DEPARTAMENTO
DE HIDROLOGIA
SUB-DEPTO. ESTUDIOS
HIDROLOGICOS

REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

ANALISIS DE LAS CRECIDAS DEL RIO PAINE. XII REGION

PUBLICACION INTERNA EH N° 83/7

SANTIAGO, Noviembre 1983

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA

El presente informe fue preparado en el Sub-Departamento
de Estudios Hidrológicos del Departamento de Hidrología por:

Ing. Humberto Peña T.

Ing. Fernando Escobar C.

Noviembre, 1983

I N D I C E

	Pág. N°
1. Introducción	1
2. Descripción General de la Zona	3
3. Descripción del Glaciar Dickson	8
4. Antecedentes Existentes	13
4.1 Estadísticas Fluviométricas y de Niveles de Lagos	13
4.2 Estadísticas Meteorológicas	19
5. Análisis de Antecedentes Históricos	24
6. Evaluación de la Onda de Crecida en el Río Paine	31
7. Determinación de las Causas de las Crecidas	38
7.1 Análisis de Causas	38
7.2 Identificación del Lugar de Almacenamiento	45
8. Análisis del Hidrograma de las Crecidas	48
8.1 Ecuaciones del Vaciamiento de una Represa de Hielo	48
8.2 Aplicación al Río Paine	51
9. Conclusiones y Recomendaciones	63
Bibliografía	66

A N E X O S

Anexo I	Extrapolación de la curva de descarga del río Paine en Parque Nacional
Anexo II	Estimación de caudales por métodos indirectos
Anexo III	Balance Hidrológico
Anexo IV	Cálculo de Propagación de Crecidas
Anexo V	Fotografías

R E S U M E N

En el presente estudio se analizan las crecidas ocurridas en el río Paine (XII Región) en los meses de enero/82, diciembre/82 y marzo/83. Para ello se entrega previamente una descripción de la zona y en especial del Glaciar Dickson, lengua efluente del Hielo Patagónico Sur del cual nace el río Paine (Capítulos 2 y 3).

Se recopilaron y analizaron los registros fluviométricos, meteorológicos y de niveles de lagos existentes. Esta información permitió comprobar que no existen antecedentes medidos de crecidas similares (Capítulos 4 y 5).

El estudio de las causas de las crecidas demostró que su origen se encuentra en el vaciamiento de un lago sobreglacial que se forma en la confluencia de una lengua secundaria del glaciar Dickson y el glaciar Frías, por obstrucción del drenaje normal (Capítulo 7). El volumen total de las crecidas se estimó en 250×10^6 m³, con caudales máximos de 350 m³/s y una duración de 17-23 días. La forma del hidrograma pudo ser estudiada en base a las ecuaciones desarrolladas por Nye (1976), las cuales consideran los diversos procesos físicos que intervienen en el fenómeno. Dicho análisis mostró que la violencia de la crecida era muy sensible a la variación de algunas condiciones iniciales (Capítulo 8).

Dentro de las recomendaciones del estudio se propone el rediseño de las obras de infraestructura para evitar en el futuro daños con crecidas como las ocurridas. Se estima además necesario efectuar un seguimiento de la evolución de estos fenómenos, para lo cual se recomienda instalar algunas estaciones de control, finalmente se sugieren algunas investigaciones a desarrollar para un mejor conocimiento del fenómeno.

1. INTRODUCCION

Durante los veranos de los años 1982 y 1983 se presentaron en el río Paine (XII-Región) grandes crecidas, las que hicieron subir el nivel de los lagos Nordenskjold, Pehoé y del Toro, inundaron los caminos del sector y causaron daños en instalaciones ribereñas. Como la zona afectada se ubica en el Parque Nacional Torres del Paine, se crearon problemas para el normal flujo turístico hacia ese lugar, situación que causó preocupación en las autoridades de gobierno y en los funcionarios de CONAF responsables de la administración del Parque. Por esta razón, se solicitó a la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas la realización de un estudio, a fin de determinar las causas de dichos fenómenos y definir las medidas de precaución y defensa más aconsejables.

De acuerdo a lo anterior, viajaron a la zona entre los días 21 y 27 de Marzo de 1983, el Ing. H. Peña, Jefe del Sub-Depto de Estudios Hidrológicos y encargado del programa de glaciología de la DGA, y los funcionarios señores R. Anabalón y A. Peralta, técnicos nivomensores del mismo Servicio. Las autoridades regionales del Ministerio de Obras Públicas pusieron a disposición de dicho grupo un helicóptero, con el cual se pudo sobrevolar el sector del nacimiento del río Paine en el Glaciar Dickson, a su vez las autoridades de CONAF y la administración del Parque Nacional proporcionaron el apoyo en terreno y dispusieron que los guarda-parques Sres. J. Alarcón y F. Barrientos sirvieran de guías para la visita por tierra al mismo sector. Los guarda-parques mencionados habían participado recientemente en una primera exploración del glaciar Dickson, junto a otro funcionario de CONAF y el expedicionario francés Sr. B.

Doliges (González, 1983).

El presente informe recoge las observaciones efectuadas durante la visita a la zona y los antecedentes hidrológicos proporcionados por la red de medición controlada por la DGA.

2. DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA (Figura N° 2.1)

La zona de estudio se ubica en el Parque Nacional Torres del Paine (XII-Región) y se encuentra limitada aproximadamente por los paralelos $50^{\circ} 45'$ y $51^{\circ} 20'$ L.S y los meridianos $72^{\circ} 20'$ y $73^{\circ} 30'$ L.W

Esta zona representa el borde sur oriental del Hielo Patagónico Sur (HPS), vasta superficie de hielo que cubre unos 13.500 Km² extendidos por 330 Km en dirección Norte-Sur, en el límite de las Regiones XI y XII del país. La región se caracteriza por la Cordillera del Paine, bello macizo de granodiorita ubicado en los márgenes del HPS y por el sistema interconectado de los lagos Nordenskjold, Pehoé y del Toró que flanquean la Cordillera del Paine por el sur.

El río Paine nace en el lago terminal del glaciar Dickson, una de las lenguas efluentes del HPS, y en su recorrido forma una semicircunferencia que drena parcialmente la Cordillera del Paine y se conecta con el sistema de lagos ya mencionados. Por el poniente de la Cordillera del Paine se encuentra otra lengua efluente del HPS, el glaciar Grey, que da origen al lago y río del mismo nombre. De ese modo la Cordillera del Paine queda limitada casi completamente por el HPS, el río Paine y sus afluentes, y los lagos Nordenskjold, Pehoé y Grey.

A los pies de las abruptas formas de la Cordillera del Paine y de los nunataks del HPS, los cuales alcanzan elevaciones de 3000 m.s.n.m., se observan los suaves valles modelados entre los 300 y 50 m.s.n.m., por el hielo que cubrió la zona, por donde escurre parcialmente el río Paine.

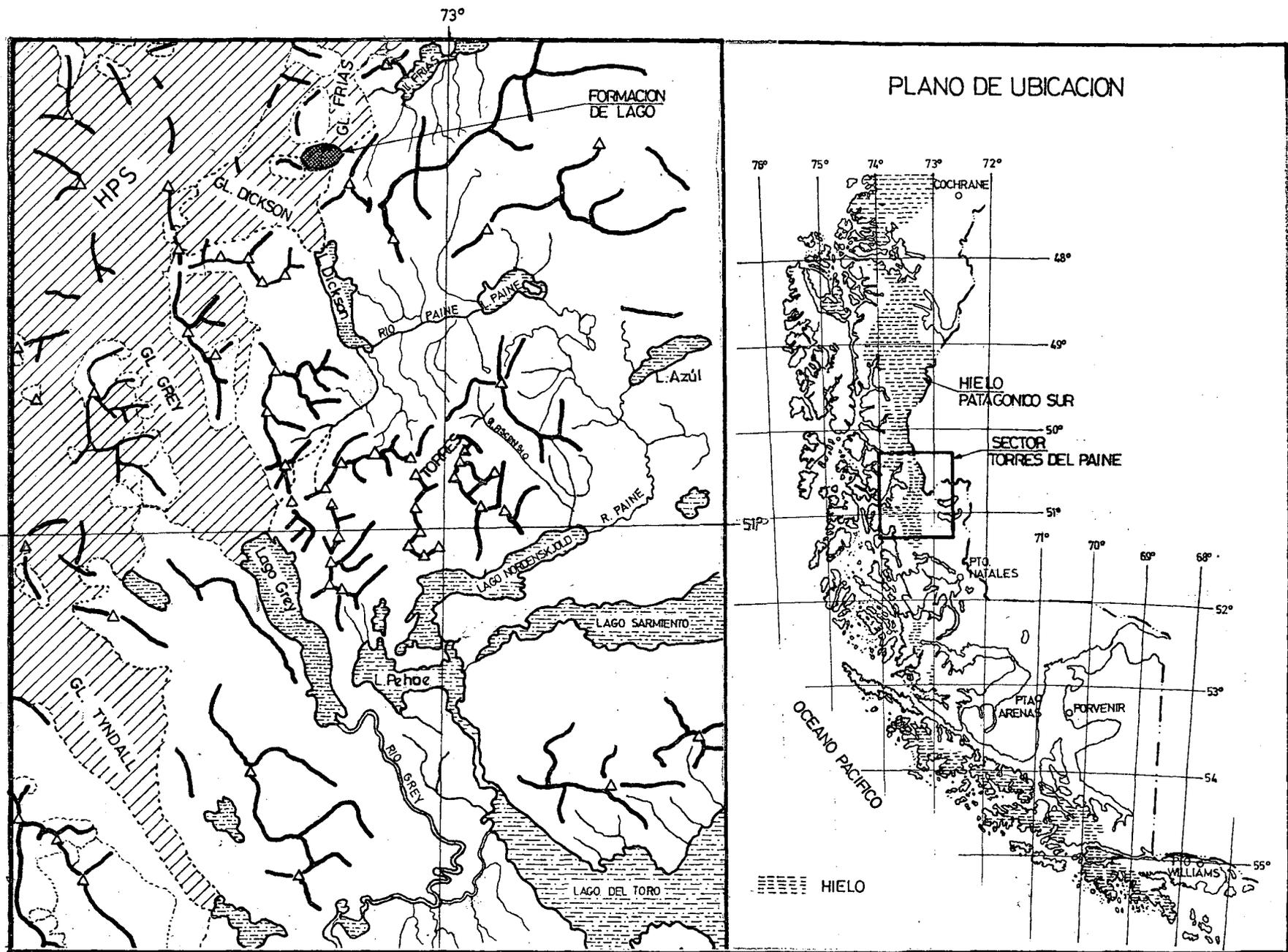


FIG. Nº 2.1

Hacia el oriente de la zona en estudio se extienden las planicies de la pampa patagónica. Ese sector es atravesado por el río Las Chinas, el cual drena la Sierra Baguales y extensas zonas de la pampa y desemboca en el lago del Toro.

Todo este sistema de lagos y ríos da origen finalmente al río Serrano, uno de los ríos más caudalosos del país.

El río Paine nace en el extremo sur del lago Dickson, desde una pequeña laguna en forma de lóbulo conectada con el lago principal. Además de los aportes del HPS, el lago Dickson recibe en su borde sur-poniente un río (en algunos mapas se le designa también con el nombre de río Paine), que drena varios de los glaciares de la Cordillera del Paine. Desde su nacimiento, el río Paine se dirige hacia el oriente en un recorrido de aproximadamente 7,5 Km hasta el lago Paine, donde cambia de rumbo y toma una dirección sur-oriental. A 24 Km del punto anterior dobla hacia el sur y posteriormente hacia el sur-poniente para entregar finalmente sus aguas al lago Nordenskjöld.

El clima de la zona, de acuerdo a Fuenzalida (1971) corresponde a un clima continental trasandino con degeneración esteparia. En rigor, según la clasificación de Koeppen estaría en el límite entre un clima templado húmedo (Cfc) y un clima boreal húmedo (Dfd)

Las precipitaciones se distribuyen durante el año en forma extraordinariamente regular.

Como sucede frecuentemente la distribución espacial de las precipitaciones es heterogénea en la cercanía de los grandes macizos. Es así como en la estación de Estancia Lago Grey se registran precipi

taciones un 25% mayor que las controladas en la Estancia Paine. En el diagrama de la figura N° 2.2 se entrega la curva de precipitaciones y temperaturas mensuales obtenida de la estadística de Estancia Paine.

El régimen hidrológico en el río Paine es básicamente glacial, con algunos aportes nivales de menor importancia. Los caudales máximos se observan en el mes de Enero. Durante el invierno los caudales se mantienen en un nivel muy constante y reducido, similares aproximadamente a 0,2 veces el caudal medio anual.

El régimen hidrológico del río Grey es muy similar al anterior. Por su parte el río Las Chinas muestra un régimen nival con un deshielo que va desde Octubre a Enero, con un caudal máximo en Noviembre. Los aportes de origen pluvial en general son de poca significación y no afectan los caudales medios mensuales. El único que de acuerdo a los datos recogidos muestra en forma aislada el efecto de las lluvias de invierno es el río Serrano, posiblemente por la acción directa de la lluvia sobre la extensa zona de lagos que se ubica hacia aguas arriba.

DIAGRAMA CLIMATICO

ESTANCIA PAINE

LAT.: 51° 11' S

LONG: 72° 58' O

h : 46 m.s.n.m.

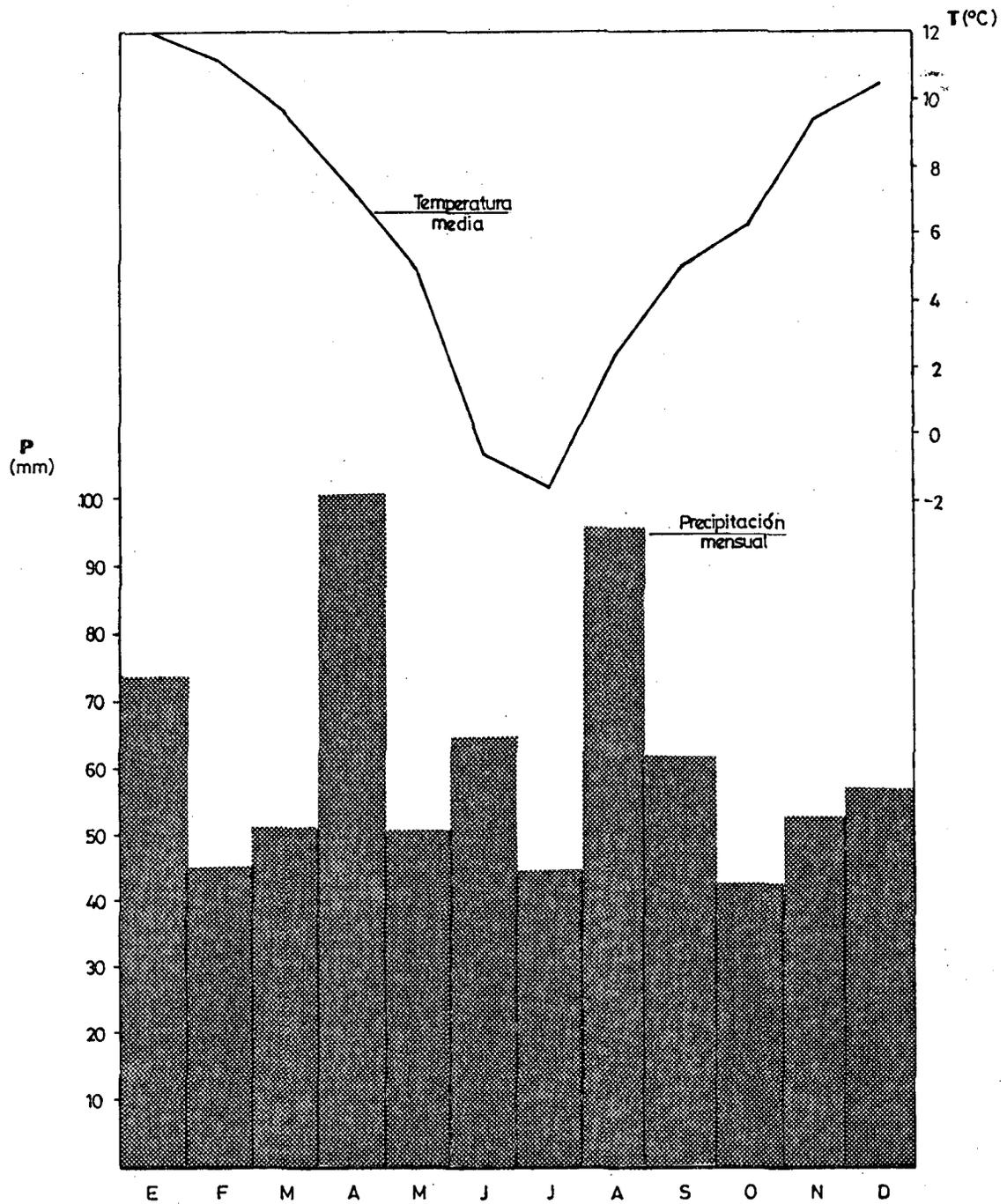


FIG. Nº 2. 2

3. DESCRIPCION DEL GLACIAR DICKSON

Para explicar las crecidas del río Paine es importante hacer una somera descripción del glaciar Dickson. Los antecedentes que se disponen con ese propósito son escasos, siendo especialmente importante la ausencia de una cartografía adecuada, que permita determinar con precisión las áreas, desniveles y flujos del hielo. En general se tuvieron disponibles las fotografías tomadas en la visita a la zona y las tomadas por el SAF (1975); y el informe preparado en la visita efectuada por funcionarios de CONAF (González, 1983).

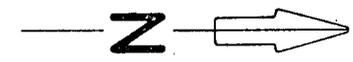
Como se ha señalado, el glaciar Dickson corresponde a una de las lenguas efluentes del HPS y se ubica en su borde sur-oriental (Fig. N° 3.1). La determinación de las masas de hielo del HPS que se evacuan por esa lengua es poco precisa. Por el poniente se observa una línea de afloramiento rocosos, que continua el Cordón Barros Arana y el borde oriental del glaciar Grey y que lo separa claramente de dicho glaciar. Aún cuando se observan en tramos limitados desbordes desde el glaciar Grey hacia el Dickson, lo más probable es que ese cordón defina completamente el drenaje de las aguas en el sector.

Por el norte se observa en las fotografías una meseta de hielo en pleno HPS, hasta la prolongación hacia el oriente del glaciar Calvo. De dicha meseta se desprende por el oriente, colindando con el Dickson, un conjunto de lenguas glaciares hacia el lago Frías, las que de acuerdo al plano de Lliboutry (1955) constituyen el glaciar Frías, aún cuando la más occidental está claramente separada del grupo.

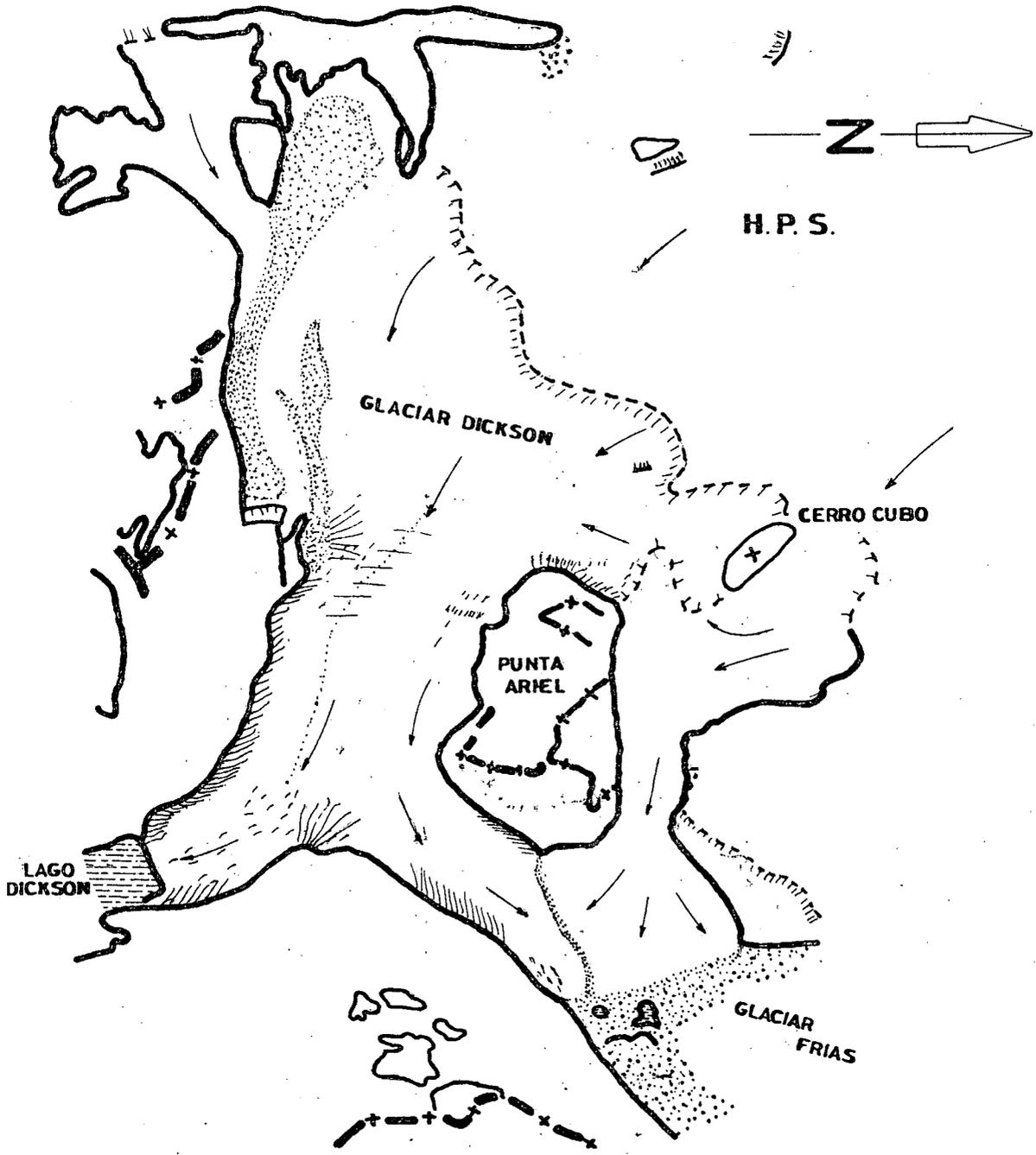
El flujo de hielo en la meseta descrita es desconocido, pu-

CROQUIS GLACIAR DICKSON

GLACIAR GREY



H. P. S.



- Escala aproximada
 1: 85.000
 Croquis basado en foto aérea
 S. A. F. 1976 -

- Limite de hielo
- Hielo recubierto
- Flujo de hielo
- TTT Caída de hielo
- //// Sistema de grietas
- + Líneas de cumbres
- Superficie de agua

FIG. N° 3.1

diendo alimentar a los glaciares Calvo, Dickson, Frías o Grey, sin embargo es posible que tanto el glaciar Frías como el glaciar Dickson queden separados del cuerpo central del plateau del HPS por un cordón rocoso de dirección aproximada NE - SW que presenta como cumbre notable el cerro Cubo (2.400 m.s.n.m.) y cuya presencia es sugerida por los nunataks y cascadas de hielo que se alinean en esa dirección. De ese modo, ambos glaciares recibirían solamente los desbordes de hielo del plateau del HPS y ello explicaría su extraordinaria sensibilidad a los cambios climáticos. Ese cordón montañoso también impediría en gran medida el drenaje del agua en esa dirección.

El glaciar Dickson y la lengua occidental del glaciar Frías ya mencionada, están separados por el Cerro Cubo y la Punta Ariel. Entre ambos cerros existe un flujo de hielo que cae desde el glaciar Frías hacia el Dickson. Sin embargo, por el borde sur de la Punta Ariel el hielo presenta poca pendiente y un flujo inverso, de poniente a oriente. De ese modo, la lengua secundaria del glaciar Dickson confluye con la lengua occidental del glaciar Frías en dirección de la laguna Frías.

Por el sur, el glaciar Dickson está delimitado por la continuación del Cordón Barros Arana, a través del cerro Stokes (2140 m.s.n.m.) y por el cordón del Cerro Daudet. Ambos cordones giran en dirección hacia el sur, dejando paso al frente del glaciar y constituyendo las riberas del lago Dickson. La superficie del glaciar Dickson se ha estimado en 60 Km², su longitud es del orden de los 10 Km. y su ancho inicial tiene unos 7 Km. reduciéndose en el frente correspondiente al lago Dickson a 1,3 Km aprox. La lengua secundaria con dirección hacia el oriente presenta un ancho de 1.3 Km.

En el glaciar Dickson se puede distinguir un sector de ali-

mentación en el plateau del HPS, a unos 1.300 m.s.n.m., un sector intermedio con cascadas de hielo y desniveles importantes, y un sector inferior, de ablación y con escasa pendiente, que se extiende a los 400 m.s.n.m.

Desde un punto de vista térmico el glaciar Dickson se clasifica como un glaciar temperado, es decir su masa se mantiene en el punto de fusión durante todo el año.

Como se ha señalado, el glaciar Dickson ha sufrido un importante retroceso desde principios de siglo. Según Lliboutry (1955), entre 1897, fecha en la cual Nordenskjöld obtuvo una fotografía del lugar y 1943 (foto de Agostini), habría experimentado un retroceso anual de 17 m/año. La información obtenida de Lliboutry en base a fotografías del I.G.M. 1945, de las fotografías SAF (1976) y de la visita a terreno, muestran un retroceso que ha continuado en forma muy violenta, estimándose las siguientes tasas de retroceso:

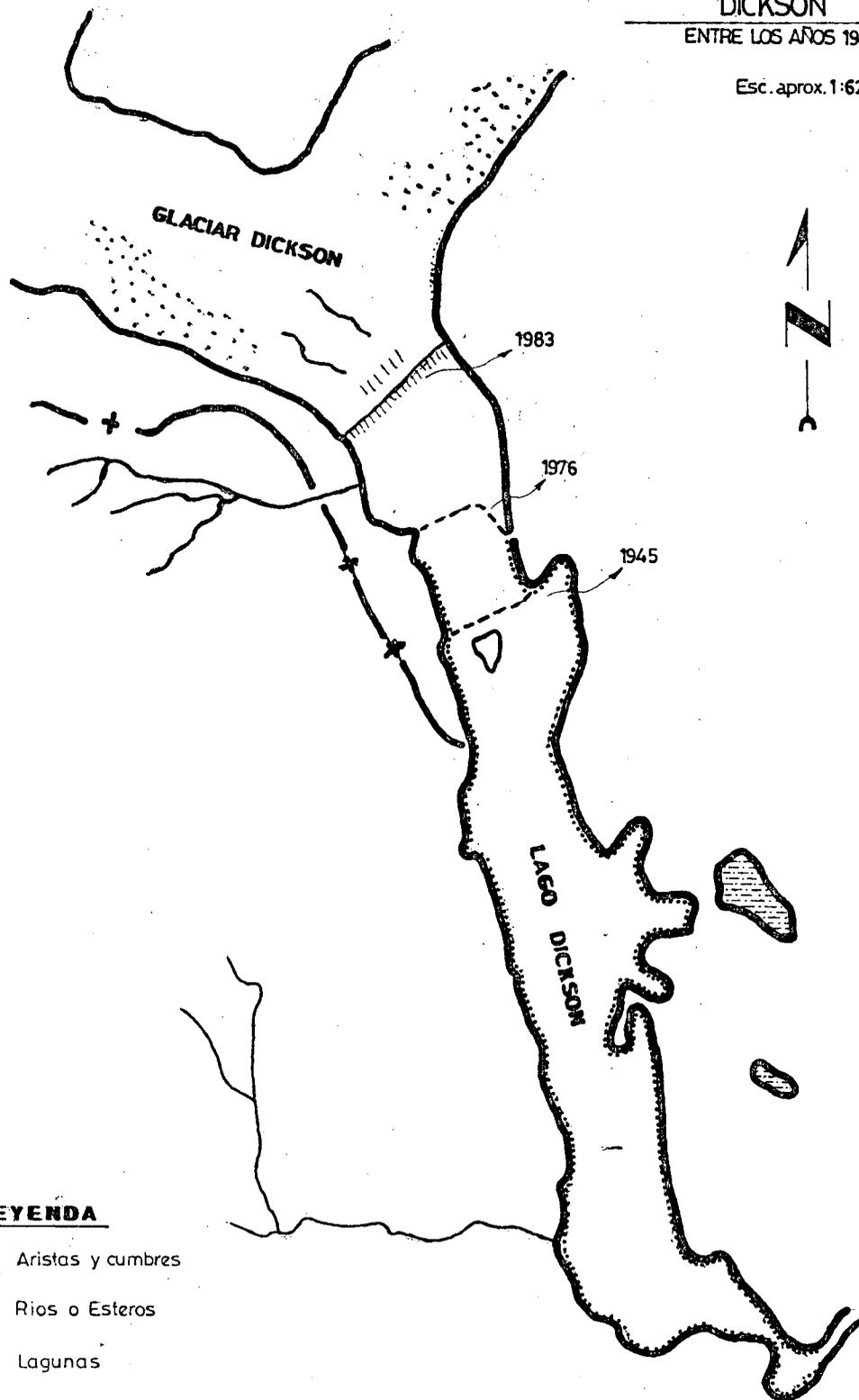
Período	Retroceso total	Retroceso anual
1945 - 1976	1.0 Km	32 m/año
1976 - 1983	1.3 Km	186 m/año

En la figura N° 3.2, se indica la posición del frente en las distintas fechas.

RETROCESOS DEL GLACIAR DICKSON

ENTRE LOS AÑOS 1945 Y 1983

Esc. aprox. 1:62.000



LEYENDA

- + — Aristas y cumbres
- ~ Rios o Esteros
- Lagunas

FIG. 3.2

4. ANTECEDENTES EXISTENTES

4.1 Estadísticas Fluviométricas y de Niveles de Lagos

La hoya del río Serrano cuenta con una red de estaciones fluviométricas en los principales cauces. La mayoría de ellas fueron instaladas recientemente, contándose con registros limnigráficos continuos sólo a partir de Octubre de 1981. La estación más antigua es la del río Serrano que cuenta con registros desde el año 1964, aunque con algunas interrupciones. Además de los registros de caudales, existen algunas estadísticas de niveles de lagos, las que en la actualidad están siendo continuadas por personal de CONAF.

En el cuadro N° 4.1 se presenta la lista de estaciones con los antecedentes relativos a su ubicación, y en el cuadro N° 4.2 un diagrama de barras donde se ubica el período de registros de cada una de las estaciones. Además, se incluye en la figura N° 4.1 un plano con la ubicación de las estaciones.

A continuación se entregan los principales antecedentes de cada estación de medición.

a) Río Paine en Parque Nacional

Se encuentra ubicada en el río Paine aguas arriba del lago Nordenskjöld, fue instalada el año 1981 y cuenta con registros limnigráficos continuos desde Octubre de ese año hasta la fecha. Esta estación controla los aportes provenientes del glaciar Dickson y de otros glaciares menores, previamente regulados por el lago del

CUADRO N° 4.1

NOMINA DE ESTACIONES FLUVIOMETRICAS Y DE LAGOS

ESTACION	TIPO	INST.	ALTURA	LATITUD	LONGITUD
1. Paine en Parque Nacional	LG	DGA	----	49°58'S	72°47'W
2. Grey antes de Jta con Serrano	LG	DGA	50	51°11'S	73°01'W
3. Serrano antes de Jta con Grey	LG	DGA	40	51°13'S	72°59'W
4. Las Chinas en C. Castillo	LG	DGA	65	51°13'S	72°27'W
5. Paine en Salto Chico	LM	END	45	51°07'S	72°59'W

NIVELES DE LAGOS

6. Toro en Est. Paine	LM	DGA	45	51°10'S	72°57'W
7. Pehoé en Pudeto	LM	END	45	51°15'S	73°00'W
8. Sarmiento en Baño Viejo	LM	DGA	55	51°00'S	72°38'W

Lg: limnigráfica

Lm: limnimétrica

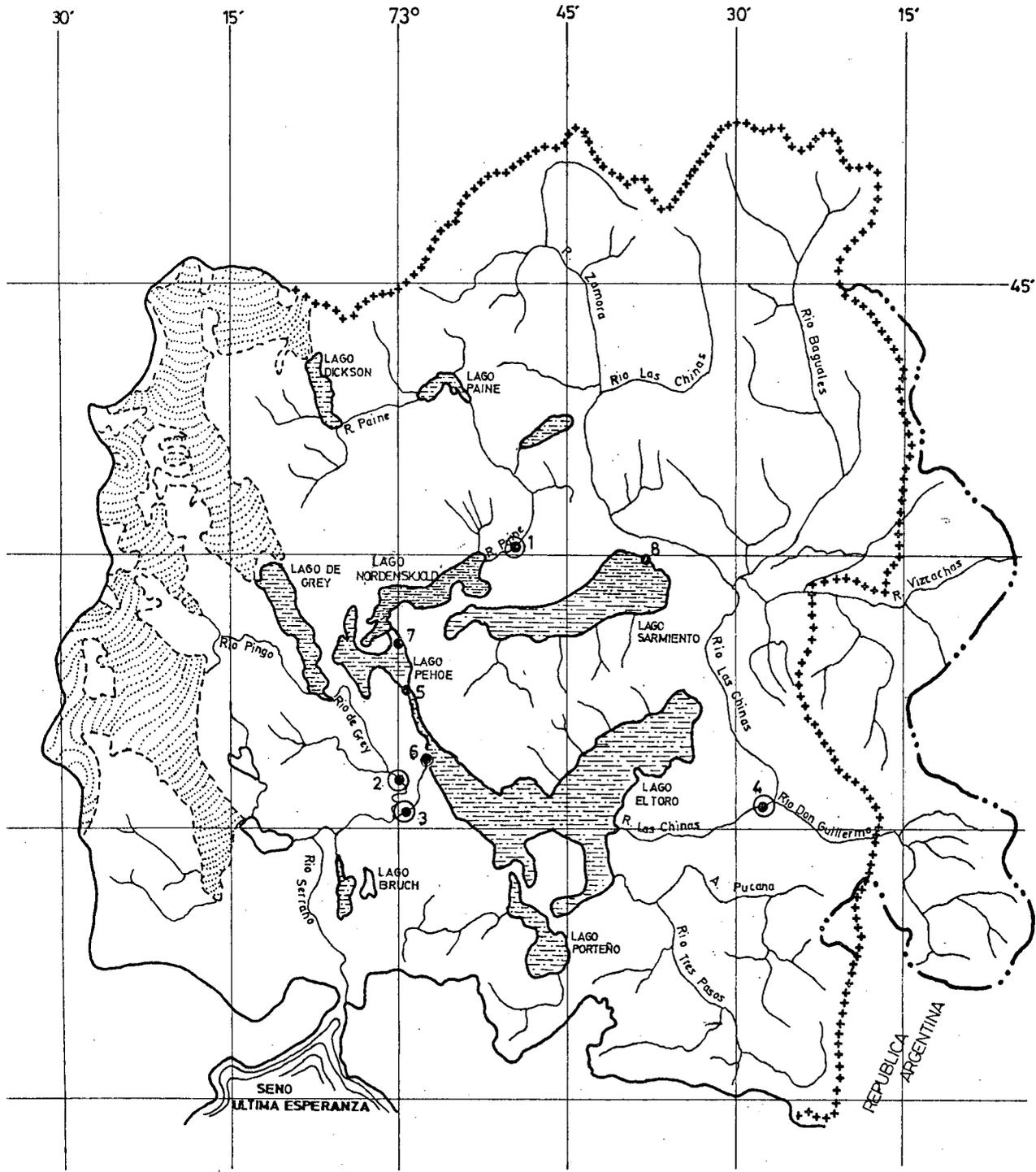
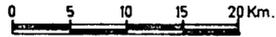
ESTACIONES FLUVIOMETRICAS EXISTENTES

PERIODOS CON REGISTRO

ESTACION	AÑO
	'64 '65 '66 '67 '68 '69 '70 '71 '72 '73 '74 '75 '76 '77 '78 '79 '80 '81 '82 '83
PAINE EN PARQUE NACIONAL	
GREY ANTES DE JUNTA CON SERRANO	
SERRANO ANTES DE JUNTA CON GREY	
LAS CHINAS EN CERRO CASTILLO	
PAINE EN SALTO CHICO	
<u>NIVELES DE LAGOS</u>	
LAGO DEL TORO	
LAGO PEHOE EN PUDETO	
LAGO SARMIENTO EN BAÑO VIEJO	

□ AÑO INCOMPLETO

■ AÑO COMPLETO



⊙ Estación Limnigrática

● Estación Limnimétrica

ESTACIONES FLUVIOMETRICAS

NOTA: EL LIMITE INDICADO TIENE UN CARACTER DESCRIPTIVO, NO ES OFICIAL.

- | | |
|--|--|
| 1.) Río Paine en Parque Nacional | 5.) Río Paine en Salto Chico |
| 2.) Río Grey antes Junta con Serrano | 6.) Lago El Toro en Estancia Río Paine |
| 3.) Río Serrano antes Junta Río Grey | 7.) Lago Pehoe en Pudeto |
| 4.) Río Las Chinas en Puente Carretero | 8.) Lago Sarmiento en Baño Viejo |

FIGURA 4.1

mismo nombre y por el lago Paine. La estación se emplaza en el camino que va hacia el lago Paine en las cercanías de Laguna Amarga. La medición se hace desde un puente existente para el paso de ganado.

Durante la crecida de Marzo de 1983 el río Paine desbordó su cauce normal unos metros aguas arriba de la estación, devolviendo los caudales algunos metros aguas abajo de ésta. Por tal motivo, al traducir los datos registrados durante esta crecida, fue necesario considerar el caudal no controlado por la estación.

b) Río Grey antes de Junta con Serrano

Como su nombre lo indica, está ubicada en el río Grey aguas arriba de la confluencia con el río Serrano, a una cota de 50 m.s.n.m. Controla principalmente los aportes provenientes del glaciar Grey, previamente regulados por el lago Grey, y los aportes del río Pingo. Esta estación cuenta con registros limnigráficos continuos desde Octubre de 1981 hasta la fecha.

c) Río Serrano antes de Junta con Grey

Está ubicada aguas abajo del lago del Toro y antes de la confluencia con el río Grey, a una cota de 40 m.s.n.m. Esta estación controla los caudales efluentes del lago Toro. Fue instalada por ENDESA el año 1964 y cuenta con registros limnigráficos hasta el año 1976, fecha en la cual se suspendió el control. En ese período la información está bastante interrumpida. Luego la DGA reinició los registros en el año 1980, fecha desde la cual se cuenta con antecedentes más completos. Debido a la considerable regulación que introduce el lago del Toro, las fluctuaciones del caudal en esta estación son muy lentas y con un ran-

go de variación relativamente pequeño, aspecto que favorece el control.

d) Río Las Chinas en Cerro Castillo

Está ubicada aguas abajo de la confluencia del río Don Guillermo a una cota de 65 m.s.n.m. y a 1 Km de la desembocadura del río Las Chinas en el lago del Toro. Cuenta con registros limnigráficos sólo a partir de Octubre de 1981. El río de Las Chinas dreña un sector importante de la Sierra Baguales y en contraste con los otros ríos mencionados, no presenta influencia de glaciares.

e) Río Paine en Salto Chico

Está ubicada aguas abajo del lago Pehoé, a una cota de 45 m.s.n.m., y fue controlada por ENDESA entre el año 1964 y 1967. Las estadísticas de caudales de esta estación fueron obtenidas a partir de los niveles registrados ese período en el lago Pehoé.

f) Lago del Toro en Estancia Paine

Está ubicada a una cota de 45 m.s.n.m. y cuenta con registros de niveles limnimétricos desde el año 1970 hasta el año 1976, con una frecuencia de control de una medición diaria.

Además, debido a las últimas crecidas producidas en el río Paine, CONAF ha reiniciado los controles desde el mes de Diciembre de 1982.

g) Lago Pehoé en Pudeto

Esta ubicado a una cota de 55 m.s.n.m. Cuenta con registros

de niveles limnimétricos entre los años 1964 y 1967 desarrollados por ENDESA. Al igual que en el lago del Toro, CONAF reinició los controles en Diciembre de 1982.

h) Lago Sarmiento en Baño Viejo

Existen estadísticas de niveles limnimétricos entre los años 1970 y 1974.

Esta estación está a una cota de 55 m.s.n.m.

4.2 Estadísticas Meteorológicas

En general la información meteorológica del área es escasa y además está referida a las zonas planas, cercanas a los lagos, pero no a la situación meteorológica existente en el plateau del Hielo Patagónico Sur.

A continuación se hace una reseña de las estaciones meteorológicas que han tenido registros en la zona.

a) Torres del Paine

Esta estación fue instalada por la DGA en Marzo de 1982 y está ubicada en las cercanías del lago del Toro. Ella ha sido observada por personal de CONAF, lo que ha permitido mantener un registro continuo desde su instalación hasta la fecha. Los parámetros medidos son: precipitación, temperatura (máxima y mínima), evaporación, velocidad del viento, humedad y estado del tiempo. Con anterioridad la

DGA había instalado la estación Estancia Río Paine, que tiene registros desde Mayo de 1970 hasta Agosto de 1977. Esa estación se encontraba muy cercana a la actual, lo que permite completar la información que se obtiene en la actualidad.

b) Cerro Guido

Esta estación es del tipo meteorológico y fue instalada por la D.M.CH. en el año 1961 a una cota de 815 m.s.n.m., ubicada hacia el sur-oriente de la zona de estudio. En Febrero de 1980 se traspasó a la DGA continuando solamente con las mediciones pluviométricas. Se cuenta con antecedentes a partir del año 1980.

c) Sarmiento en Baño Viejo

Esta estación cuenta con registros pluviométricos controlados por la DGA desde el año 1966 hasta 1977, año en que fue suspendida. Se ubica en las vecindades del lago Sarmiento.

d) Pehoé en Pudeto

Fue instalada por la DGA en las márgenes del lago Pehoé el año 1964 y tiene registros pluviométricos sólo hasta 1967, año en que fue suspendida.

e) Estancia Lago Grey

Esta estación fue instalada por ENDESA en el año 1964 y

cuenta con registros pluviométricos desde Abril de ese año hasta Febrero de 1968, cuando se suspendió la estación. Está ubicada a una cota de 40 m.s.n.m., en las cercanías del Lago Grey.

En el cuadro N° 4.3 y en la figura N° 4.2 se entrega la ubicación y características de las estaciones meteorológicas.

CUADRO N° 4.3

NOMINA DE ESTACIONES METEOROLOGICAS HOYA DEL RIO SERRANO

ESTACION	TIPO	INST.	ALTURA	LATITUD	LONGITUD
			m.s.n.m.		
1. Torres del Paine	MT.	DGA	46	51°11'S	72°58'W
2. Cerro Guido	MT.	DMCH	815	50°55'S	72°38'W
3. Sarmiento en Baño Viejo	PV	DGA	55	51°00'S	72°38'W
4. Pehoé en Pudeto	PV	DGA	55	51°05'S	73°00'W
5. Estancia Lago Grey	PV	END	40	51°10'S	73°03'W

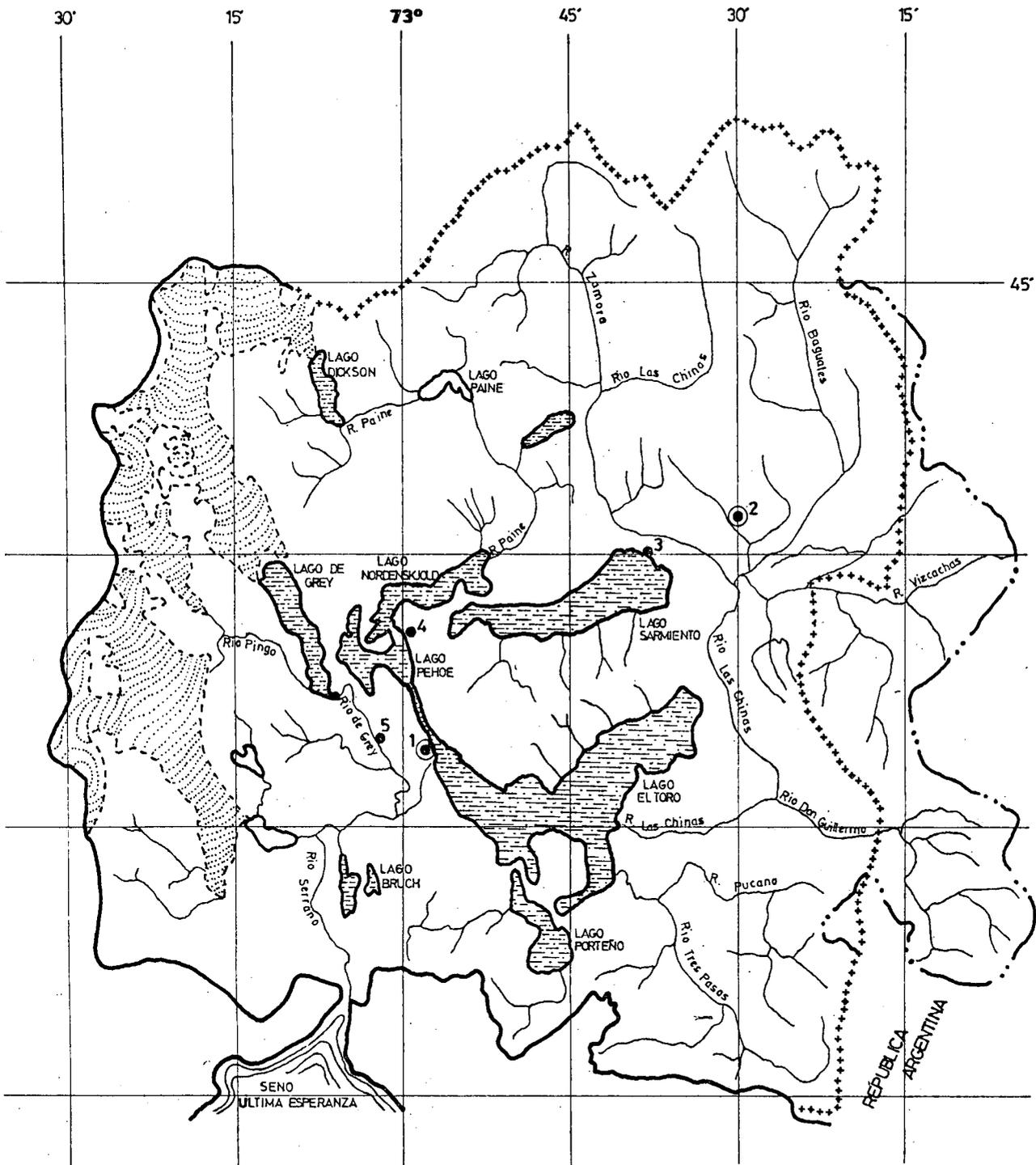
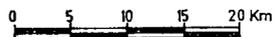
MT = Meteorológica

PV = Pluviométrica

DGA : Dirección General de Aguas

DMCH : Dirección Meteorológica de Chile

END : Endesa



ESTACIONES METEOROLOGICAS

⊙ Estación Meteorológica ● Estación Pluviométrica

- 1.- Torres del Paine
- 2.- Cerro Guido
- 3.- Sarmiento en Baño Viejo
- 4.- Pehoe en Pudeto
- 5.- Estancia Lago Grey

FIG. N°4.2

5. ANALISIS DE ANTECEDENTES HISTORICOS

Con el propósito de identificar las causas que pudieran explicar las crecidas del río Paine, se estimó necesario elaborar el mayor número de antecedentes históricos cuantitativos relativos al clima, al nivel de los lagos y al caudal de los ríos de la zona. De este modo la información estadística podría señalar:

a) Si los fenómenos ocurridos durante los años 1982 y 1983 tenían antecedentes conocidos y

b) identificar los factores especiales que, presentándose en esos años, pudieran ser útiles para explicar los fenómenos.

Lamentablemente de acuerdo a la información de la zona, entregada en el capítulo 4, los registros de cierta longitud disponibles se limitan a las series de caudales del río Serrano y de niveles del lago del Toro, los que pudieron ser reconstruídos para el período comprendido entre los años 1964 y 1983, con cuatro años completos sin información correspondientes a los años 1969, 1977, 1978 y 1979.

Para usar las estadísticas del río Serrano y del lago del Toro, fue necesario complementar la información de ambas, para lo cual se establecieron en los períodos con estadísticas comunes correlaciones gráficas entre el nivel del lago y los caudales en el río.

Hay que señalar que los registros de estas estaciones son de distintas fuentes. No existen antecedentes para verificar la consistencia de las estadísticas, sin embargo la inspección de las curvas de

descarga y de la información de terreno, permite suponer que no se presentan problemas de ese tipo. En la figura N° 5.1 se entrega la correlación entre los niveles del lago del Toro y los caudales del río Serrano, utilizada en el relleno de la información. Las estadísticas mensuales y estacionales del río Serrano se entregan en el cuadro N° 5.1.

En la figura N° 5.2 se ha graficado la serie de caudales estacionales y en la figura N° 5.3 junto al rango máximo de variación de los caudales mensuales se han dispuesto los datos correspondientes a los años 1981-82 y 1982-83.

Del análisis de la serie de datos de caudales se puede obtener las siguientes conclusiones:

i) En los registros del río Serrano y del lago del Toro se puede observar que desde que se iniciaron los controles no se ha presentado una situación similar a la de los años 1982 y 1983. Solamente en el año 1972 se registraron valores de caudales máximos comparables con los últimos registrados en el río Serrano, pero ellos indudablemente fueron originados por las precipitaciones de dicho año, las que en Abril alcanzaron los 215 mm. En este aspecto, el testimonio de los pobladores de la zona coincide en señalar que no se han presentado crecidas de esta naturaleza anteriormente.

ii) Los años 1981-1982 y 1982-83 muestran en general menores recursos hídricos que lo habitual, sin considerar las crecidas. En especial, al observar la información mensual se comprueba que el período Agosto-Octubre de 1982 y Octubre-Noviembre de 1981 (antes de esa fecha no existen registros), presentan los menores caudales registrados para esos meses del año durante todo el período estadístico. Esto

CAUDAL EN RIO SERRANO ANTES JUNTA RIO GREY
VS.
NIVELES DEL LAGO DEL TORO

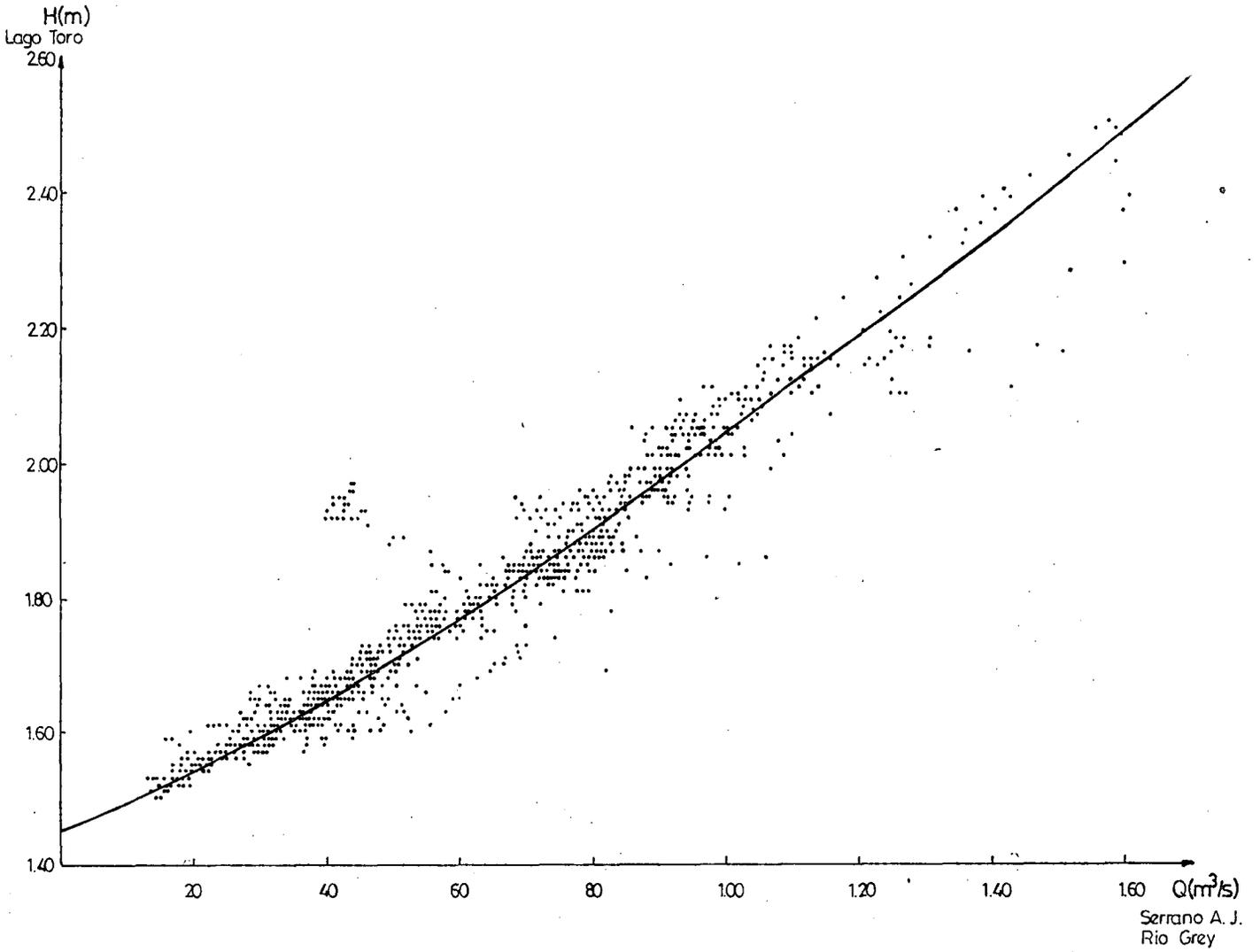


FIG. N° 5.1

C U A D R O N° 5.1 Río Serrano antes Jta. río Grey. Caudales Medios Mensuales y Estacionales (m3/s).

AÑO	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	EN	FE	MA	QINV	QVER	QANUAL
1964-65		33.0	25.7	17.4	32.5	28.5	51.0	60.1	46.5	71.9	75.3	58.0	33.7*	60.5	47.1*
65	56.3	71.9	51.2	31.0	27.5	44.5	64.4	96.8	80.4	88.3	68.0	85.4	47.1	80.6	63.9
66	77.2	136	103	62.2	54.5	70.8	70.8	87.0	84.0	78.3	86.1	75.0	83.9	80.2	82.1
67	86.4	80.9	54.9	31.6	29.9	35.3	50.6	96.4	91.0	77.2	72.4	52.1	53.2	73.3	63.3
68	41.4	54.0	44.3	42.6	51.3	61.4	48.5	53.6	82.5	75.2	69.5		49.2	66.4*	57.8*
70		87.5	73.4	43.8	30.7	42.2	67.6	89.9	(82.3)	(65.5)	(64.1)	(82.5)	55.5	75.3	66.3
71	(74.8)	(36.9)	(22.1)	(25.3)	(88.8)	(88.0)	(124)	(134)	120	117	110	73.2	56.0	113	84.5
72	97.4	103.4	34.4	22.8	17.4	31.9	47.6	80.6	(95.3)	(78.1)	(69.7)	(70.2)	51.2	73.6	62.4
73	(61.9)	30.6	52.0	(44.0)	(43.6)	(52.9)	(83.4)	(81.9)	55.7	55.1	49.7	40.3	47.5	61.0	54.3
74	60.6	(57.6)	(35.0)	(25.3)			(74.2)	99.0	71.8	(85.7)	(90.0)	(78.6)	44.6*	83.1	63.9*
75	(51.5)	23.7	(16.2)	(11.6)	(14.6)	(30.2)				(81.3)	82.2	71.2	24.6	78.7*	51.7*
76	48.7	34.0	30.2	(21.6)	(24.6)	(70.9)	(108)			(97.6)	(85.1)	(55.5)	38.3	85.5*	61.9*
77	(59.4)														
78															
79															
80			26.9	34.2	32.2	62.8	60.2	63.9		61.9	77.6	83.5	47.2*	71.3*	59.3*
81	43.6	29.9					32.6	50.8	50.4	59.1	126	70.3		64.9	52.2*
82	58.2	58.2	27.6	12.7	10.5	13.8	23.1	58.4	77.6	146	94.4	152	30.2	91.9	61.1

() : Caudal rellenado a partir de estadísticas limnimétricas del Lago del Toro.

* : Años incompletos. Para calcular el caudal medio anual o estacional en años incompletos se estimaron los caudales medios mensuales sin información como el caudal promedio para ese mes, sin considerar los años 1981-82 y 1982-83.

CAUDALES MEDIOS INVIERNO Y VERANO RIO SERRANO

INVIERNO : ABRIL - SEPTIEMBRE
VERANO : OCTUBRE - MARZO

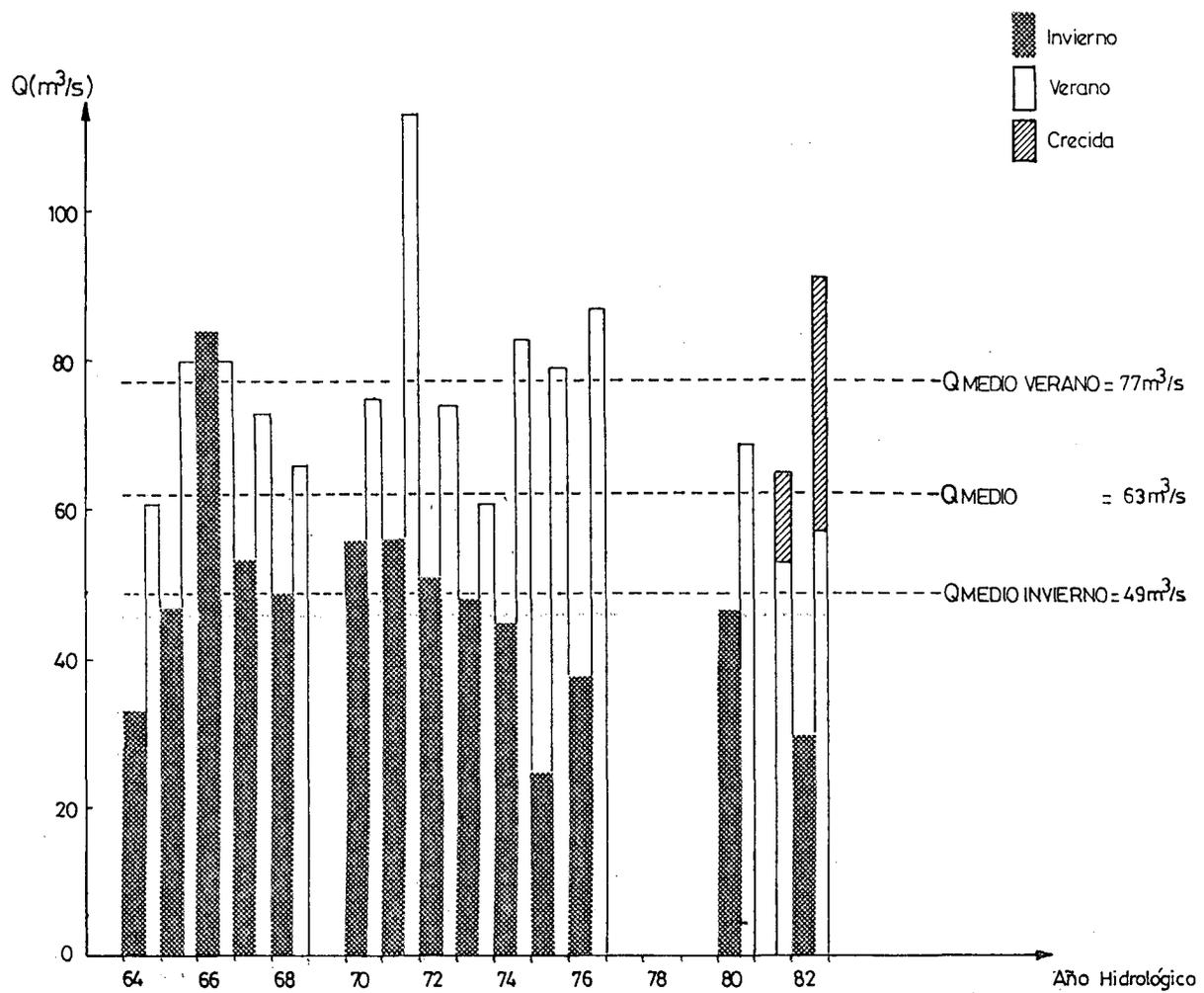


FIG. Nº 5.2

RIO SERRANO. CAUDALES MENSUALES
 MEDIOS Y EXTREMOS

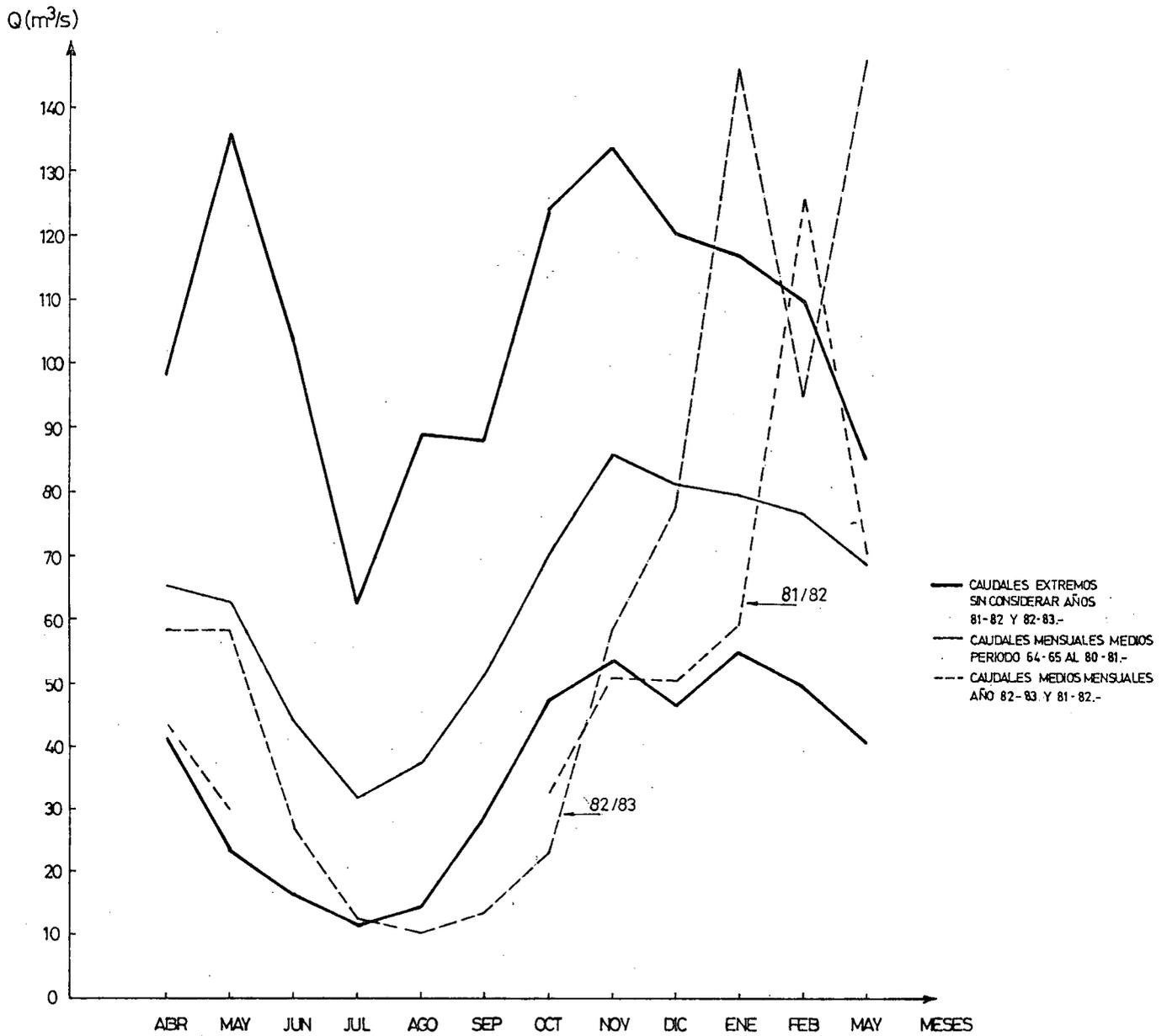


FIG. Nº 5.3

pudiera deberse a una menor precipitación durante los últimos períodos de invierno. Aún cuando en la zona las estadísticas pluviométricas están muy interrumpidas, se puede aceptar la validez de la interpretación anterior, si se considera que entre Junio y Septiembre de 1982 se registraron en Torres del Paine 171.8 mm de lluvia, lo que equivale sólo a un 58% de la precipitación promedio para esos meses obtenida durante un período de 6 años. El testimonio de pobladores de la zona es coincidente en destacar la escasa precipitación del período invernal de 1982.

6. EVALUACION DE LA ONDA DE CRECIDA EN EL RIO PAINE

Para evaluar la onda de crecida a la entrada del lago Dickson es necesario efectuar los siguientes pasos previos:

- a) Calcular los caudales durante el período de crecida en la estación fluviométrica del río Paine en Parque Nacional.
- b) Deducir el efecto regulador de los lagos Paine y Dickson sobre la onda de crecida y
- c) Descontar de la onda de crecida, los caudales que habría presentado el río Paine normalmente, de modo de dejar exclusivamente el hidrograma de la crecida no explicada.

A continuación se entrega detalladamente cada uno de estos pasos.

- a) Cálculo de las crecidas en la estación fluviométrica.

En este aspecto, la mayor dificultad radica en la ausencia de mediciones directas de caudales con magnitudes comparables a las del caudal máximo. El gasto máximo aforado alcanza a 78 m³/s, con una altura limnimétrica de 2.03 m, en circunstancias que la altura máxima del registro es de 3.88m. Para solucionar esta dificultad con una precisión razonable, se efectuaron 3 determinaciones independientes:

i) Se extrapoló la curva de descarga en la estación fluviométrica por el procedimiento basado en la fórmula de Manning (anexo I).

ii) Se determinó el caudal máximo de la crecida de marzo/83 mediante el método área - pendiente, para lo cual personal de la zona debió efectuar mediciones topográficas de la sección inundada por la crecida (anexo II.).

iii) Se estimó un balance hidrológico del período de verano de 1983 en el sector limitado aguas arriba por la estación fluviométrica del río Paine y considerando como cierre la estación fluviométrica del río Serrano antes junta río Grey. En este balance se debieron considerar todos los aportes a los lagos Nordenskjöld, Pehóe y del Toro, y las pérdidas totales del sistema. En el anexo III se entrega el análisis detallado de este punto.

Los resultados obtenidos por los 3 procedimientos son perfectamente compatibles entre sí, considerando los errores que pueden presentar cada uno de ellos. Es necesario señalar que en la crecida de Marzo/83 fue necesario agregar el caudal que pasó por el costado de la sección de control. Para ello se estimó el máximo caudal no considerado en 33 m³/s y de acuerdo a un análisis detallado del hidrograma se supuso un incremento proporcional entre los días 6 y 11 de Marzo, en la rama ascendente, y entre el 12 y el 21 en la rama descendente.

El caudal máximo que se obtuvo para la crecida de Marzo/83 fue de 400 m³/s. La estadística de caudales medios diarios de las 3 crecidas analizadas se entrega en el cuadro N° 6.1

CUADRO N° 6.1 RIO PAINE EN PARQUE NACIONAL
Caudales Medios Diarios Durante las Crecidas

ENERO 82		DICIEMBRE 82		MARZO 83	
FECHA	Q (m3/s)	FECHA	Q (m3/s)	FECHA	Q (m3/s)
				26/2	51.6
				27	55.2
				28	68.2
18/1	35.5			1/3	85
19	42.7	16/12	30.3	2	127
20	55.7	17	34.3	3	152
21	75.2	18	45.2	4	184
22	110	19	69.2	5	210
23	156	20	126	6	234
24	204	21	194	7	252
25	253	22	268	8	288
26	303	23	330	9	328
27	352	24	370	10	369
28	381	25	381	11	387
29	(353)	26	374	12	371
30	(320)	27	340	13	335
31	(260)	28	292	14	296
1/2	(190)	29	230	15	252
2	(140)	30	178	16	219
3	(100)	31	154	17	186
4	68.2	1/1/83	133	18	172
		2	120	19	138
				20	114

() : Caudal rellenado

b) Efecto regulador de los lagos

Para determinar la onda de crecida a la entrada de los lagos conociendo la onda de salida, se usó el método de Goodrich en forma inversa, considerando solamente la regulación en el lago y despreciando la amortiguación de la crecida en el cauce. La aplicación de dicho método exige disponer de una relación entre el caudal a la salida y el volumen almacenado, para lo cual se utilizó el desnivel entre la traza máxima observada en el lago y la existente el día de la visita a terreno, y se supuso que el caudal varía en forma lineal con la altura y que la superficie del lago es constante.

El detalle del cálculo se puede consultar en el anexo IV.

c) Separación del hidrograma debido exclusivamente a las crecidas.

Con este propósito fue posible recurrir al registro estadístico del río Grey, con un régimen hidrológico muy similar. Como se señala en el capítulo 7, es posible determinar una relación lineal entre ambos ríos, con un coeficiente de proporcionalidad de 0.25.

Para evitar la distorsión que pudiera introducir el lago Grey, se calculó el caudal a la entrada de dicho lago siguiendo un procedimiento análogo al aplicado al río Paine. Los detalles de esta corrección se entregan en el anexo IV.

En el cuadro N° 6.2 y en la figura N° 6.1, se presenta finalmente la estadística de caudales determinada para las crecidas a la entrada del lago Dickson. Es necesario señalar que todos los valores que

se incluyen han sido previamente suavizados, para evitar las fluctuaciones que posiblemente introduce la simplificación de los procedimientos.

CUADRO N° 6.2 CAUDALES DE CRECIDA DEL RIO PAINE A LA SALIDA DEL GLACIAR DICKSON

ENERO 82			DICIEMBRE 82			MARZO 83		
Fecha	Hora	Q(m3/s)	Fecha	Hora	Q(m3/s)	Fecha	Hora	Q (m3/s)
						26/2	12	13
						26/2	24	20
						27/2	12	29
						27/2	24	40
18/1	12	0				28/2	12	54
18/1	24	4				28/2	24	67
19/1	12	11				01/3	12	75
19/1	24	30				01/3	24	83
20/1	12	55				02/3	12	99
20/1	24	77				02/3	24	126
21/1	12	96	16/12	12	0	03/3	12	125
21/1	24	118	16/12	24	11	03/3	24	131
22/1	12	134	17/12	12	28	04/3	12	138
22/1	24	160	17/12	24	57	04/3	24	151
23/1	12	188	18/12	12	86	05/3	12	170
23/1	24	215	18/12	24	121	05/3	24	191
24/1	12	242	19/12	12	163	06/3	12	216
24/1	24	269	19/12	24	209	06/3	24	245
25/1	12	295	20/12	12	253	07/3	12	274
25/1	24	314	20/12	24	285	07/3	24	299
26/1	12	328	21/12	12	309	08/3	12	316
26/1	24	344	21/12	24	324	08/3	24	329
27/1	12	357	22/12	12	331	09/3	12	338
27/1	24	s/d	22/12	24	331	09/3	24	332
28/1	12	s/d	23/12	12	329	10/3	12	320
28/1	24	s/d	23/12	24	322	10/3	24	304
29/1	12	s/d	24/12	12	308	11/3	12	285
29/1	24	s/d	24/12	24	289	11/3	24	264
30/1	12	s/d	25/12	12	264	12/3	12	242
30/1	24	s/d	25/12	24	234	12/3	24	218
31/1	12	s/d	26/12	12	201	13/3	12	191
31/1	24	s/d	26/12	24	166	13/3	24	166
01/2	12	s/d	27/12	12	132	14/3	12	144
01/2	24	s/d	27/12	24	103	14/3	24	127
02/2	12	s/d	28/12	12	80	15/3	12	116
02/2	24	s/d	28/12	24	66	15/3	24	109
03/2	12	12	29/12	12	55	16/3	12	103
03/2	24	7	29/12	24	46	16/3	24	90
04/2	12	1	30/12	12	38	17/3	12	64
04/2	24	0	30/12	24	31	17/3	24	44
			31/12	12	26	18/3	12	41
			31/12	24	20	18/3	24	39
			1	12	13	19/3	12	28
			1	24	10	19/3	24	16
			2	12	9	20/3	12	4
			2	24	9	20/3	24	

CRECIDAS RIO PAINE ANTES LAGO DICKSON

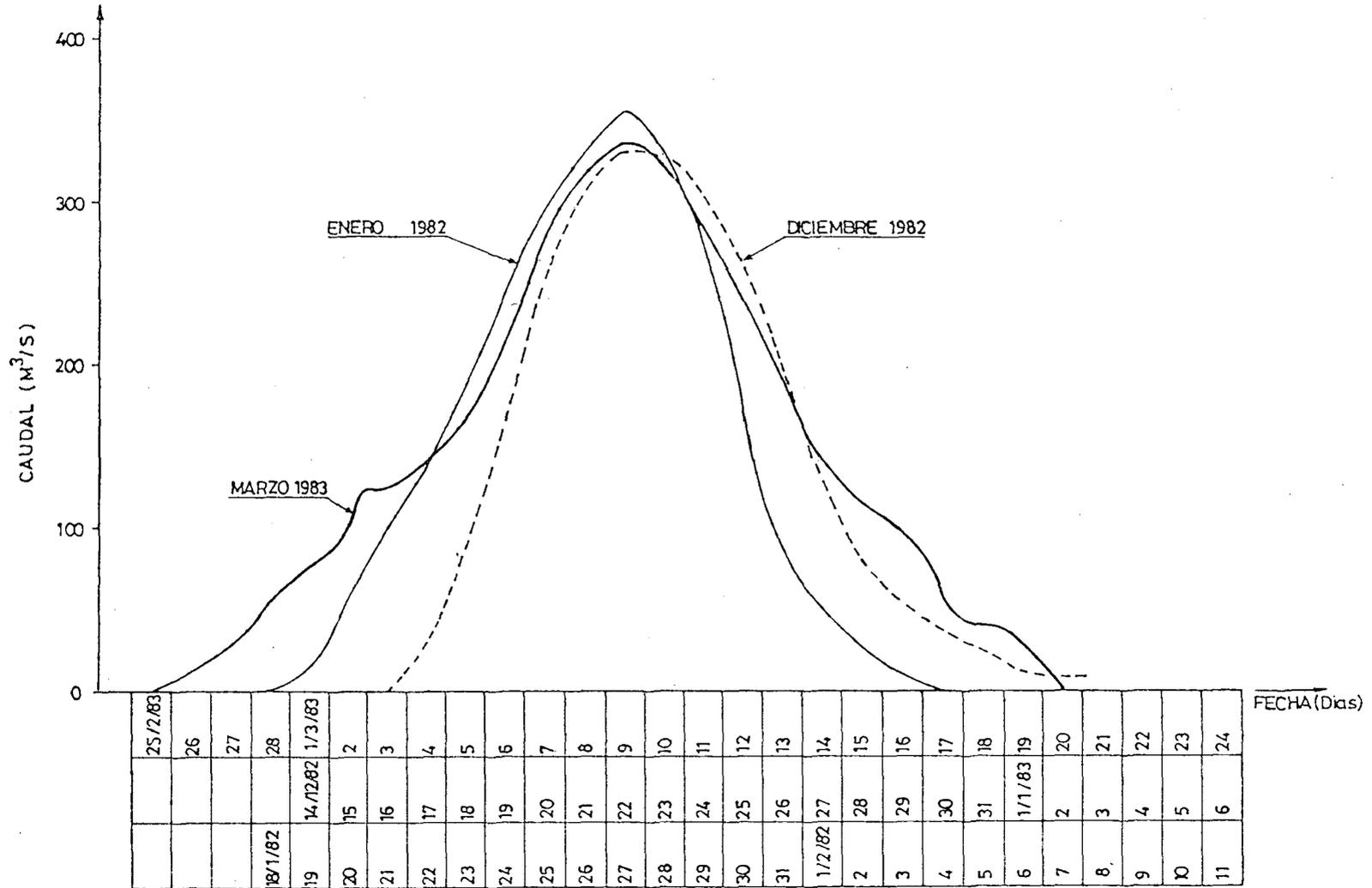


FIG. Nº 6.1

7. DETERMINACION DE LAS CAUSAS DE LAS CRECIDAS

7.1 Análisis de causas

En primer lugar se determinará si la crecida del río Paine corresponde a un incremento extraordinario de la fusión por causas climáticas. Considerando que una crecida de ese origen habría afectado en igual forma a otros ríos de la zona, esta hipótesis pudo ser evaluada recurriendo a los registros del río Grey. El río Grey, como se ha señalado, drena un sector del HPS colindante con el correspondiente al río Paine y en ciertos períodos ambos hidrogramas presentan una excelente correlación, lo cual permitió utilizar como medio de comparación la curva doble-acumulada de los caudales. Del análisis de la curva doble-acumulada, que se entrega en la figura N° 7.1, se concluye que:

i) Normalmente los caudales de ambos ríos mantienen entre sí la relación:

$$Q \text{ R Paine} = 0.25 \quad Q \text{ R Grey}$$

ii) El origen de las crecidas no se encuentra en un aumento del deshielo por razones climáticas, ya que en esos períodos la curva-doble acumulada experimenta un fuerte quiebre hacia mayores caudales en el río Paine.

iii) Se puede estimar que, en relación al escurrimiento más frecuente de los años con registro, las crecidas son provocadas por un volumen de agua importado a la cuenca. Es decir, se trata de una captura de recursos de agua que han drenado ultimamente hacia cuencas colindantes. Esto se comprueba por el desplazamiento paralelo en so-

CURVA DOBLE ACUMULADA
RIO PAINE VS RIO GREY

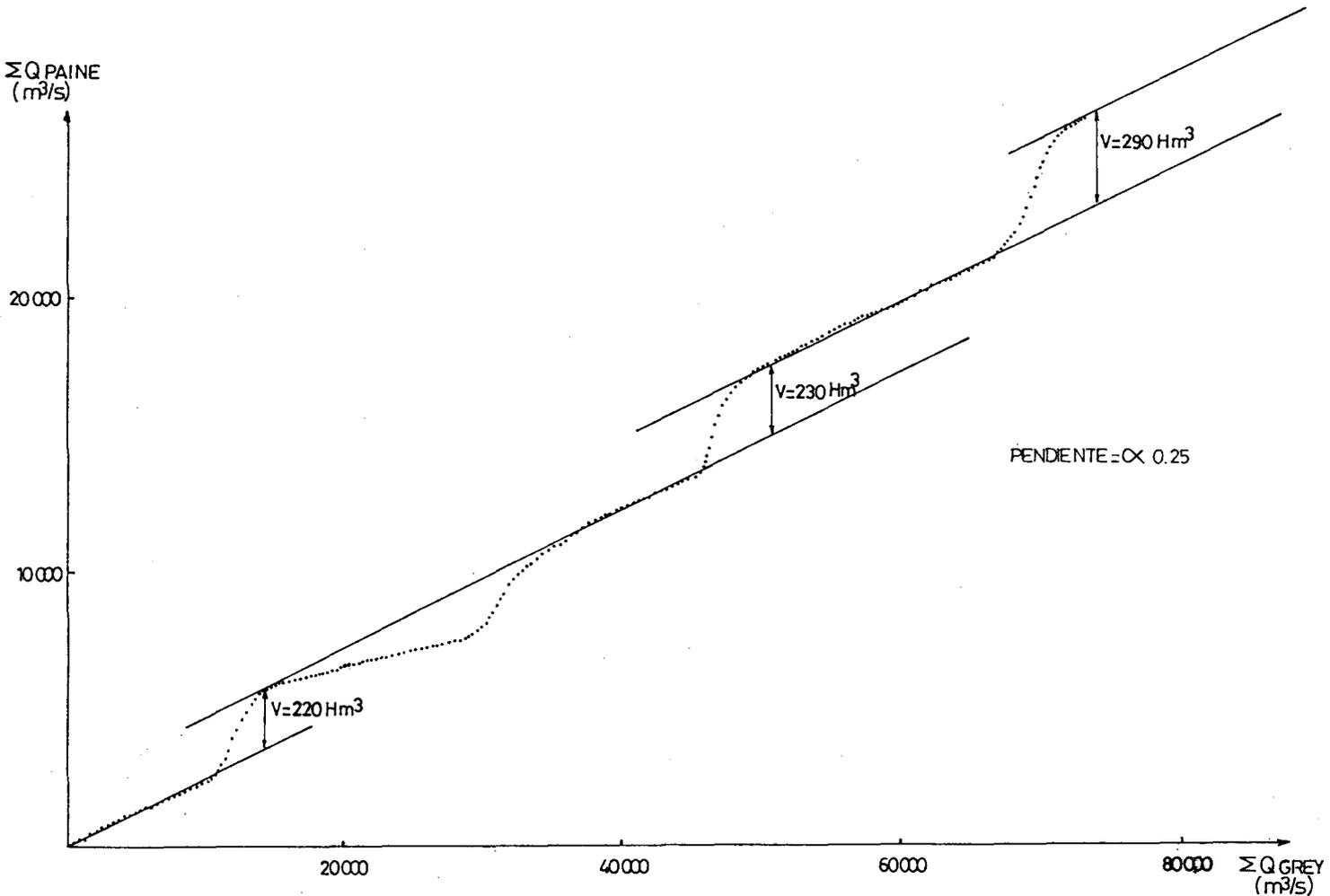


FIG. Nº 7.1

un sentido de la curva doble-acumulada.

iv] La curva doble-acumulada muestra una cuarta crecida del río Paine, menor que las otras 3 estudiadas, durante el mes de Abril de 1982. A diferencia de las otras, esta crecida habría sido provocada por la retención y posterior vaciamiento de un volumen de agua en la propia cuenca del río Paine. Lo anterior se comprueba por la existencia de un quiebre hacia caudales menores del río Paine, inmediatamente antes de la crecida, y de un segundo quiebre para restituir la tendencia general de la curva doble-acumulada.

En la figura N° 7.2 se han dibujado ambos hidrogramas sombreado los caudales correspondientes a las crecidas, para lo cual se usó la relación establecida entre los 2 ríos.

En forma complementaria al análisis anterior, se entrega la información de precipitaciones, temperaturas y humedades (figuras N°s 7.3, 7.4 y 7.5) en la estación Meteorológica de Torres del Paine durante el verano 1982/83, donde no se aprecia un cambio climático relacionado con los días de crecida.

En relación a la alternativa de una fusión en gran escala de origen geotérmico, hay que señalar que el volumen de agua de fusión involucrado por las 3 crecidas, que alcanza a 740×10^6 m³ en un período de tiempo muy breve, haría fácilmente detectable la existencia de un foco de esa naturaleza, lo cual no ha sucedido. De modo que esa hipótesis puede ser desechada.

Por las razones anteriores, la explicación del fenómeno debe buscarse en el almacenamiento de un gran volumen de agua que se vacía en forma violenta. A continuación se analiza, en base a antecedentes

HIDROGRAMAS RIOS PAINE Y GREY

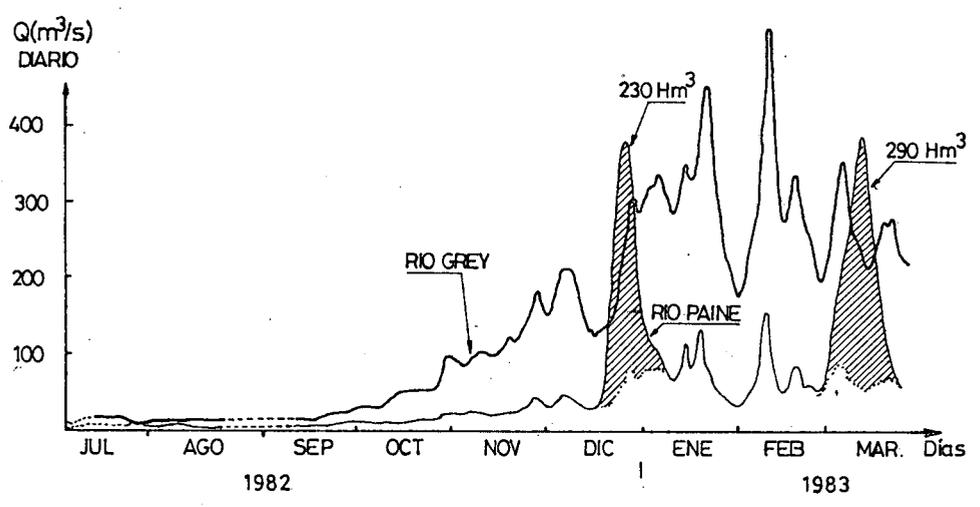
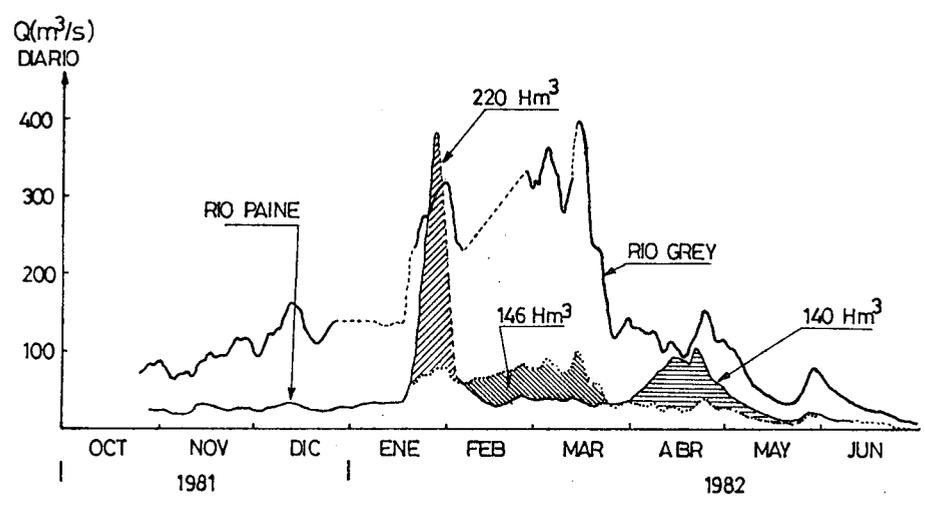


FIG. Nº 7.2

ESTACION TORRES DEL PAINE PRECIPITACIONES

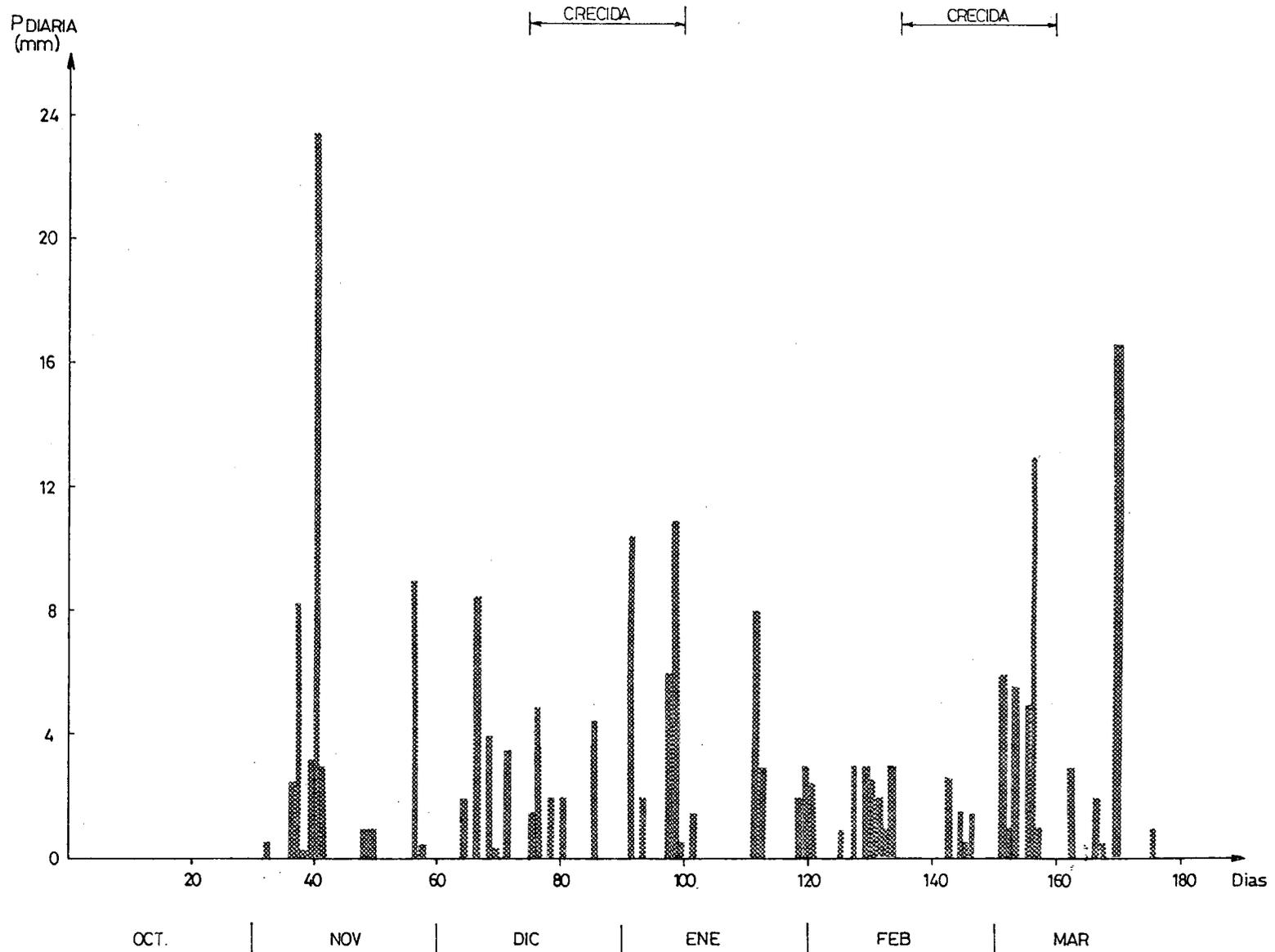


FIG. 7.3

ESTACION TORRES DEL PAINE TEMPERATURAS

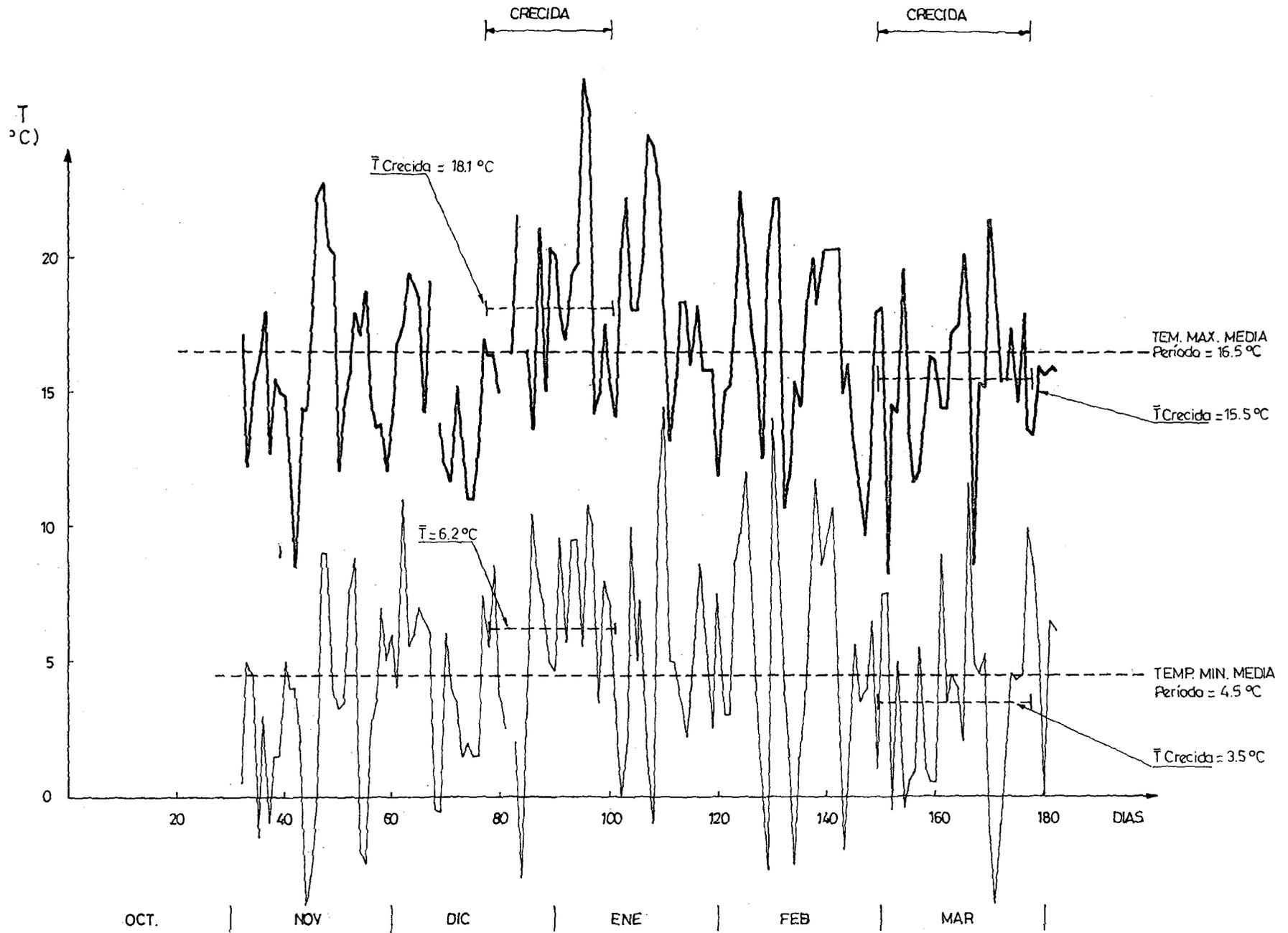


FIG. 7.4

ESTACION TORRES DEL PAINE

HUMEDADES RELATIVAS

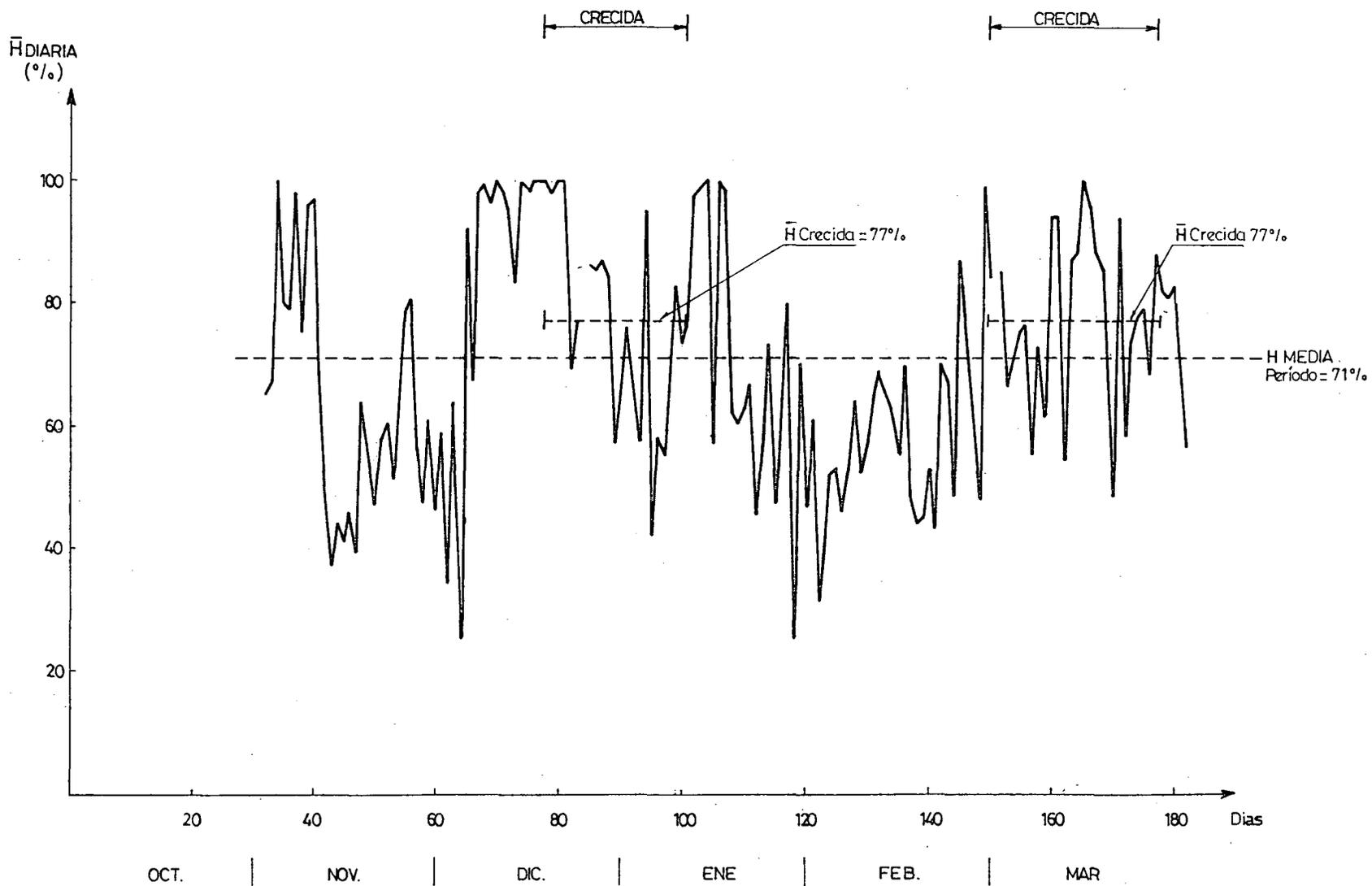


FIG. 7.5

de terreno la posible ubicación de dicho almacenamiento.

7.2 Identificación del lugar de almacenamiento

Los antecedentes obtenidos de la visita a terreno, las exploraciones hechas con anterioridad (González, 1983) y diversos testimonios de funcionarios de CONAF, permiten fundamentar las siguientes conclusiones al respecto:

i) No es posible que el lugar de represamiento sea el propio lago Dickson, por una acción de bloqueo de los témpanos. Esta hipótesis se puede descartar ya que las trazas de la inundación son absolutamente incompatibles con el volumen de agua involucrado en las crecidas. El mismo hecho se verifica al observar el hidrograma de entrada al lago Dickson (capítulo 6), el cual muestra una crecida entrando al lago.

ii) Se ha identificado un lugar de almacenamiento en la confluencia de una lengua secundaria del glaciar Dickson que fluye hacia el este, con una lengua vecina del glaciar Frías. En ese lugar, en Febrero de 1983, se había detectado la formación de un lago sobreglacial, a través de las trazas definidas por bloques de hielo dejados a considerable altura sobre el nivel del glaciar. En la visita de Marzo de 1983 se pudieron fotografiar extensas zonas cubiertas de agua entre bloques de hielo distribuidos en forma caótica. Además se observaron 2 hechos que permiten inferir la existencia de una comunicación sub-glacial entre el lago sobreglacial formado y el lago Dickson. Ellos son la presencia en el posible recorrido del túnel de sectores con grietas circulares, características del hundimiento de grandes cavernas glaciares, y el notable descenso del nivel del hielo en las proximidades del borde oriente del frente glaciar, descenso que no puede ser explicado por la fusión superficial del período y que debe

corresponder a la fluencia del hielo hacia el túnel. En las fotografías que se incluyen en el anexo V del presente trabajo, se pueden comprobar los hechos anteriores.

De acuerdo a estas conclusiones y a los antecedentes entregados en el capítulo 3,4 y 5, las crecidas del río Paine se habrían producido de la siguiente forma:

i) El drenaje hacia la laguna Frías de una lengua secundaria del glaciar Dickson y del glaciar Frías se habría interrumpido durante el año 1982. Ello posiblemente debido a una de las siguientes causas:

- Deslizamiento de laderas
- Congelamiento del conducto de drenaje por inviernos muy rigurosos y con una acumulación de nieve muy escasa, lo que favorece la penetración de una onda de frío al no existir el manto nival de protección.

ii) Durante el período de verano el deshielo fue aumentando paulatinamente el volumen almacenado, hasta que la presión del agua abrió un conducto hacia el glaciar. Existen 2 fenómenos que pudieran explicar la apertura del conducto: uno es la existencia de una sub-presión hidrostática capaz de hacer flotar una porción del hielo y el otro sería la fluencia del hielo por la diferencia de presión hielo-agua. Ambos mecanismos han sido estudiados y en diversas ocasiones se han señalado como la causa directa que produjo la comunicación inicial.

iii) Una vez que se estableció el flujo se generó la crecida.

Los procesos físicos que intervienen se presentan en la forma propuesta por Nye (1976) en el capítulo 8.

iv) Finalmente la presión del hielo en el túnel, favorecida por la disminución de presión en el agua, hace fluir el hielo, bloqueándose nuevamente el conducto de comunicación.

8. ANALISIS DEL HIDROGRAMA DE LAS CRECIDAS

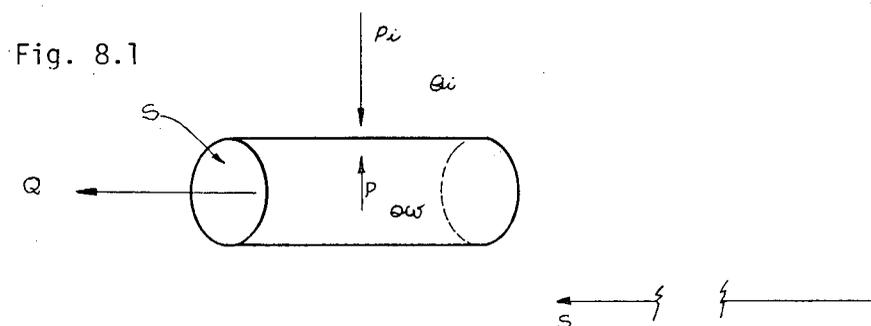
8.1 Ecuaciones del vaciamiento de una represa de hielo

Desde un punto de vista práctico, resulta de mucha importancia estudiar las relaciones físicas que determinan la forma del hidrograma, y de ese modo evaluar las posibilidades de que se presenten en el futuro crecidas aún más violentas. Las relaciones físicas que rigen el vaciamiento a través de un túnel de una represa de hielo en un glaciar temperado fueron planteadas por Nye (1976), quién las aplicó con éxito al caso del vaciamiento del lago subglacial de Grímsvötn (Islandia). Nye dedujo las siguientes ecuaciones (la simbología se incluye al final del capítulo) (Figura N° 8.1)

$$\text{Geometría y flujo del hielo: } \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{m}{\rho_i} - k_e S (p_i - p)^n \quad (p < p_i) \quad (1)$$

$$\text{Continuidad: } \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{m}{\rho_w} - \frac{\partial Q}{\partial s} \quad (2)$$

$$\text{Hidráulica: } \rho_w g_s - \frac{\partial p}{\partial s} = \frac{N Q^2}{s^{8/3}} \quad (3)$$



$$\text{con: } N = \left(\frac{S}{R^2} \right)^{2/3} \rho_w g n'^2$$

Conservación de la energía:

$$Q \left(\rho_w g_s - \frac{\partial p}{\partial s} \right) - \rho_w S \sigma \frac{d\theta_w}{dt} = m L + m \sigma (\theta_w - \theta_i) \quad (4)$$

Transferencia de calor:

$$0.205 \left(\frac{2Q}{\eta \pi^{1/2} S^{1/2}} \right)^{0.8} K (\theta_w - \theta_i) = m L + m \sigma (\theta_w - \theta_i) \quad (5)$$

Las ecuaciones están referidas a un eje s , a lo largo del túnel. Conviene destacar que todas las variables son función de la distancia s y del tiempo t .

La ecuación (1) señala que la variación de la sección del túnel es igual a su aumento debido a la tasa de fusión m menos el estrechamiento por deformación plástica según la expresión de Nye (1953), el cual aplicó a un conducto circular la ley de fluencia de Glen. La ecuación (3) corresponde a la aplicación de la fórmula de Gauckler - Manning - Strickler para flujos turbulentos en un conducto cerrado.

En la ecuación de conservación de la energía se considera el trabajo mecánico efectuado por el desplazamiento del agua, el cambio de energía interna por aumento de temperatura del agua, y la energía consumida en fundir el hielo y elevar la temperatura del agua de fusión. No se considera la energía cinética. En relación al calor de

mandado por la fusión, el término que representa el aumento de temperatura ($\theta_w - \theta_i$) es pequeño y se puede despreciar. Además en casos prácticos se ha visto que el término en $\frac{d\theta_w}{dt}$ también es pequeño, de modo que la ecuación (4) se puede reducir a:

$$Q \left(\rho_w g \Delta - \frac{\partial p}{\partial s} \right) = m L \quad (6)$$

La ecuación (5) corresponde a la solución del problema de transferencia de calor hacia las paredes de un tubo circular. Presenta interés práctico sólo para el cálculo del término $(\theta_w - \theta_i)$.

Existe además una aproximación empírica al problema del vaciamiento de una represa glacial, debida a Clague y Mathews (1973). Ellos han propuesto un ajuste de la rama ascendente de los hidrogramas en base a la siguiente expresión:

$$Q_t = K (V_t)^b \quad (7)$$

Los valores de b varían en la práctica en un rango de 0.5 a 0.9 mientras que K puede presentar valores muy diferentes. Los mismos autores ajustaron además a una muestra de 9 crecidas, la ecuación:

$$Q \text{ máx.} = 75 V \text{ máx.}^{0.67} \quad \text{con } R^2 = 0.96 \quad (8)$$

8.2 Aplicación al río Paine

Las ecuaciones de Nye no han sido resueltas en forma general y sólo se dispone de la solución dada cuando el término de pérdida de carga $(\rho_w g_s - \frac{\partial p}{\partial s})$ es constante. En ese caso el caudal es una función de t^{-4} , tomando el origen de coordenadas en el tiempo en que Q se hace infinito. En el caso del río Paine, obviamente no se puede efectuar la simplificación anterior, razón por la cual se buscó una solución mediante métodos numéricos iterativos.

En primer lugar se supuso que las ecuaciones eran válidas para ciertas condiciones medias de modo de eliminar la dependencia del eje s ; quedando las relaciones como funciones exclusivas de t . Con este propósito se adoptó:

$$\rho_w g_s - \frac{\partial p}{\partial s} = \frac{h \rho_w g}{1} \quad (9)$$

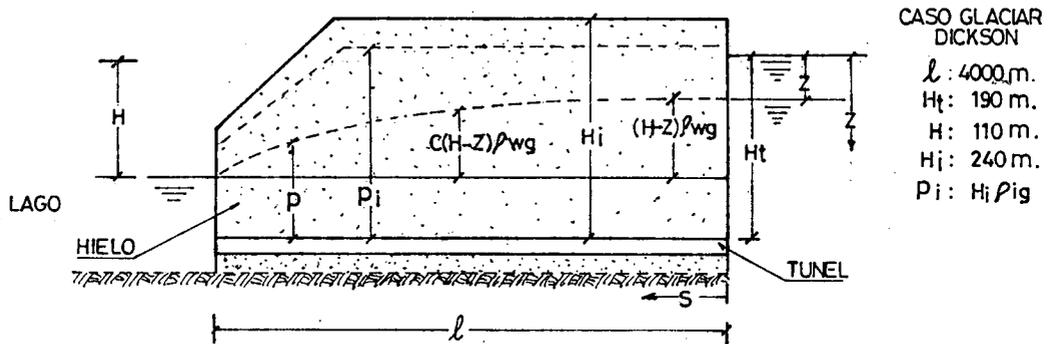
El significado de los términos se entrega en la figura N° 8.2. Además se usó un valor de la presión del agua en el túnel p intermedia entre la presión a la entrada y a la salida, para lo cual se definió un parámetro de ajuste adicional C .

De ese modo se tiene:

$$p = C (H-z) \rho_w g + (Ht - H) \rho_w g \quad (10)$$

También fue necesario agregar la dependencia geométrica entre el volumen de agua que sale y el descenso z del nivel de agua en la entrada del túnel. Por simplicidad se usó una relación del tipo:

CROQUIS GLACIAR DICKSON



CASO GLACIAR DICKSON

- l : 4000 m.
- H_t : 190 m.
- H : 110 m.
- H_i : 240 m.
- P_i : $H_i \rho_i g$

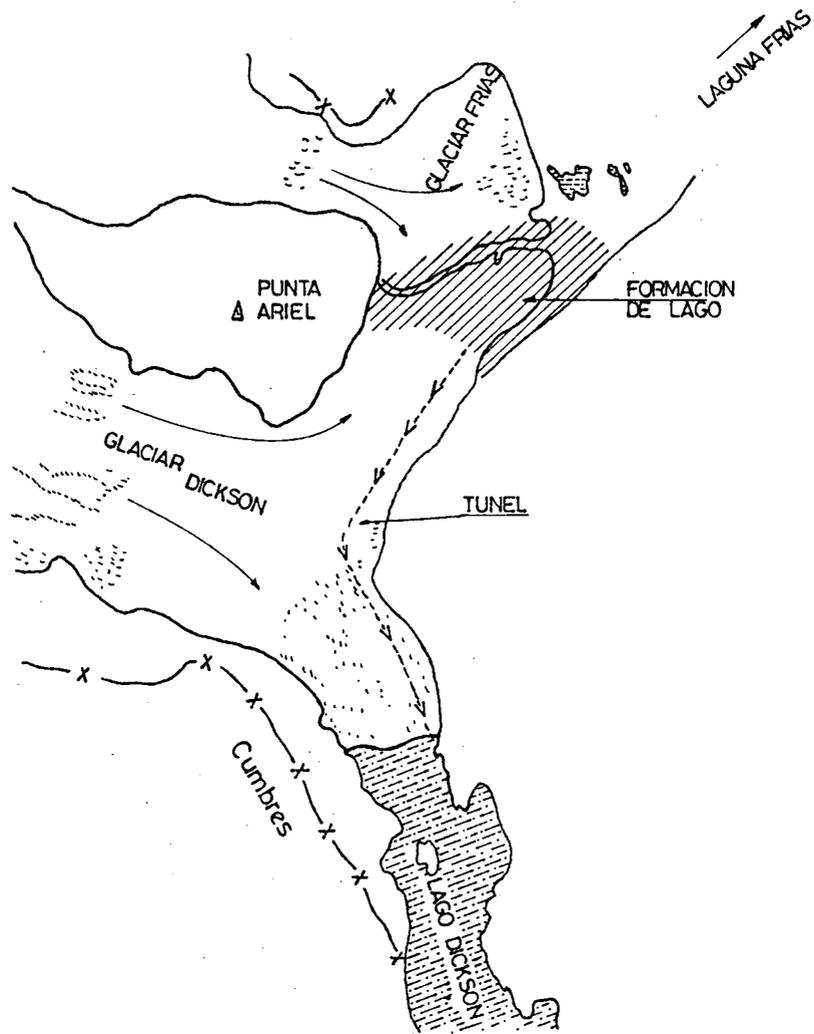


FIG. Nº 8.2

$$Q = A (B - z) \frac{dz}{dt} \quad (11)$$

Utilizando la expresión introducida en (9); y reemplazando las derivadas por sus respectivas expresiones incrementales, las ecuaciones (1), (3), (6) y (11), se reducen a:

$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{m - K_0 S}{\rho_i} (p_i - p)^n \quad (12)$$

$$\frac{(H - z) \rho_w g}{1} = \frac{N Q^2}{S^{8/3}} \quad (13)$$

$$\frac{Q(H - z) \rho_w g}{1} = mL \quad (14)$$

$$Q = A (B - z) \frac{z_2 - z_1}{\Delta t} \quad (15)$$

$$\text{Considerando además que: } S = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

$$z = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

y eliminando m , S , S_2 y z_2 del sistema de ecuaciones se obtiene el sistema reducido:

$$\Delta t (H - z) \rho \omega g Q + 2 S_1 \left(\frac{Q^2 L}{(H-z) g} \right)^{3/8} (2 + \Delta t k_0 (p_i - p)^n) = 0 \quad (16)$$

$$p = C (H-z) + (H_t - H) \quad (17)$$

$$Q = 2A (B-z) \left(\frac{z - z_1}{\Delta t} \right) \quad (18)$$

Este sistema de 3 ecuaciones y 3 incógnitas, Q , z y p , se puede resolver fácilmente mediante procedimientos iterativos computacionales, para incrementos dados de Δt .

En el caso de las crecidas del río Paine, se tiene un conocimiento muy precario del valor de los parámetros que intervienen, por ello los resultados deben interpretarse sólo como una primera tentativa de explicación de los fenómenos. Los antecedentes topográficos disponibles se reducen a mediciones altimétricas de niveles (González, 1983), a la información de fotografía aéreas y al registro de caudales (Peña y Escobar, 1983).

En la figura N° 8.2 se entrega el esquema adoptado con los valores correspondientes al glaciar Dickson.

El cuadro completo de parámetros utilizados en la solución del sistema de ecuaciones para intervalos de 6 horas es el siguiente:

A = 8500 m	H _i = 240 m	C = 0.2
B = 300 m	L = 4000 m	$N = 35 \text{ m}^{-8/3} \text{ Kg}$
H = 110 m	$K_0 = 1.16 \times 10^{-24} \text{ bar}^{-3} \text{ S}^{-1}$	
H _t = 190 m	n = 3	

El espesor del hielo se estimó en 240 m., considerando que los procesos que posiblemente inician el escurrimiento requieren de un espesor aproximadamente de esa magnitud, para que el nivel del lago quede unos 40-50 m debajo de la superficie del hielo en el punto más desfavorable. Se supuso que el túnel estaba a la cota de fondo.

Los valores de K_0 y n se estimaron, de la siguiente expresión dada por Nye (1953) para la tasa de reducción en un conducto circular:

$$\frac{\dot{r}}{r} = \left(\frac{p_i - p}{nA} \right)^n$$

n, A : parámetros

Se usa un valor $n = 3$ y $A = 400 \text{ bar S}^{1/3}$, los cuales están en el rango de lo normalmente aceptado (Rothlisberger, 1972).

Los parámetros A y B que definen la geometría del almacenamiento se estimaron básicamente de acuerdo al volumen de la crecida y a la diferencia de niveles disponibles. Hay que señalar que con la existencia del lago, debe existir un aumento de niveles en sectores muy extensos del glaciar, los que aportan parte significativa del volumen de la crecida, de modo que los parámetros A y B deben considerar también este efecto. El parámetro N , que depende de la forma del túnel y del coeficiente de rugosidad de Manning y el factor C , que permite obtener un valor de p en un punto representativo para los efectos del cálculo de la deformación plástica, fueron determinados en el proceso de calibración. De este modo se obtuvo un valor para N de $35 \text{ m}^{-8/3} \text{ Kg}$, el cual corresponde a un coeficiente de Manning de

$0,03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, si se supone que la sección es circular. Esta cifra está dentro del rango dado en las referencias, el que va de 0.01 a $0,1 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ (Rothlisberger, 1972). Para C la calibración dió un valor de 0,2, el cual resulta razonable si se considera corresponde a un sector próximo a la salida pero donde el espesor del hielo posiblemente no presenta una disminución significativa.

En la figura N° 8.3 se entrega el hidrograma obtenido con los parámetros anteriores, utilizando en la iteración intervalo de tiempo de 6 horas. Hay que señalar que el número de parámetros de las ecuaciones y la incertidumbre acerca de su valor, sólo permite asegurar que el conjunto de parámetros obtenidos constituye una solución factible y razonable, pero que no necesariamente es la única combinación posible. Ello es especialmente válido para el término que representa la fluencia plástica, donde teóricamente distintas combinaciones de K_0 , n , π y p pudieran dar resultados análogos.

Los resultados de la calibración se han usado para evaluar la sensibilidad del hidrograma a cambios en algunos parámetros especialmente significativos. Los resultados de dichos análisis se entregan en la figura N° 8.4 donde se ha graficado el hidrograma resultante:

- a) sin considerar el efecto de fluencia del hielo ($K_0 = 0$).
- b) con el término H/l constante en el tiempo y
- c) con el término H/l igual a 1.2 veces el valor real.

Los gráficos anteriores muestran que:

- La forma básica de los hidrogramas de las crecidas se pueden reproducir adecuadamente con el modelo planteado.

CRECIDAS RIO PAINE ANTES LAGO DICKSON

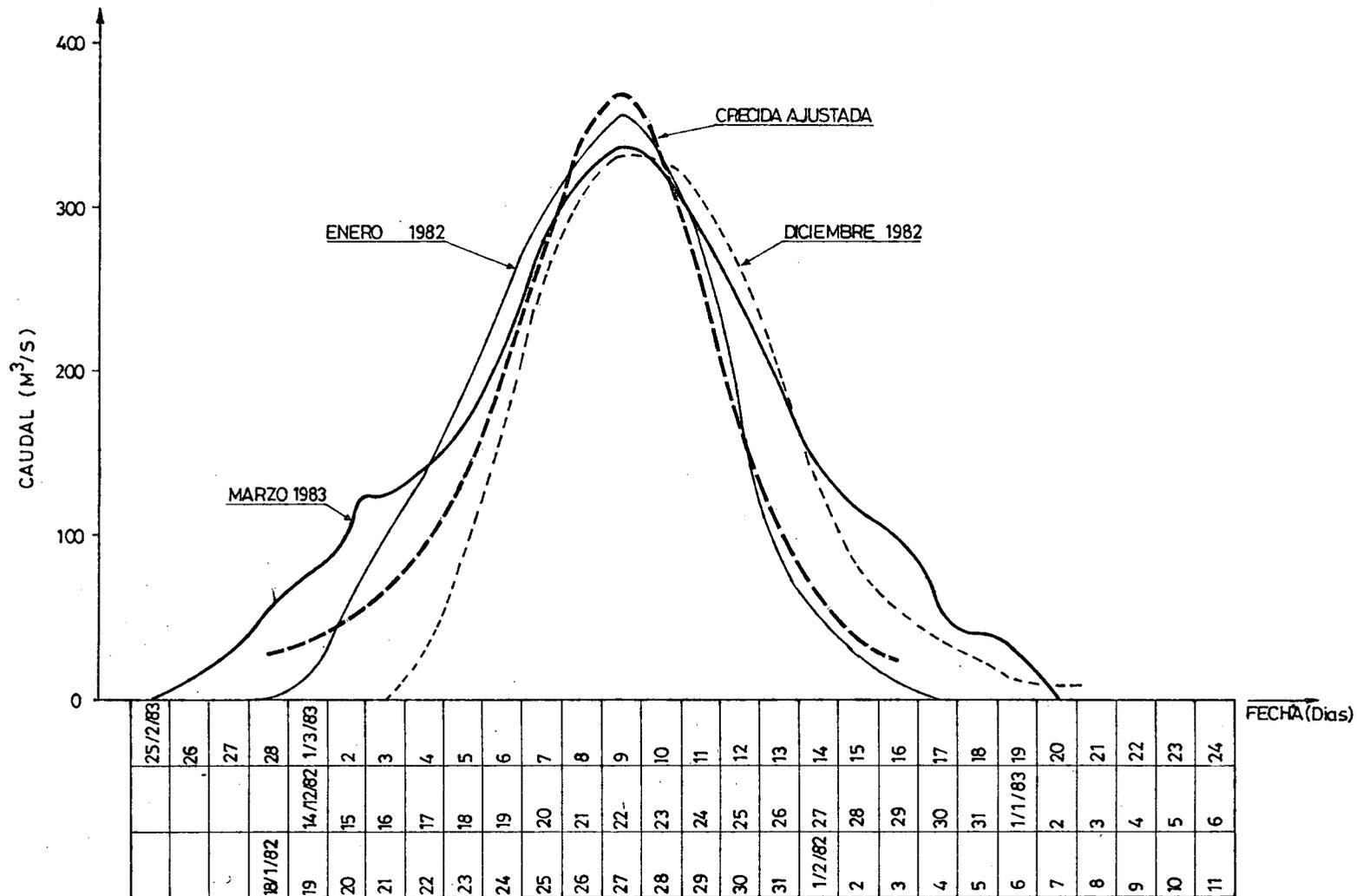


FIG. N° 8.3

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

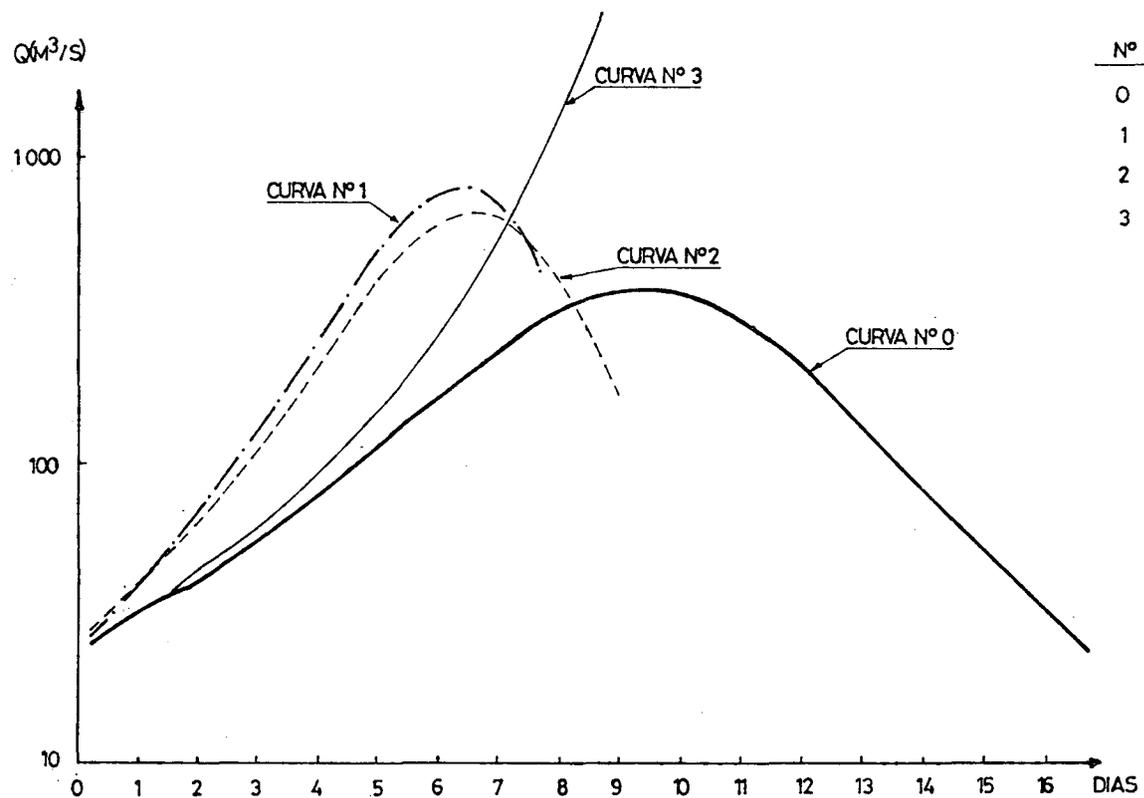


FIG. Nº 8.4

- El cambio relativamente pequeño de algunos datos conduce a formas de hidrogramas notablemente diferentes, con caudales máximos mucho mayores. Al respecto hay que destacar que en general los hidrogramas obtenidos en otros lugares presentan una rama ascendente más violenta y sostenida, y un descenso muy abrupto. Se puede suponer que en el río Paine ello no es así, debido a la pequeña magnitud de la relación H/l y a su significativa disminución en el tiempo. En otros casos, aún cuando H/l tiene una magnitud parecida a la determinada en el glaciar Dickson, la longitud l es mucho mayor, de modo que el descenso de H es poco significativo. En esas condiciones la dimensión del túnel sigue aumentando hasta que la fluencia del hielo lo cierra abruptamente (ver caso Grimsvötn según Nye, 1976), en cambio en el Glaciar Dickson la disminución de carga hace decrecer el caudal en forma anticipada, generando un hidrograma extraordinariamente simétrico.

En relación al ajuste de fórmulas empíricas se pudo comprobar que la ecuación (7) permite representar la rama ascendente del hidrograma, con parámetros que en promedio para las 3 crecidas tienen un valor de $K= 22$ y de $b= 0.59$. Como era de prever, la fórmula (8) que dá el caudal máximo, entregó un valor considerablemente mayor al real (3.000 m³/s). Ello se explica sin duda por el carácter especial de las crecidas del río Paine, de acuerdo a lo ya comentado. En las figuras N°s 8.5 y 8.6 se pueden apreciar los valores obtenidos en las crecidas del río Paine, en relación a las de otros lugares.

RELACION $Q_t = K(V_t)^b$ PARA DISTINTAS CRECIDAS

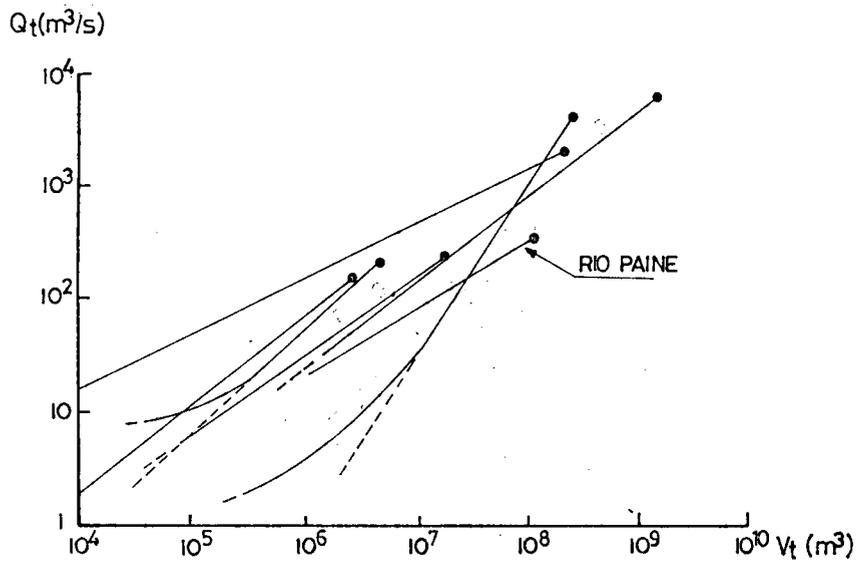


FIG. N° 8.5

VMax. vs. QMax. PARA DISTINTAS CRECIDAS

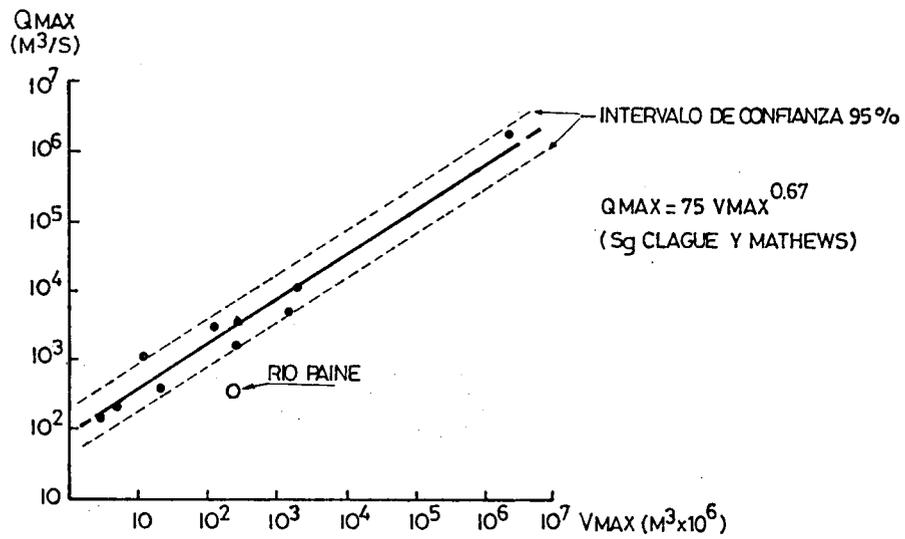


FIG. N° 8.6

NOMENCLATURA

t	: tiempo (s)
s	: abscisa según eje s (m)
S	: sección del conducto (m ²)
m	: masa fundida por unidad de distancia y de tiempo (Kg m ⁻¹ s ⁻¹)
p _i	: presión del hielo en el túnel (Nt m ⁻²)
p	: presión del agua en el túnel (Nt m ⁻²)
ρ _w	: densidad del agua (1000 Kg m ⁻³)
ρ _i	: densidad del hielo (917 Kg m ⁻³)
Q	: caudal (m ³ s ⁻¹)
g	: aceleración de gravedad (m s ⁻²)
g _s	: componente de la aceleración de gravedad según eje s (m s ⁻²)
R	: Radio hidráulico (m)
n'	: coeficiente de Manning (m ^{-1/3} s)
σ	: calor específico del agua (4.18x10 ³ J °C ⁻¹ Kg ⁻¹)
θ _w	: temperatura del agua en el túnel (°C)
θ _i	: temperatura del hielo en el túnel (°C)
L	: calor latente de fusión por unidad de masa (3,344 x 10 ⁵ Kg ⁻¹)
η	: viscosidad dinámica del agua
K	: conductividad térmica del agua
Q _t	: caudal en el instante t(m ³ /s)
V _t	: volumen acumulado hasta el instante t (10 ⁶ m ³)
K _o , n	: Parámetros que definen la fluencia del hielo
Δ t	: intervalo de iteración (s)
S ₁ , z ₁	: Sección y coordenada z al inicio del intervalo de iteración (m ² y m)

- S_2, z_2 : sección y coordenada z al término del intervalo de iteración (m^2 y m)
- r : radio del túnel circular (m)
- \dot{r} : derivada con respecto al tiempo del radio ($m \cdot s^{-1}$)

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo desarrollado en los capítulos anteriores se deducen las siguientes conclusiones principales:

- i) Las crecidas del río Paine representan un volumen de agua aproximado de $250 \times 10^6 \text{ m}^3$. Tienen una duración de 17-23 días y alcanzan un caudal máximo del orden de $350 \text{ m}^3/\text{s}$. A estos valores hay que agregar el caudal base que escurre en forma normal.
- ii) La causa de las crecidas se encuentra en la obstrucción del drenaje normal del glaciar Dickson. Ello produce un represamiento de agua en un sector donde confluye una lengua secundaria del glaciar Dickson y una del glaciar Frías. El lago sobreglacial así formado va aumentando paulatinamente su volumen hasta producir una salida de agua subglacial hacia el lago Dickson, generándose de ese modo la crecida.
- iii) El hidrograma que se obtiene, presenta una forma característica, la cual está determinada por los procesos físicos que intervienen. En este sentido, la razón entre el desnivel y la distancia desde el lago sobreglacial al lago Dickson, y su variación durante el desarrollo de la crecida, explica la menor violencia de las crecidas del río Paine, en relación a fenómenos similares en otras partes del mundo. También se encontró una gran sensibilidad de los caudales máximos a cambios leves de dicho cociente (los cuales pudieran producirse, por ejemplo, por un retroceso del frente glaciar).

iv) La causa de la obstrucción del drenaje normal pudiera estar vinculada a derrumbes o al efecto del frío y de la escasa acumulación nival en los inviernos de 1981 y 1982. Para que en el futuro no se produzcan nuevamente las crecidas del río Paine, sería necesario que se restableciera la red de drenaje. En la actualidad no existen evidencias de que ello se haya producido, de modo que, como medida de precaución, debiera esperarse la repetición del fenómeno.

De acuerdo a estas conclusiones se pueden efectuar las siguientes recomendaciones:

- i) Es necesario considerar el reacondicionamiento de las obras de infraestructura de la zona para soportar crecidas por lo menos similares a las observadas en los años 1982 y 83. Esto es válido en especial para la definición de la rasante de los caminos de acceso al Parque Nacional y para evitar el desborde del río Paine en el sector de Laguna Amarga.
- ii) Se debe efectuar un seguimiento detallado de la evolución de las crecidas (si se producen) ya que, como se aprecia en el informe, su violencia es muy sensible a algunos parámetros que pudieran cambiar en el tiempo. Con este propósito sería importante efectuar el siguiente programa de instalaciones en el sector:
 - Estación fluviométrica en el nacimiento del río Paine.
 - Estación de control de niveles en el lago Dickson.

- Estación meteorológica en el sector del lago Dickson, a la cota del frente glaciar (o más elevada).
- Estación de control de la fluctuación del frente del glaciar Dickson.

En relación al control de niveles de lago y a la estación meteorológica, podría pensarse en la instalación de una Plataforma de Colección de Datos, que transmita la información en forma automática y que cumpla ambos objetivos en forma simultánea.

iii) Para una mejor comprensión del fenómeno, en el futuro sería interesante desarrollar las siguientes actividades:

- Confección de un plano topográfico del sector del glaciar Dickson con curvas de nivel cada 5-10 mts.
- Investigar en forma detallada la zona que impide el drenaje hacia la Laguna Frías.
- Efectuar una completa campaña de observación durante el desarrollo de una crecida, incluyendo controles en el lago sobreglacial.
- Determinar el espesor del glaciar mediante una prospección geofísica.

BIBLIOGRAFIA

- Aitkenhead N. Observations on the drainage of a glacier-dammed lake in Norway. *Journal of Glaciology*, 1959
- Clague J.J. H.W. Mathews. The magnitud of Jökulhlaups. *Journal of Glaciology* Vol. 12 N° 66, 1973
- Glen J.W. The stability of ice-dammed lakes and others waterfilled holes in glaciers. *Journal of Glaciology* Vol. 2, N° 15, 1954
- González J. Expedición al Glaciar Dickson, enero 1983. Parque Nacional Torres del Paine. CONAF (Informe fotocopiado)
- Lliboutry L. *Traité de Glaciologie*. Masson Cie. Editeurs París 1964.
- Lliboutry L. *Nieves y Glaciares de Chile*. Fundamentos de Glaciología. Ediciones Universidad de Chile, Santiago de Chile 1956
- Mottershead D.N. y R.L. Collin. A study of glacier-dammed lakes over 75 years. Brimkyelen, Southern Norway. *Journal of Glaciology*. Vol 17 N° 77, 1976.
- Nye J.F. Water flow in glaciers: Jökulhlaups, tunnels and veins, *Journal of Glaciology* Vol 17 N° 76
- Pisano E. Informe sobre inundación en la cuenca del río Paine. Instituto de la Patagonia. Punta Arenas 1982. (Informe fotocopiado)
- Rothlisberger H. Water Pressure in intra - and subglacial Channels. *Journal of Glaciology*. Vol. 11, N° 62, 1972
- Shreve R.L. Movement of water in Glaciers. *Journal of Glaciology*. Vol. 11 N° 62, 1972

A N E X O I

EXTRAPOLACION DE LA CURVA DE DESCARGA DEL RIO PAINE

EN PARQUE NACIONAL

EXTRAPOLACION CURVA DE DESCARGA DEL RIO PAINE EN PARQUE NACIONAL

Para interpretar el limnigrama de la estación fluviométrica del río Paine, fue necesario extrapolar la curva de descarga a partir de la altura limnimétrica de 2,03 m., correspondiente a un caudal de 78 m³/s, con ese propósito se usó el método de extrapolación basado en la fórmula de Manning. (Normas Hidrométricas DGA, 1979).

De acuerdo al método propuesto se obtiene el caudal por la expresión:

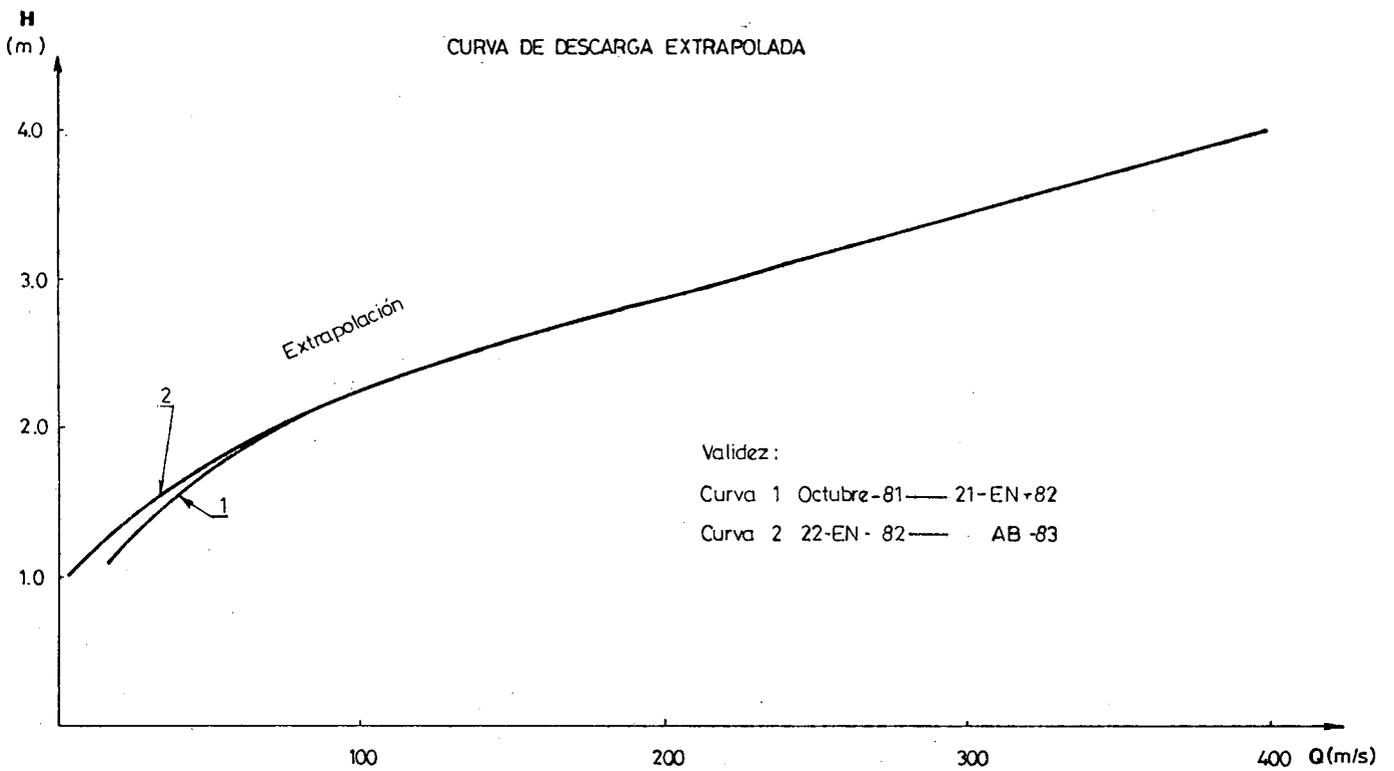
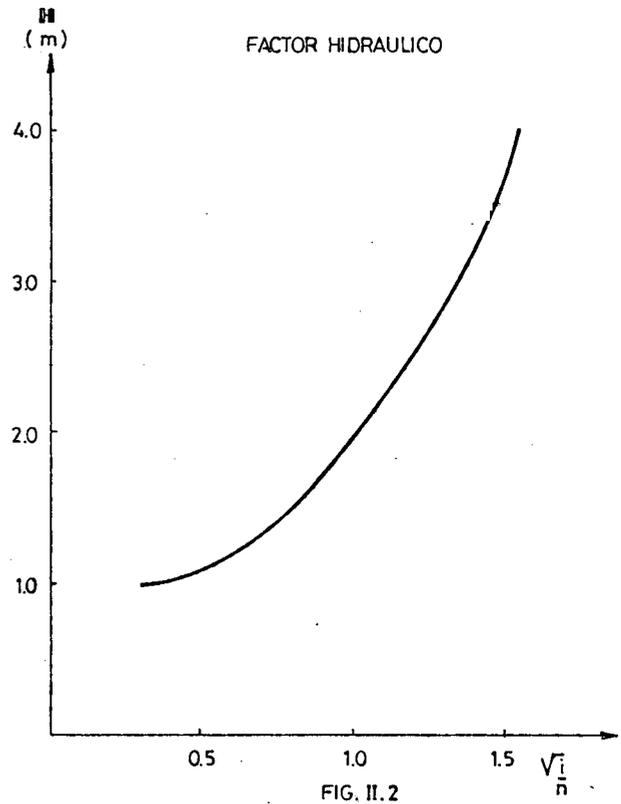
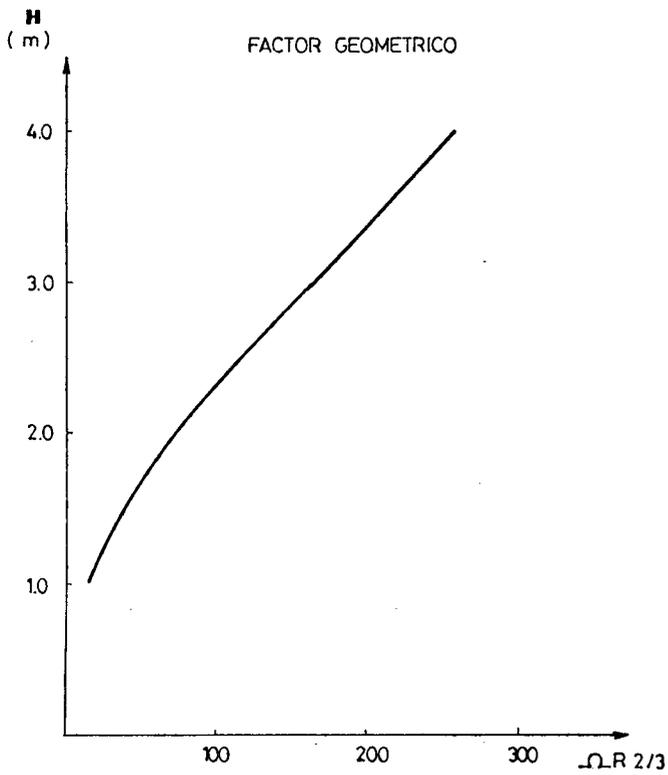
$$Q = FG \times FH = (\Omega R^{2/3}) (\sqrt{i/n})$$

- Con FG = Factor geométrico
 FH = factor hidráulico
 Ω = área de la sección
 R = radio hidráulico
 i = pendiente
 n = coeficiente de rugosidad de Manning

Por otra parte, se pueden obtener relaciones entre la altura limnimétrica (h) y los factores hidráulico y geométrico, en base a los aforos disponibles. La extrapolación de estas dos curvas ofrece ventajas sobre la extrapolación directa de la curva de descarga, ya que el factor geométrico se puede calcular conociendo la forma de la sección y la relación F.H. vs. h presenta una curvatura hacia arriba característica para los grandes caudales.

En las figuras II.1, II.2 y II.3 se entregan las curvas extrapoladas.

EXTRAPOLACION CURVA DE DESCARGA
RIO PAINE EN PARQUE NACIONAL



A N E X O . II

ESTIMACION DE CAUDALES POR METODOS INDIRECTOS

ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS POR METODOS INDIRECTOS

Para verificar los caudales obtenidos de la extrapolación de la curva de descarga en la estación fluviométrica del río Paine, se determinaron en base a perfiles topográficos del cauce inundado por la crecida de marzo de 1983, los caudales máximos en 2 puntos del río. Los lugares elegidos se ubicaron un kilómetro aguas arriba de la estación fluviométrica, en el sector de Laguna Amarga, y en la salida del lago Dickson.

El cálculo se efectuó según el método área-pendiente, de acuerdo a la presentación de "Computation of Peak Discharge by Indirect Methods" del U.S. Geological Survey. El coeficiente de rugosidad de Manning se estimó en base a la publicación "Roughness Characteristics of natural Channels" (Barnes, H. 1965). Los trabajos de terreno fueron efectuados por personal de CONAF durante el período de invierno de 1983.

Es necesario señalar que debido a la pequeña longitud de los tramos rectos que disponen de información topográfica, a la incertidumbre que se tiene en la identificación de las trazas de la crecida y a las simplificaciones hidráulicas que introduce el método de cálculo, los resultados que se obtienen deben considerarse sólo como estimaciones, válidas a falta de mediciones directas. En las condiciones del río Paine el error posiblemente sea del orden del 20%.

Considerando que las marcas en las riberas corresponden en general a las máximas oscilaciones del nivel y no representan las condiciones estables del escurrimiento, se han efectuado dos cálculos del caudal. El primero en base a las trazas medidas y el segundo disminuyendo las trazas en 30 cms., con el propósito de no incluir

las oscilaciones ya mencionadas.

A continuación se entregan los antecedentes básicos y los resultados obtenidos en los dos lugares estudiados.

a) Río Paine en sector Laguna Amarga

Se utilizaron 3 perfiles, distanciados cada 50 mts., con una caída del eje hidráulico de 0,35 m. El coeficiente de Manning en el lecho habitual se estimó en 0.030 y en la zona con árboles en 0.070 . Los principales resultados del cálculo son:

Sección	Trazas Medidas				Trazas Corregidas			
	Area m ²	V m/s	b m	h m	Area m ²	V m/s	b m	h m
1	264.8	2.00	93.7	2.83	328.5	1.95	91.0	2.62
2	235.8	2.25	87.9	2.68	211.5	1.95	84.0	2.52
3	143.9	2.74	72.5	2.67	174.0	2.67	71.0	2.45

V : velocidad media

a : ancho

h : profundidad media

Caudal medio ponderado (trazas medidas) = 530 m³/s

Caudal medio ponderado (trazas corregidas) = 465 m³/s

b) Río Paine en desagüe del lago Dickson

Se tomaron 4 perfiles distanciados a 50 mts. cada uno. La caída del eje hidráulico es de 0.47 m. El coeficiente de Manning del lecho principal se estimó en 0.030 y en la zona de inundación

en 0.043. Después de diversos tanteos sin éxito para lograr un buen ajuste del método en los tramos intermedios, se optó por trabajar exclusivamente con el primero y último perfil.

Sección	Trazas medidas				Trazas corregidas			
	Area m ²	V m/s	b m	h m	Area m ²	V m/s	b m	h m
1	160.27	2.65	62.1	2.58	145.41	2.43	57.0	2.55
4	150.87	2.82	90.7	1.66	132.97	2.66	88.0	1.51

Caudal (trazas medidas) = 425 m³/s

Caudal (trazas corregidas) = 354 m³/s

71A

ANEXO III

BALANCE HIDROLOGICO

BALANCE HIDROLOGICO 19/12/82 - 22/03/83

Con el fin de verificar la magnitud estimada de las crecidas, se efectuó el balance hidrológico del sistema de los lagos Nordenskjold, Pehoé y del Toro. De ese modo podría ser detectado un error en la evaluación del caudal del río Paine.

Se planteó la siguiente ecuación de balance para el período 19/12/82 - 22/03/83:

$$\sum Q_e = \sum Q_s \pm \Delta V_1 + E_v - P_p \quad (1)$$

- con $\sum Q_e$ = suma de caudales que ingresan al sistema
 $\sum Q_s$ = suma de caudales que salen del sistema
 ΔV_1 = fluctuación del volumen de agua almacenado en el sistema
 E_v = evaporación desde los lagos
 P_p = precipitación directa sobre los lagos

Además se tiene:

$$\sum Q_e = Q_{\text{Paine}} + Q_{\text{Las Chinas}} + Q_{\text{esc.}} \quad (2)$$

- Con Q_{Paine} : caudal río Paine controlado en la estación fluviométrica.
 $Q_{\text{Las Chinas}}$: caudal río Las Chinas, controlado en la estación fluviométrica de cerro Castillo.
 $Q_{\text{esc.}}$: caudales que no son medidos y que ingresan directamente al sistema de lagos. En especial considera varios ríos que drenan la Cordillera del Paine (río Ascensio, etc.). Se incluirá en el resto de la ecuación de balance.

$$Q_s = Q_{\text{Serrano}} + Q_{\text{sb}} \quad (3)$$

Q_{Serrano} : Caudal del río Serrano, controlado en la estación fluviométrica

Q_{sb} : Caudales de salida en forma subterránea. En especial considera la posible recarga de la napa subterránea hacia el lago Sarmiento. Se incluye en el resto de la ecuación de balance.

$$\Delta V_1 = \pm \Delta V_1 \text{ Nordenskjold} \pm \Delta V_1 \text{ Pehoé} \pm \Delta V_1 \text{ Toro} \quad (4)$$

$\Delta V_1 \text{ Nordenskjold}$: Fluctuación en el almacenamiento del lago Nordenskjold.

$\Delta V_1 \text{ Pehoé}$: Idem del lago Pehoé

$\Delta V_1 \text{ Toro}$: Idem del lago del Toro

El cambio en el volumen almacenado en los lagos se obtuvo de la estadística de fluctuación de niveles y de la superficie de los lagos respectivos.

La evaporación y la precipitación están medidas en la estación meteorológica de Estancia Paine. Para el cálculo de la evaporación en los lagos en base al evaporímetro de tanque tipo A, se utilizó un coeficiente de tanque de 0.7.

De acuerdo a los antecedentes anteriores se calculó el balance, dejando como resto los dos términos que no son medidos directamente Q_{esc} y Q_{sb} .

De este modo:

$$\text{Resto} = Q_{\text{esc}} - Q_{\text{sb}} = Q_{\text{Serrano}} - Q_{\text{Paine}} - Q_{\text{Las Chinas}}$$

$$\pm \Delta V_1 \text{ Nordenskjold} \pm \Delta V_1 \text{ Pehoé} \pm \Delta V_1 \text{ Toro} + E_v - P_p$$

En cuadro IV.1 se entrega en forma detallada el cálculo de los diversos términos del balance.

El resto que se obtiene alcanza a 5 m³/s. Si se considera que los aportes hacia las aguas subterráneas, de acuerdo a observaciones aisladas del lago Sarmiento, deben ser de poca importancia, y que el caudal superficial de entrada no controlado, de acuerdo al tamaño de los glaciares aportantes, debe estar entre los 10 y 20 m³/s, se deduce que el error en el balance debe ser inferior a 10 m³/s. Esto significa que el error en la estimación del volumen de crecida no puede superar el 15%.

CUADRO IV.1 Balance Hidrológico (19/12/82 - 22/3/83)

		m3/s	Hm3
Q entradas	Q Paine	137	1113
	Q Las Chinas	7.9	64
	Sub-total	144.9	1177
Q salidas	Q Serrano	125	1015
Lagos	Nordenskjold (h=0.40 m; S = 27 Km2)	1.4	11
	Pehoe (h=0.35 m; S = 20 Km2)	0.9	7
	Toro (h=0.77 m; S = 197 ")	18.7	152
	Sub-total	21.0	170
Ev	(Ev=382,2 mm; S = 244 Km2)	8.1	66
Pp	(Pp=130 mm; S = 244 Km2)	3.9	32
Resto (Qesc - Qsb)		5	42

ANEXO IV
CALCULO DE PROPAGACION DE CRECIDAS

CALCULO DE PROPAGACION DE CRECIDAS

Se consideró exclusivamente la regulación de las crecidas en los lagos y no en el cauce de los ríos. En los cálculos se utilizó el método de Goodrich en forma inversa y con un intervalo de tiempo de 12 horas.

Para deducir la relación entre el almacenamiento en el lago y el caudal de salida que requiere el método, se supuso una relación lineal que pasaba por un punto en el origen, definido por el volumen almacenado y el caudal pasante en la fecha de la visita a terreno, y el punto máximo, definido por el volumen máximo de acuerdo a las trazas dejadas por la crecida y el caudal máximo.

De este modo se estableció la relación:

$$Q - Q_0 = \frac{(Q \text{ máx} - Q_0)}{V \text{ máx}} V$$

Con:

Q_0 : Caudal del día de la visita a terreno

$Q_{\text{máx}}$: Caudal máximo de la crecida

$V_{\text{máx}}$: Volumen máximo almacenado sobre el nivel base tomado el día de la visita

V : Volumen almacenado sobre el nivel base

Q : Caudal correspondiente al volumen V .

El valor de $V_{\text{máx}}$ se obtuvo multiplicando la superficie del lago (S) por el nivel máximo sobre el nivel del día de la visita ($H \text{ máx}$).

Además, de acuerdo a Goodrich, se tiene:

$$I_1 + I_2 = Q_2 + Q_1 + \frac{2 V_2}{\Delta t} - \frac{2 V_1}{\Delta t}$$

Con :

I_1, I_2 : Caudal afluente en los instantes 1 y 2

Q_1, Q_2 : Caudal efluente en los instantes 1 y 2

V_1, V_2 : Volumen almacenado en los instantes 1 y 2.

De las ecuaciones 1) y 2) puede deducirse una relación iterativa para obtener el caudal afluente al lago, en función de los caudales efluentes y del caudal afluente durante el instante anterior. Dicha expresión tiene la forma:

$$I_2 = a Q_2 + b Q_1 - I_1 \quad (3)$$

El procedimiento descrito se aplicó a la propagación de las crecidas en los lagos Paine, Dickson y Grey, con la información y ecuaciones que se entregan en el cuadro V.1

Hay que destacar que el procedimiento entrega fluctuaciones del caudal en torno a una tendencia media, de modo que fue necesario en cada cálculo de propagación suavizar el caudal afluente deducido.

C U A D R O V.1
PROPAGACION DE CRECIDAS

Lago	Qo m3/s	Qmáx m3/s	Hmáx m	S Km2	Vmáx Hm3	a	b
Paine	70	390	1,7	3,4	5,78	1,84	0,161
Dickson	61	390	3,0	9,3	27,9	4,96	-2,96
Grey	220	525	1,0	31,0	31,0	5,71	-3,71

78 x

ANEXO V

F O T O G R A F I A S



Foto 1 Visión general. En primer plano se observa el HPS, al centro de la foto el Gl. Dickson con el lago Dickson y en el sector superior izquierdo el Gl. Frías y la laguna Frías.



Foto 2. Lago Dickson. Obsérvese la abundancia de hielos desprendidos desde el frente del glaciar.



Foto 3. Lago y Glaciar Dickson. Se puede apreciar con claridad el Cerro Cubo y en un primer plano la Punta Ariel.



Foto 4. Sector de confluencia de lengua secundaria del Gl. Dickson con el Gl. Frías. Al fondo se aprecian diversas lenguas del glaciar Frías y la Laguna Frías.

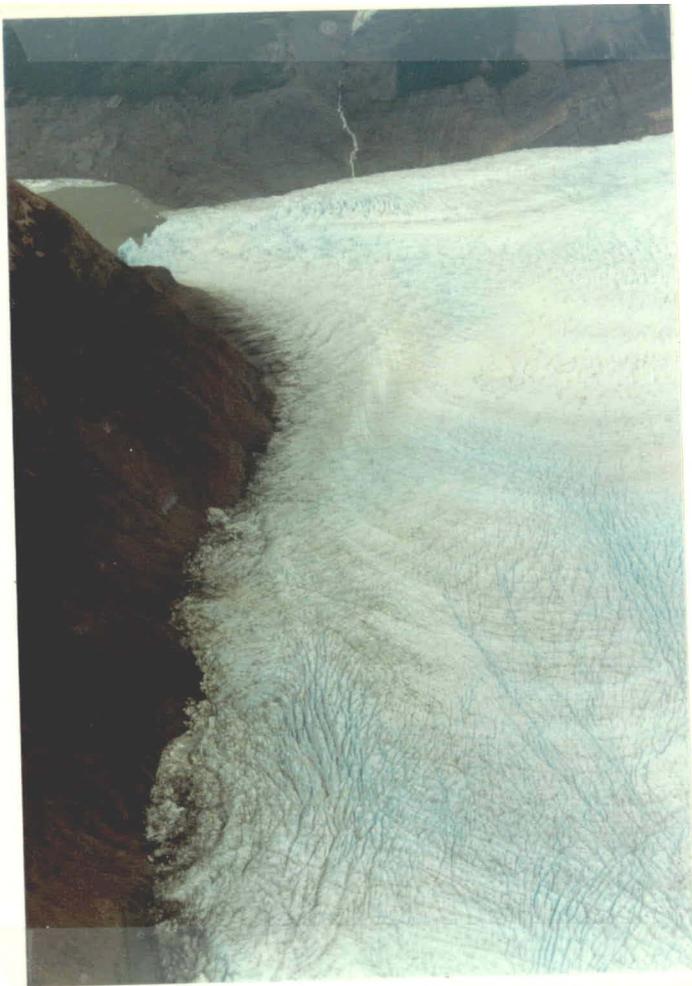


Foto 5. Detalle del trayecto del posible túnel sub-glacial. Obsérvense los sistemas de grietas circulares que indican derrumbes de cavernas glaciales.

Foto 6. Detalle del sector con lago sobre-glacial. Se aprecian los bloques de hielo distribuidos en forma caótica y el agua inundando el lugar.





Foto 7. Detalle del descenso de la superficie de hielo en el trayecto del posible túnel sub-glacial. En Diciembre/82 el hielo se encontraba en la base del balcón de roca. El hombre da la escala (foto marzo/83).