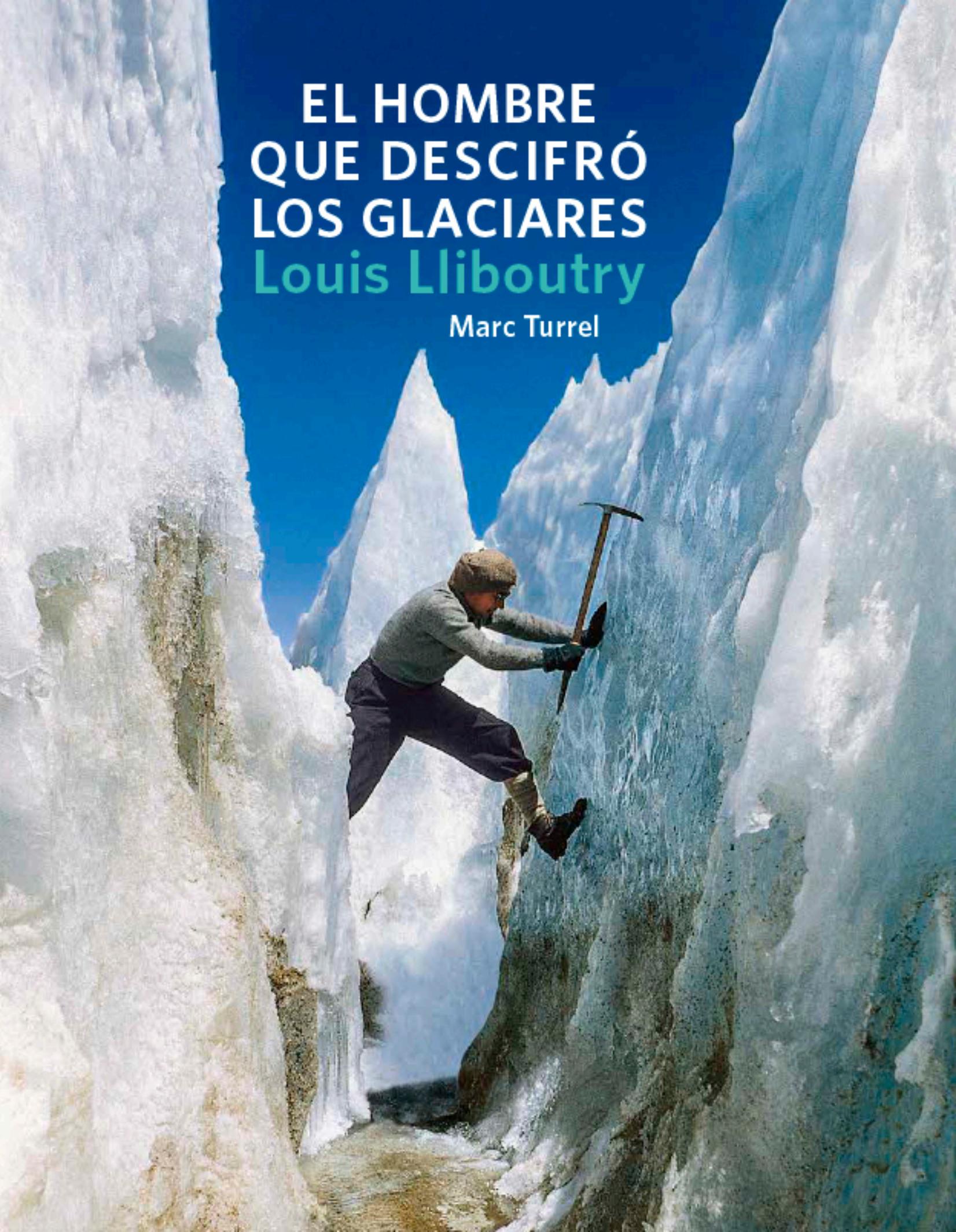


EL HOMBRE QUE DESCIFRÓ LOS GLACIARES

Louis Lliboutry

Marc Turrel



El hombre que descifró los glaciares: Louis Lliboutry

Dirección editorial: Marc Turrel

Coordinación: Sandra Andreu y Carlos Berroeta

Textos: Marc Turrel y Patricio Aceituno Gutiérrez

Diseño y producción: Paula Montero Ward

Post producción fotográfica: Ograma Impresores

Traducción: Françoise Morel

Corrección de textos: Valeria Villagrán

Foto de portada: Louis Lliboutry en el cerro Negro, penitentes de hielo, 1956.

Foto página 3: Louis Lliboutry en el glaciar del Géant, Alpes franceses, 1948.

Traducción parcial de la edición francesa *Louis Lliboutry Le Champollion des glaces*, de Marc Turrel. Copyright 2018 UGA Éditions.

© 2019, Aguas Andinas

Inscripción N° A-300284

Derechos reservados.

ISBN: 978-956-09271-0-1

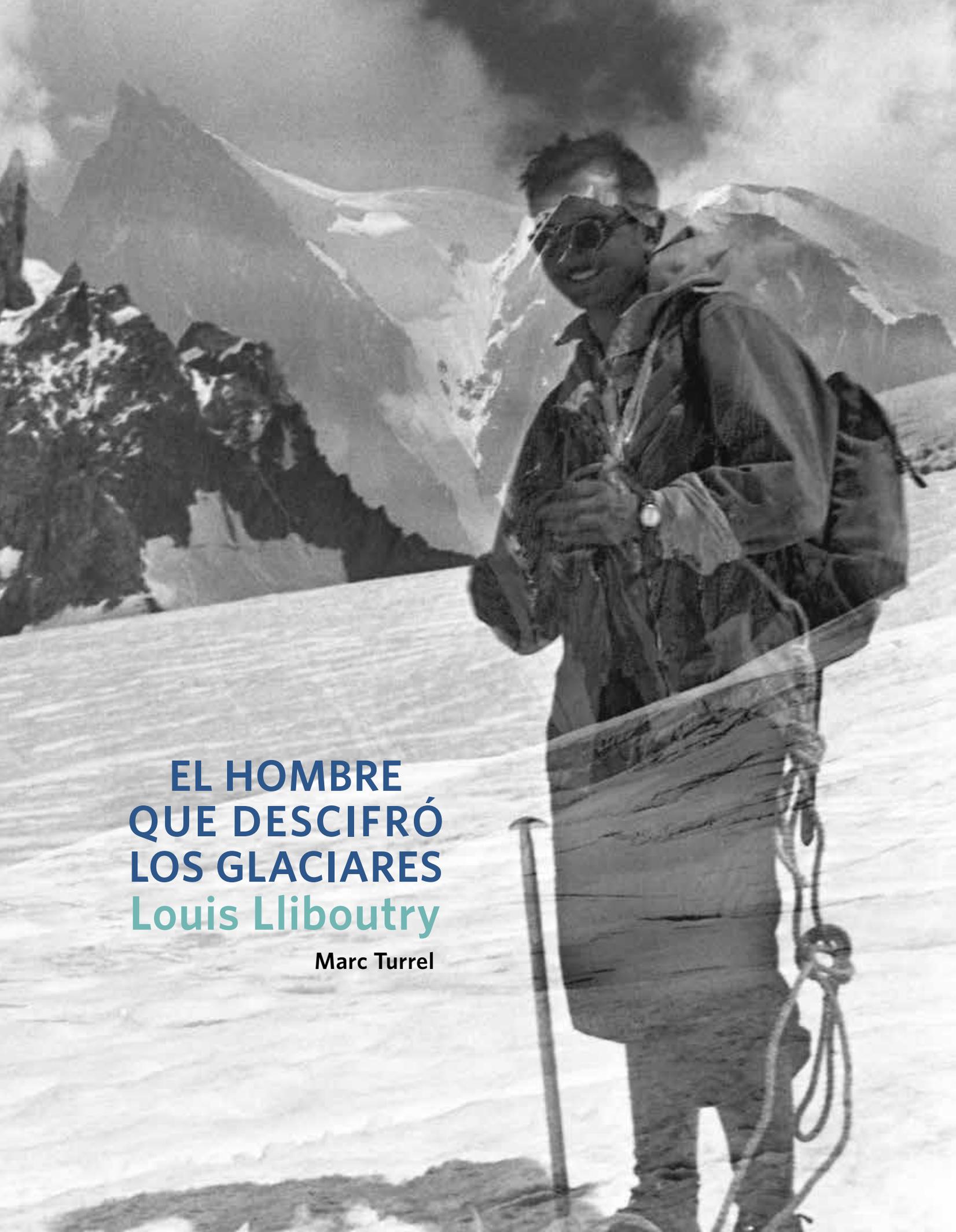
Las opiniones expresadas en esta obra son de responsabilidad de cada autor.

Autorizada su Circulación Exenta N° 19 del 5 de febrero de 2019 de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado. La edición y circulación de mapas que se refieren o relacionen con los límites y fronteras de Chile, no comprometen, en modo alguno, al Estado de Chile de acuerdo con el Art.2º, letra g) del D.F.L. N°83 de 1979 del Ministerio de Relaciones Exteriores.



UNIVERSIDAD DE CHILE





**EL HOMBRE
QUE DESCIFRÓ
LOS GLACIARES**
Louis Lliboutry

Marc Turrel





Campos de penitentes en los Andes centrales, que semejan a miles de guerreros en orden de batalla defendiendo los adoratorios sagrados de alta montaña. 1953.





Olas de hielo en el glaciar Grey. En los surcos, las grietas han sido transformadas por el sol y por la lluvia. 1956.

Índice

Prólogos

Guillermo Pickering, Presidente de Aguas Andinas	10
Narciso Berberana, CEO de Aguas Andinas	10
Francisco Martínez, Decano Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile	11
Marc Turrel, Presentación	12
Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología	14
Louis Lliboutry y su aporte pionero desde Chile a la glaciología moderna	18
El legado de Louis Lliboutry para seguir explorando los glaciares de Chile	36

Capítulo 1

Nacimiento de un científico, entre guerra y paz (1922-1945)	44
Una juventud madrileña marcada por la guerra civil española	46
1940-1945. Escuela Normal Superior de París	50
Censura y Servicio del Trabajo Obligatorio en calle d'Ulm	54
Los últimos días de la ocupación alemana	58
Los profesores de Lliboutry: Bruhat, Cotton, Kastler y Néel	60

Capítulo 2

Un camino de aprendizaje en los Alpes (1945-1951)	62
Tesis, esquí y alpinismo en Grenoble	64
Doctorado en ciencias físicas	70
El llamado de la Universidad de Chile	74

Capítulo 3

El tiempo de los pioneros: De la astrofísica a la glaciología (1951-1953)	76
Nuevos cielos, nuevos amigos	78
El proyecto de un observatorio astronómico en el hemisferio sur	82
Esquí y andinismo en la cordillera de los Andes: Portillo, Farellones, La Parva y Disputada de Las Condes	86
Expedición francesa a los Andes Patagónicos: la conquista del Fitz Roy	90
La cartografía de los glaciares andinos	110
Exploración de los altos Andes cerca de Santiago	114
El misterio de los penitentes de nieve y de hielo	118
Las fotografías aéreas de la American Air Force (AAF 1945)	126

Capítulo 4

Una conquista en el silencio de las cumbres: El Centro de Investigaciones de Glaciología, el glaciar Universidad, Nieves y glaciares de Chile (1953-1956)	130
Claude Lliboutry: pianista en la cordillera	132
El hallazgo de un mar de hielo en los Andes: el glaciar Universidad	136
Primera expedición científica al glaciar Universidad / Erik Klohn	140
<i>Nieves y glaciares de Chile</i> : El libro fundador de la glaciología física	144

Capítulo 5

Grenoble: Capital de la glaciología francesa de las montañas y de los polos (1958-1990)

	158
La misión de Lliboutry en Groenlandia	160
El período «artesanal» de la glaciología en Grenoble	166
El equipo de Lliboutry se instala en un antiguo obispado	172
La creación del Laboratorio de Glaciología en 1969	176
Catástrofes en la montaña: el glaciar de Allalin en Suiza y el lago Parón en Perú	182
Nuevas campañas glaciológicas	188
Expediciones a la Antártica	194
El Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente	196
Epílogo	202

En las huellas de Lliboutry. Los glaciares, íconos del cambio climático

	204
Dos décadas de pérdida glaciar en los Andes / Inés Dussailant	206
Nieves y glaciares de los Andes tropicales / Bernard Francou	210
Estimación del balance de masa de superficie del glaciar San Rafael y en el Campo de Hielo Norte / Gabriela Collao	216
Louis Lliboutry: Un artífice del conocimiento de los Campos de Hielo / Gino Casassa	220
Desafíos glaciológicos del Campo de Hielo Sur / Andrés Rivera	224
La singularidad de los glaciares rocosos / Guillermo Azócar	232
Métodos de investigación de los glaciares rocosos / Alexander Brenning	236
Impactos de la evolución de los glaciares rocosos en los Andes semiáridos / Xavier Bodin	240
¿La contaminación atmosférica también puede afectar el derretimiento de los glaciares? / Francisco Cereceda	242
Los glaciares de Chile central, a seis décadas de los trabajos de Louis Lliboutry / Andrés Rivera	250
La función hidrológica de glaciares en los Andes de Chile central / James McPhee	256
La importancia de los glaciares de la cuenca del río Maipo para los recursos hídricos y el abastecimiento de agua potable / Sandra Andreu	260
El rol trascendental de los glaciares como proveedores de agua / Edson Landeros	266
Ley de glaciares en Chile: el tortuoso camino para protegerlos / Sara Larraín	270
Glosario y bibliografía no exhaustiva de Louis Lliboutry	280
Bibliografía y referencias	282
Agradecimientos del autor	291



Las enseñanzas de Louis Lliboutry respecto del estudio de los glaciares, al alero de la Universidad de Chile, en la década de 1950, constituyen un patrimonio científico invaluable y un ejemplo de perseverancia, dedicación y lucha que hemos querido traer al presente en este libro, *El hombre que descifró los glaciares*, que rescata gran parte de su vida y su obra.

La vida de Lliboutry es una hazaña que irá sorprendiendo al lector a medida que se adentre en el relato, documentos, fotografías, mapas, recovecos y desafíos asumidos por este protagonista poco conocido de la historia de Chile.

Lliboutry ha marcado a fuego a las generaciones de glaciólogos que recibieron sus enseñanzas como alumnos y luego profesores universitarios, convirtiéndose en un mito vivo para estos profesionales y andinistas más documentados.

Pues bien, este texto es la historia de un francés visionario que se consideraba a sí mismo un «hermano de los glaciares».

Esa relación de respeto con la naturaleza como un ente vivo ha ido asentándose en las últimas décadas ante los desafíos que impone a la humanidad el presente siglo, caracterizado por el aumento de las temperaturas del planeta.

En Aguas Andinas estamos conscientes de que existe un peligro real en materia de disponibilidad de recursos hídricos en un futuro más cercano que lejano, que traerá cambios en la forma de vida de las personas y los ecosistemas de una vasta zona del país.

Guillermo Pickering
Presidente de Aguas Andinas

La observación de la naturaleza nos reitera que todo está relacionado, que habitamos de manera temporal el planeta y tenemos el deber moral de dejar una herencia de respeto por la biodiversidad y de protección de los entornos y ecosistemas naturales. Chile contiene uno de los patrimonios de glaciares más espectaculares del mundo. Resulta descorazonador comprobar el deterioro evidente sufrido en las últimas décadas.

Con la fascinante excusa de la historia vital de Louis Lliboutry nos adentramos en su estudio. Para dar continuidad a la primera parte del libro, biografía de este científico considerado como uno de los padres de la glaciología física moderna, incorporamos opiniones de expertos, locales e internacionales, con perspectivas diferentes que aportan diagnósticos actualizados y visiones para el debate.

Confío en que se cumpla lo que ya en el siglo XIX escribió el insigne Baldomero Lillo en uno de sus cuentos, donde atribuía al Padre Sol la siguiente afirmación:

«Nada puedo contra las nieves eternas. Aunque para ellas la aurora es más diligente y más tardío el ocaso, mis rayos, como el granito que las sustenta, no las fundirán jamás».

Narciso Berberana
CEO de Aguas Andinas



UNIVERSIDAD DE CHILE

Constituye un orgullo para la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile auspiciar este libro sobre la vida y obra de Louis Lliboutry, quien en la década de 1950 desarrollara con gran esfuerzo y entusiasmo los primeros estudios glaciológicos en nuestro país, sentando las bases para la investigación en un campo disciplinario de alta relevancia que requiere de múltiples saberes y capacidades.

En su trabajo pionero, desarrollado prácticamente en solitario, Lliboutry recorrió incansablemente los Andes de Chile Central y de la Patagonia buscando establecer la distribución y extensión de la superficie cubierta por glaciares, entonces escasamente conocida, así como los complejos mecanismos de su formación y transformación. En esa ardua tarea, realizada con poco apoyo material y logístico, contó con el leal respaldo del rector Juan Gómez Millas y la colaboración de algunos estudiantes del Instituto Pedagógico y de Geología de la FCFM, quienes gustosos compartieron con él su afición por las montañas.

Mirada con la perspectiva del tiempo, la figura de Lliboutry destaca como un modelo a seguir en la academia. Provisto de una rigurosa formación en física, obtenida en la Escuela Normal Superior de París, tuvo el coraje y la audacia de incursionar en un campo disciplinario completamente ajeno, que le planteaba no solamente grandes desafíos intelectuales, sino que también una gran exigencia física en sus excursiones a los Andes.

En el proceso de transformación, desde su condición de físico experto en materiales a su llegada a la Universidad de Chile, en 1951, a la de un glaciólogo con gran reconocimiento internacional al momento de su partida, en 1956, Lliboutry demostró todas las cualidades que las universidades actualmente esperan de sus cuadros académicos: un espíritu innovador y creativo, el planteamiento y focalización de su investigación en temas de alta relevancia para el desarrollo nacional, la vinculación con el medio externo para potenciar el trabajo investigativo, y una vocación explícita por la divulgación del conocimiento.

Es un orgullo para la Universidad de Chile y su Escuela de Ingeniería haber contado con Louis Lliboutry entre sus profesores mientras trabajó en Chile. Asimismo, la Universidad de Chile debe ser reconocida por haberle permitido desarrollar sus talentos hasta transformarse en uno de los principales impulsores de la glaciología moderna, dejando en nuestro país un legado científico ampliamente reconocido.

Francisco Martínez Concha

Decano Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

El hombre que descifró los glaciares: Louis Lliboutry

Marc Turrel / Editor

Este libro cuenta por primera vez la vida y la obra del fundador de la glaciología moderna. Gracias a su tenacidad, su exigencia de calidad y de rigor, Louis Lliboutry dio un impulso extraordinario al conocimiento de los glaciares en el mundo.

Conocí al profesor Louis Lliboutry en su casa de Corenc, cerca de Grenoble, en 2001. Al final de nuestro encuentro me entregó un manuscrito que acababa de escribir: *Los glaciares fueron mis hermanos*. Empezaba así: «Espero que mi testimonio no impedirá al lector soñar con una época donde las montañas eran casi desiertas, los Andes chilenos inexplorados y donde era posible hacer investigaciones originales con pocos medios».

Lliboutry suspiró profundamente, y me dijo: «Espero que usted pueda publicar mis memorías algún día».

Su muerte, en 2007, a los 85 años, en Grenoble, me dejó con la inquietud de que su memoria sea un legado y una fuente de inspiración. Dieciocho años más tarde, era tiempo de confiar a la posteridad el deseo póstumo y visionario del fundador de la glaciología chilena y francesa.

Editamos en esta biografía extractos de su manuscrito y de su libro, *Nieves y glaciares de Chile*, dándole la posibilidad de volver a la vida a través de las leyendas de sus fotografías que publicamos en exclusividad y de muchas citas extraídas de ese manuscrito, así como de cartas y cuadernos que su familia me confió con este fin.

El aporte de Louis Lliboutry desde Chile a esta disciplina científica ha sido fundamental para su desarrollo. Contratado por la Universidad de Chile en 1951, se dedica a la exploración de los grandes glaciares de la Patagonia y de los Andes centrales.

Incansable peregrino de la aventura científica, al estilo del padre Charles de Foucault, y heredero de Claudio Gay, Amadeo Pissis, Ignacio Domeyko y Charles Darwin, Lliboutry cartografía las altas cumbres del hemisferio sur en la soledad de estos inmensos espacios minerales, realizando el primer inventario de los glaciares de los Andes centrales: glaciares Olivares, Universidad, Infiernillo, entre otros.

Nacido en Madrid en 1922 de padres catalanes franceses, doctor en física en la Universidad de Grenoble en 1950, Lliboutry entrega a Chile una nueva visión de su territorio, resonancia magnética de su tierra natal, en el lenguaje abstracto de una cultura forjada en el prestigio de la ciencia francesa.

Utiliza el idioma secreto y hermético de la geofísica para descifrar los enigmas de los hielos eternos y explicar la dinámica de los glaciares y la formación de los penitentes y de los glaciares rocosos, fenómenos de la naturaleza casi desconocidos en otras latitudes, plasmados en la belleza de paisajes telúricos, en sus enhiestas cimas, fuente de inagotables recursos geológicos e hídricos, lectura de un país que tomó conciencia de su futuro y de su singularidad.

Como lo señala el geógrafo español Eduardo Martínez de Pisón en la edición francesa del *Champollion des glaces*, «el precedente de Lliboutry nuevamente arma un personaje en el escenario de la ciencia y la montaña con el cual es fácil identificarse. Es el original. Su recuerdo estaba presente en aquel paisaje andino, en los granitos y granodioritas del arco montañoso. Luego, en la toma de notas y en la redacción de los informes, las páginas que Lliboutry redactó en 1952, 1953 y 1966 sobre estos espléndidos relieves y glaciares fueron no sólo una base para entender su geología y glaciología, sino el testimonio de la grandeza de la presencia del hombre de ciencia en la exploración de la montaña».

Durante cinco años, entre 1951 y 1956, con la ayuda de un puñado de andinistas, a caballo o en mula, Lliboutry explora y fotografía la cordillera, registrando la majestuosidad de la criósfera andina. Se da cuenta de que muchos glaciares no figuran en los mapas oficiales. Los Andes se convierten en un gigantesco laboratorio experimental a cielo abierto, vertiginoso escenario de sus exploraciones a 5.000 y 6.000 metros.

Nos planteamos con el glaciólogo Gino Casassa el desafío de encontrar estos lugares que Lliboutry había recorrido durante sus expediciones. Teníamos en nuestras manos el registro completo de sus fotografías andinas, un cuaderno de fotografías en blanco y negro meticulosamente ordenado. Encontramos los puntos



Arriba, el glaciar Grey, en 1956, fotografiado por Louis Lliboutry durante su viaje a la Patagonia chilena.
Abajo, el mismo lugar, en 2018.

GPS de los cerros Barrentín e Iver, donde Lliboutry había pernoctado para documentar sus expediciones a los glaciares Olivares, Paloma, Juncal Sur, Nevado del Plomo y Risopatrón.

Si Lliboutry demoró días en llegar a la confluencia de estas mismas cumbres por el portezuelo de la Copa, el helicóptero de la Dirección General de Aguas (DGA), nos llevó de Santiago hasta la cuenca del río Olivares, el Gran Salto y el cerro Negro, en 20 minutos de vuelo. Entendimos el entusiasmo que lo llevó a iniciar esta larga ruta de la glaciología moderna, cerca de los cerros Federación, Altar y Paloma, bañados por estos mares de hielos milenarios.

El Centro de Investigaciones de Glaciología creado y dirigido por Lliboutry había emprendido el estudio de la nieve y de los ventisqueros que abastecen de agua a toda la zona central, estudio que nunca había sido realizado. Armado de un teodolito y de un eclímetro, necesitaba corregir las alturas y la toponimia de las montañas, resolver el problema de saber «si los glaciares están

en aumento, en receso o muertos (es decir, son meras reliquias del pasado, sin alimentación actual)».

El paisaje que Lliboutry conoció en aquel mes de marzo de 1953 no era el mismo que nosotros contemplábamos, a pesar de sentir el mismo viento y la misma puna helada de la alta cordillera.

Los glaciares se habían retirado de este reino de cumbres, 65 años después del paso de Lliboutry, última reverencia de la naturaleza al hombre de ciencia. Tuvimos que recorrer kilómetros para alcanzar los frentes de hielo de estos gigantes medio dormidos. El retroceso de los dioses.

Destacados académicos e investigadores chilenos, franceses y alemanes aportan en este libro una respuesta científica a los desafíos ligados a los efectos del calentamiento global en los Andes, viendo los glaciares como centinelas del cambio climático.

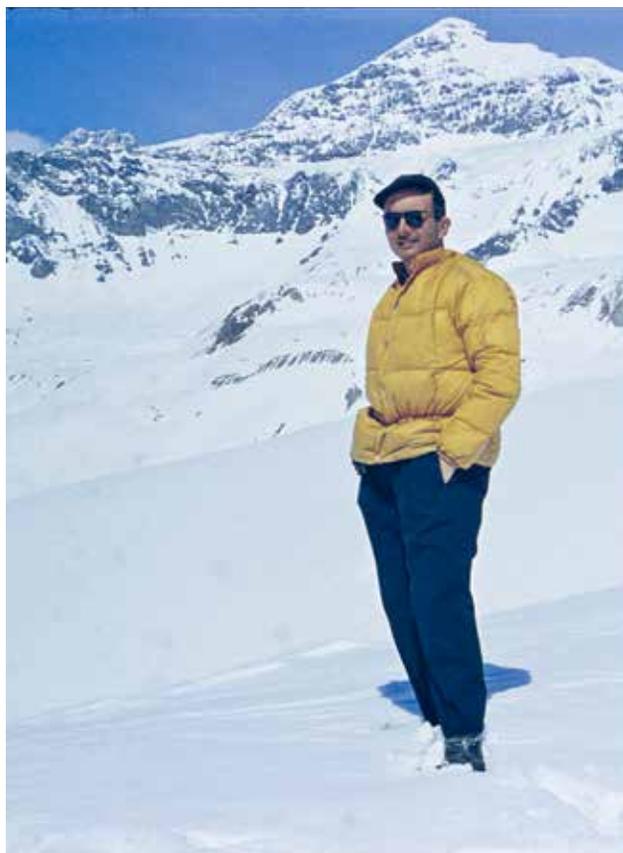
El patrocinio de Aguas Andinas y de la Universidad de Chile permite que los primeros archivos de la glaciología moderna renazcan hoy para proteger este invaluable patrimonio de la humanidad.

Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología

Louis Lliboutry

Louis Lliboutry escribió el primer tratado moderno de glaciología publicado en Santiago en 1956, *Nieves y glaciares de Chile*, una extensa y prolífica obra de casi 500 páginas sobre el estudio de los glaciares de Chile con sus mapas inéditos de la cordillera central. El texto que publicamos a continuación es un extracto del libro del Prof. Lliboutry que invita a la reflexión sobre la dimensión y el sentido de sus investigaciones científicas en nuestro país.

Este libro es el fruto de cinco años de fructíferas observaciones en la alta cordillera central chilena y en la Patagonia. Mi próximo regreso a Europa y la cercanía del Año Geofísico Internacional me invitan a publicar ahora los resultados obtenidos, aún cuando muchas cuestiones merecerían estudios más completos. Es de la zona de más difícil acceso, la de nieves perennes, ventisqueros,



Louis Lliboutry, en una de sus expediciones a los glaciares Olivares y Juncal Sur.

ríspidas agujas con las que voy a entretener al lector, que puede ser geógrafo, ingeniero civil, andinista, militar, esquiador o, sencillamente, amante de las bellezas naturales que Chile brinda con espléndida profusión. Hablaremos de la exploración de esa zona, su clima, las características de sus nieves y de sus glaciares, dejando a personas más calificadas el estudio de su geología o de su flora.

Hace pocos años que se ha despertado el interés por la alta cordillera. Chile es uno de los países más montañosos del mundo, y sin embargo hay aún sólo una minoría de chilenos que se interesan por ella. En países con semejante porcentaje de montañas, como Suiza o Austria, una mucho mayor densidad de población ha obligado a la gente a vivir en ellas, adquiriendo mayor conocimiento de rocas, quebradas, nieves y rodados. En Chile, el fértil Valle Central será aún suficiente para alojar a toda la población durante siglos. Si se exceptúan algunos mineros, para los chilenos la cordillera es sólo un marco, un «baluarte», como reza el himno patrio: no viven en ella.

Pero es, sin embargo, la cordillera la que les suministra la vida, proporcionándoles el agua para el regadío, el agua potable, el agua para las centrales hidroeléctricas, agua que proviene únicamente de la fusión de la nieve o del hielo.

Es también por la cordillera, o por encima de ella, que se hace gran parte del intercambio con el resto del mundo; en ella han de vigilar aduaneros y militares. En fin, la cordillera encierra casi ilimitadas posibilidades para el desarrollo del turismo, nacional e internacional.

Ahora bien, lo que le da su fisonomía a la alta cordillera es la nieve. Rasgos parecidos tiene toda montaña, cualquiera sea su altitud, cuando estamos cerca de las nieves perennes: ya sea a 1.000 metros en Aysén o 4.000 metros frente a Santiago. Para estudiar la alta cordillera

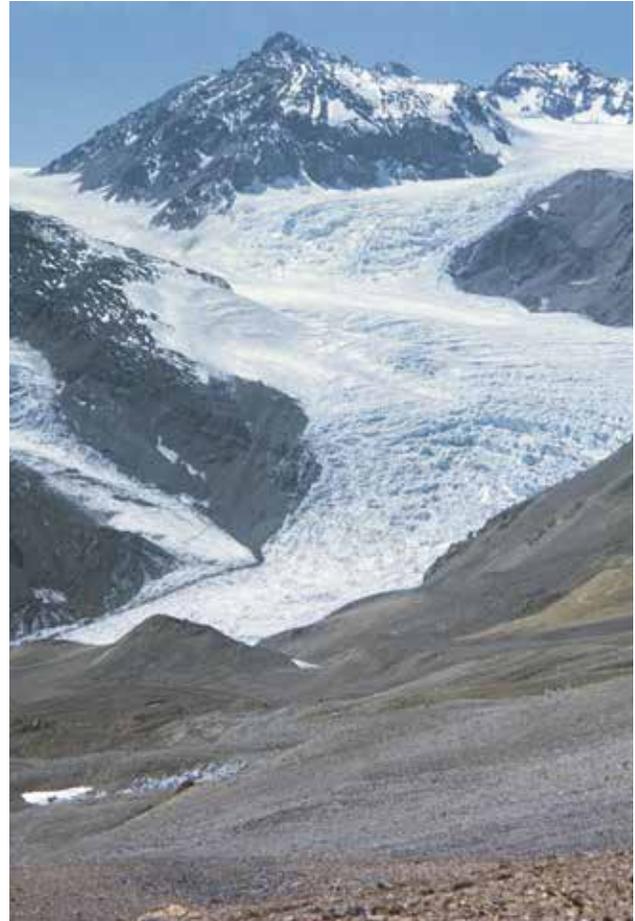
tendremos, pues, que conocer en primer lugar lo que se refiere a la nieve y a sus transformaciones. Si agregamos a ello los innegables intereses de Chile en la Antártica, vemos la importancia nacional de abocarse al estudio de las nieves, ventisqueros, hielos marinos, al estudio del agua en la naturaleza bajo todas sus formas sólidas, lo que constituye la glaciología.

La glaciología es una ciencia nueva que tan sólo en los últimos años ha ido edificándose como ciencia coherente y positiva. Es cierto que ya en el siglo XVIII Pierre Martel y Horace-Bénédict de Saussure, y Louis Agassiz, James David Forbes y John Tyndall en el siglo XIX hicieron observaciones en los ventisqueros. Pero hasta la Segunda Guerra Mundial los progresos de la nueva ciencia fueron lentos, pues casi sólo se ocuparon de ellas *amateurs* entusiastas e intrépidos, pero que no siempre estaban capacitados para hacer observaciones de valor. Solo los aludes, origen de catástrofes cada invierno, han dado lugar a estudios completos por especialistas. Además, deportistas, viajeros, exploradores, marinos y geólogos no especializados han acumulado muchos datos en una infinidad de publicaciones distintas, sin conocer muchas veces las observaciones anteriores.

Y cada observación va en general acompañada de hipótesis y teorías para reemplazar observaciones y mediciones inexistentes.

Por otra parte, la glaciología ha sido estudiada casi siempre por geólogos que han querido muchas veces fundar el estudio de los glaciares sobre las huellas dejadas por ellos desde la época glaciaria (algo así como si un naturalista quisiese estudiar una especie animal existente hoy día únicamente por sus nidos, sus huellas o sus desperdicios). Hay que operar al revés, y estudiar primero lo que ocurre hoy día, basándose en distintos ramos de la física, de muy firmes fundamentos. Luego, a partir de hechos glaciares comprobados, se podrá estudiar la geología de la época glaciaria, haciendo intervenir métodos propios de la geología, como la morfología, la estratigrafía, la paleontología y otros métodos propios al estudio del Pleistoceno, como el análisis polínico o del fondo de los océanos, la arqueología, etc. Las cadenas deductivas serán más largas, los fenómenos más complejos, las hipótesis más numerosas y, finalmente, los resultados más inseguros.

La glaciología es una ciencia sintética que necesita de conocimientos de calórica, mecánica, meteorología, morfología, pero es distinta de todas ellas. En los últimos años



Paso Francisco Moreno. Glaciar Alto del río Plomo, que nace en el alto del río Blanco y se divide en dos brazos, uno corriendo hacia Chile y el otro hacia Argentina. La frontera pasa, por consiguiente, por el medio del glaciar. Cordillera central.

no se ha publicado ningún libro de glaciología en ningún idioma, a pesar de todos los estudios realizados durante los últimos diez años. Los trabajos esenciales están esparcidos entre un centenar de revistas poco difundidas, entre las cuales destaca la *Journal of Glaciology* británica. Antes de hablar de las nieves y glaciares de Chile era necesario hacer una exposición de esta ciencia.

Pero no basta la erudición: uno tiene que escoger entre tantas opiniones divergentes, ayudándose de su experiencia propia. Así, poco a poco he ido edificando un tratado de glaciología, en el cual se han ido engastando tanto mis observaciones y teorías referentes a los penitentes, los suelos estriados, los glaciares de roca, etc., teorías que hubieran podido ser presentadas aparte, con numerosos cálculos, observaciones e ideas a los cuales me conducía la lectura de los trabajos de otros autores.

He enfocado la glaciología con una óptica chilena, dando mayor relieve a los fenómenos más frecuentes en Chile (en particular el glaciar de tipo alpino, el que la mayoría de los autores ha estudiado). El compendio de glaciología que presento al lector es, sin duda, muy distinto del que hubiera escrito en Europa. En este libro el lector hallará, por otra parte, datos históricos relativos a la exploración de la alta cordillera y de los hielos patagónicos y a la conquista de sus cumbres, así como datos geográficos.

Me tildarán de presuntuoso, de pretender conocer tantos lugares en tan pocos años, pero a la alta cordillera central he hecho unas 10 expediciones ligeras de 5 a 15 días y muchísimas visitas breves de fin de semana a la precordillera. En la Patagonia estuve dos meses



Los penitentes crecen con el tiempo. Corte de uno de los penitentes de neviza anterior.

y medio (en la zona del Fitz Roy) con la expedición francesa vencedora de esa cumbre y tres semanas en Magallanes. ¿Cómo describir luego la alta cordillera central mejor que en el siempre fundamental libro de Risopatrón? ¿Cómo hablar de la Patagonia meridional y de Tierra del Fuego después de las magníficas obras del padre De Agostini, fruto de sus innumerables expediciones?

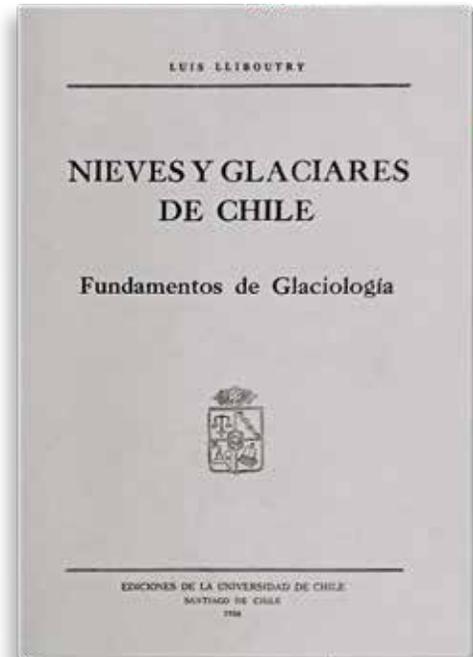
Para la cordillera central, esta inmensa tarea me ha sido posible gracias a la colaboración de algunos jóvenes y excelentes andinistas, que han puesto un muy abundante material gráfico a mi disposición; para la Patagonia, la Dirección del Instituto Geográfico Militar me ha permitido muy amablemente estudiar las fotografías aéreas de toda la Patagonia tomadas por la misión norteamericana de 1945. Gracias a ellas es posible, sin moverse de Santiago, conocer esa intrincada región—casi inaccesible, por sus continuas tempestades—, mejor que el propio padre De Agostini. Por gentileza de este Instituto podemos publicar una decena de estas fotografías escogidas entre las que están en venta libre, por haber sido tomadas fuera de la zona fronteriza.

De la Antártica chilena hablaré muy poco, por no haber estado nunca allá, y porque todos nuestros conocimientos sobre ella van a tener que ser modificados a la luz de los resultados que se obtengan durante el próximo Año Geofísico Internacional. Pienso, sin embargo, que la lectura de este libro será suficiente para que los científicos de lengua hispana que participen en el Año Geofísico vean qué investigaciones cabe emprender y en qué publicaciones podrán hallar más amplia documentación. He tratado de ilustrar abundantemente este libro, poniendo especial atención en la cartografía. Sin buenos mapas, toda observación glaciológica o geológica resulta no del todo fiable y toda conquista andina deja lugar a dudas.

Impresiona ver importantes estudios en los cuales no se ha tratado, ante todo, de mejorar una cartografía que es deficiente. Sólo en la zona del Fitz Roy pude hacer un levantamiento de precisión con teodolito. Sin embargo, creo haber mejorado muy notablemente los mapas existentes: en la Patagonia, sencillamente, por un estudio más detallado de las fotografías aéreas que sirvieron para hacerlo y por un mejor conocimiento de los hechos glaciológicos; en la zona central, con expediciones en el terreno, levantamientos expeditivos y el estudio de fotografías panorámicas tomadas por otros andinistas.

Al terminar esta introducción, quiero rendir un homenaje al entonces rector de la Universidad de Chile, don Juan Gómez Millas. No sólo quiero estampar mi más sincero agradecimiento por haberse interesado constantemente en mis trabajos y por haberme ofrecido las más amplias facilidades para hacer investigaciones y para publicar este libro, sino también expresar mi más viva admiración por la magnífica labor que con entusiasmo y dinamismo realizó a la cabeza de esta universidad, honra de las Américas.

También quisiera agradecer a todos aquellos que me dieron facilidades de un modo u otro, o que me proporcionaron datos, y en primer lugar a los jefes y al personal del Instituto Geográfico Militar de Chile. Las numerosas críticas que podré hacer en la zona de alta cordillera a los mapas preliminares existentes (por algo se llaman preliminares) no restan nada al respeto que siento por esta institución ante la inmensa labor que ha cumplido en sólo treinta años frente al país más difícil de cartografiar del mundo.



Primer tratado de glaciología moderna publicado en español, 1956.



En 1953, Lliboutry, a raíz de sus investigaciones, propone al rector de la Universidad de Chile, Juan Gómez Millas, organizar en terreno el primer seminario de glaciología con cursos de geofísica.

Louis Lliboutry y su aporte pionero desde Chile a la glaciología moderna

Patricio Aceituno / Ex decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (2014-2018).



Louis Lliboutry, en 1951.

La llegada de Louis Lliboutry al Instituto Pedagógico de la Universidad de Chile en 1951 se inscribe en el contexto de una iniciativa promovida por el decano de la Facultad de Filosofía y Educación, Juan Gómez Millas, para desarrollar, en esa Facultad, una capacidad de investigación en física que fortaleciera la formación pedagógica en esa disciplina. Su gira por Europa en 1949 le había permitido desarrollar la cooperación científica con universidades francesas y traer a Chile a jóvenes universitarios, como el geógrafo Jean Borde y el físico Louis Lliboutry.

En 1950 se había creado en esa facultad un programa de licenciatura conducente al título de Profesor de

Estado de Matemáticas y Física, y se había organizado un grupo de Física Nuclear y Radiación Cósmica, y otro de Cristalografía y Física Molecular¹. Lliboutry se incorpora a un grupo integrado por los profesores Nahum Joel, Carlos Grandjot, Gabriel Alvial y Arturo Valenzuela. La actividad de investigación la realizaban principalmente los profesores Joel en rayos X y estructura molecular y Alvial en radiación cósmica y física nuclear.

El nombramiento de Lliboutry para reforzar la enseñanza de física en el Instituto Pedagógico a partir de marzo de 1951, objetivo principal de su viaje a Chile, quedó formalizado mediante decreto del Ministerio de Educación emitido el 4 de septiembre del mismo año, según el cual se le nombró por un período de dos años para desempeñar el cargo de Profesor de Física Experimental, con la obligación de dictar 6 horas semanales de clases sistemáticas de dicha asignatura, con una renta global de \$133.333 para el año 1951.

Como parte de su tarea docente, Lliboutry asume la responsabilidad de organizar los trabajos prácticos de laboratorio asociados al curso de Óptica Física que dicta el Prof. Nahum Joel, lo que incluye coordinar diversos experimentos sobre índice de refracción, espectrómetro de Bunsen, espectro de difracción, anillos de Newton, interferencias con luz natural, luz polarizada, microscopio polarizador, y difracción de rayos X a través de cristales. Su docencia en física incluyó también un curso sobre Electricidad y Magnetismo, otro sobre Calor y Termodinámica, y un tercero sobre Movimientos Oscilatorios, así como la edición y publicación de apuntes para cada uno de ellos. Asimismo, dictó un curso optativo sobre Física de los Metales, incluyendo la descripción de sus cualidades mecánicas, estructura cristalina, aleaciones y propiedades ferromagnéticas. También contribuyó a la formación de ingenieros y geólogos en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), donde asumió la cátedra de Física General I a partir del segundo semestre de 1952, y coincidió además con el poeta Nicanor Parra, quien por entonces

desempeñaba el cargo de Inspector General de la Escuela de Ingeniería.

Como responsable del Laboratorio de Física del Instituto Pedagógico, elabora un detallado reglamento para su funcionamiento y las pautas de comportamiento que deben seguir los estudiantes, así como normas para la confección de las memorias de trabajos prácticos. Se preocupa del diseño de los trabajos prácticos experimentales que los estudiantes de los tres primeros años de la carrera de Pedagogía en Matemáticas y Física deben realizar. Estos incluyen, entre otros, experimentos sobre focometría, fotometría, calorimetría, tensión superficial, balanza Mohr, balanzas, péndulos matemático y físico, ley de Ohm, constante de Youle, electrolisis, puente Wheastone, picnómetro sólido y líquido, microscopio y goniómetro.

Las condiciones materiales que Lliboutry encontró en el Instituto Pedagógico al momento de su llegada eran seguramente más precarias de lo que él imaginaba. El Instituto se había mudado hacía poco tiempo (en 1949) al lugar que actualmente ocupa la Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación, y la infraes-

tructura para el desarrollo de docencia e investigación aún se encontraba en proceso de remodelación y adecuación. En un informe de octubre de 1951 al decano de la Facultad sobre lo realizado durante el año, Lliboutry da cuenta de la ejecución de trabajos básicos de habilitación del local, incluyendo la implementación de divisiones internas y de instalaciones eléctricas. Por otra parte, le hace ver la necesidad de contar con personal de apoyo y de instalación de extractores de aire, sifones en los lavabos y electricidad de alta tensión. Asimismo, comunica la urgencia por contar con un anfiteatro que sea apropiado para proyecciones y para la realización de experimentos frente a un grupo grande de estudiantes, así como de salas donde se puedan dejar constantemente montados los aparatos para trabajos prácticos.

Respecto de la actividad docente, el informe de Lliboutry refleja desaliento por la realidad que encontró. Indica que se realizaron todos los cursos previstos, salvo el taller, por falta de un local adecuado, herramientas y personal. Como obstáculos para un mejor desempeño apunta a las huelgas y al desinterés de los estudiantes y ayudantes. En particular, refiere que ningún ayudante



Fue en el Departamento de Física del Instituto Pedagógico de la Facultad de Filosofía y Educación de la Universidad de Chile donde se desarrollaron las investigaciones de glaciología. Lliboutry trató de incorporar un verdadero espíritu científico moderno en la Universidad.

y ningún estudiante de 4° año asistió al curso optativo que dictó sobre Física de Metales, al cual, por otra parte, concurren alumnos de la Escuela de Ingeniería, de Artes y Oficios, y alguna otra persona del exterior. Da cuenta, además, que en los exámenes semestrales, un tercio de los alumnos no se presentó, un tercio entregó la hoja en blanco o con un contenido muy insuficiente, y solo un tercio fue aprobado. También hace referencia a la falta de apoyo para la realización de investigación y a la carencia de un presupuesto detallado y fijo para su realización. Señala, igualmente, que ni él ni el Prof. Joel han logrado despertar interés entre los alumnos para realizar memorias con ellos. Si no fuera por las montañas, es posible que Lliboutry no hubiese solicitado la renovación de su contrato en el Instituto Pedagógico en 1953.

La ruta hacia la glaciología

No obstante que en una carta dirigida al decano Gómez Millas pocas semanas antes de su arribo a Chile le declaraba su interés por la sismología, el rumbo que tomarían sus actividades de investigación era incierto en ese momento. Así, a principios de abril de 1951 se publicó en un diario de Santiago la noticia de que en el Instituto Pedagógico de la Universidad de Chile se desarrollarían experiencias sobre energía nuclear bajo la dirección técnica del investigador francés Louis Lliboutry². De acuerdo a lo indicado en esa nota, los trabajos que se iniciarían a partir de junio de ese año con participación de un grupo de físicos chilenos incluirían estudios sobre transmutación de energía atómica y otros ensayos científicos.

Por otra parte, en una entrevista publicada en *El Mercurio* el 23 de mayo de 1951, luego de referirse a sus investigaciones sobre imantación de acero en campos magnéticos débiles y sobre imanes permanentes, bajo la dirección de su director de tesis doctoral, el Dr. Néel, Lliboutry manifestaba su interés por complementar esos estudios durante su estadía en Chile, así como cooperar con trabajos que se realizaban en Francia sobre espectros de estrellas, sobre todo de la región ultravioleta, que es la más difícil de estudiar, por la absorción de la alta atmósfera. Respecto a esto, Lliboutry manifestaba en dicha entrevista que contaría con un espectrógrafo facilitado por el director del Observatorio de París, el Dr. André-Louis Danjon. Son estos planes los que explican la presencia

de Lliboutry, a menos de dos meses de su arribo a Chile, en una numerosa comitiva encabezada por los decanos de las facultades de Filosofía y Educación, y de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Juan Gómez Millas y Reinaldo Harnecker, respectivamente, que se reunió en el pueblito de Farellones el domingo 13 de mayo de 1951 para hacer público un proyecto de construcción de un observatorio en la cumbre del vecino cerro Colorado. La iniciativa, impulsada por ambas facultades, con la colaboración de la Asociación Astronómica Internacional y el Observatorio de París, y que ya contaba con la aprobación del Consejo Universitario, permitiría la realización de investigaciones en astrofísica, radiación cósmica, meteorología y sismología, como lo destacó en su discurso el decano de la FCFM, quien en una muestra de la confianza que tenía en la ejecución del proyecto, anunció que al cumplirse el centenario del Observatorio Astronómico de la Universidad de Chile, en agosto de 1952, se invitaría a astrónomos extranjeros a la inauguración oficial del observatorio.

Por su parte, el director del Observatorio Astronómico dependiente de la FCFM, Federico Rutllant, destacó que este nuevo observatorio, por su altura sobre el nivel del mar (3.370 m), sería el que contaría con la mejor instalación entre sus similares en el mundo. Describió a continuación las características del telescopio astronómico que allí se instalaría, y mencionó otras actividades que estaban planificadas, tales como observaciones biológicas relacionadas con mediciones de la densidad microbiana en la atmósfera, estudios de física nuclear relacionados con la constitución del átomo y la estructura de los espectros de las estrellas australes. Éste era el tema específico que interesaba a Lliboutry. Otros asistentes a ese acto, que fue ampliamente reportado en los medios de comunicación, fueron los profesores Humberto Fuenzalida Villegas y Gabriel Alvial, el director de la Escuela de Ingeniería de la U. de Chile, Jorge von Bennewitz; los ingenieros a cargo de la construcción de las obras en terreno que debían comenzar en octubre del mismo año, Sres. Domingo Santa María y Eduardo Martínez; los arquitectos a cargo del diseño de las obras, Sres. Luis Middleton y Federico Biéregel, y el vicepresidente del Ski Club Chile.

La magnitud de las expectativas que abrió este anuncio, con la promesa de transformar el pueblito de Farellones en un valioso centro de gravitación científica y deportiva, fue similar a la de la frustración provocada

Carta de Louis Lliboutry al rector del Liceo de Hombres de Punta Arenas en la cual expresa su interés en reconocer los glaciares de la región y dictar una conferencia sobre los hielos de la Patagonia, el 18 de diciembre de 1955. El membrete de la carta viene con el nombre de Centro de Investigaciones de Glaciología, cuya sede corresponde al domicilio personal de Lliboutry, en la calle Luis Thayer Ojeda 1671.

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE FILOSOFIA Y EDUCACION
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE GLACIOLOGIA
(Prof. L. Lliboutry)

Luis Thayer Ojeda 1671
Santiago

SANTIAGO DE CHILE, 18 de Dic. 1955

Sr. Rector del Liceo de Hombres
Don Angel Rivera
Punta Arenas.

Estimado Rector y colegas:

 Mi amigo Luis Oyarzun le habló de mis deseos de visitar su hermosa región. Conozco unicamente la región del Fitz Roy por haber participado a la expedición francesa que conquistó esa cumbre, y lo desearía por las fotografías aéreas que estoy estudiando y los relatos de Agostini y otros. Mi especialidad es la glaciología, y estoy por entregar al editor un libro que se intitulará: "Nieves y glaciares de Chile, Fundamentos de Glaciología".

 He reunido unos cuantos amigos amantes del turismo bajo carpas para acompañarme en un reconocimiento de los ventisqueros más próximos a Puerto Natales. Con mi señora y un ingeniero, francés como nosotros, llegaremos a Punta Arenas el 11 de Enero por LAN, para partir el 31 del mismo mes. Un matrimonio suizo y un ingeniero de minas italiano llegarán el 12 de Enero para partir el 30 de Enero y 1º de Febrero. Me permito molestarlo sin conocerlo y acudir a su gentileza para aprovechar al máximo tan breve plazo.



La famosa alpinista suiza Dorly Marmillod, en el glaciar La Paloma, en los Andes centrales. Al fondo se aprecian los glaciares Olivares y Risopatrón. 1938.

por el abrupto fracaso del proyecto del observatorio en cerro Colorado por razones explicadas en otra parte de este libro. Tal fracaso, sumado a la demora en el envío del espectrógrafo prometido desde el Observatorio de París, terminó por desalentar los planes de investigación en astrofísica que había planificado Lliboutry para su estadía en Chile, siendo atraído por las actividades en la montaña y los temas de investigación relacionados con la nieve y los glaciares. De este modo, creció su afinidad con su colega en el Instituto Pedagógico, el Prof. Gabriel Alvial, quien lideraba los estudios en radiación cósmica, impulsada por el mutuo interés por instalar un laboratorio de alta montaña para satisfacer los propósitos específicos de ambos en los campos de la glaciología y de la radiación cósmica. De esa alianza de colaboración nace el proyecto de construcción del observatorio El Infernillo.

Como una demostración de su interés por la montaña, a los pocos meses luego de la llegada al país Lliboutry se incorpora como miembro del Cuerpo de Socorro Andino de la Asociación de Ski y Andinismo de Santiago, y durante 1951 logra ser aceptado como encargado de observaciones científicas en los ámbitos de la geología, glaciología y meteorología de una expedición francesa a los Andes Patagónicos, que en febrero de 1952 ascendería por primera vez el monte Fitz Roy. En esta misión contó con el patrocinio del Instituto de Geografía de la Universidad de Chile, que dirigía el Prof. Humberto Fuenzalida Villegas. En julio de 1952 es aceptado como miembro activo de la Sociedad

Científica de Chile, entidad en la cual fue elegido para asumir una de las secretarías en enero de 1953.

En algún momento durante 1952 Lliboutry le presenta al decano de la Facultad de Filosofía y Educación un largo informe sobre los estudios que en forma personal ha estado realizando en glaciología, exponiéndole las razones que justifican el desarrollo de investigaciones en esta disciplina en el Departamento de Física del Instituto Pedagógico. Hace ver las necesidades de equipamiento, vestimenta, transporte e infraestructura que estas investigaciones requieren, indicando que hasta entonces ha estado utilizando su vehículo particular, lo que le ha significado financiar elevados gastos de mantenimiento debido al desgaste ocasionado por la mala calidad de los caminos cordilleranos. También le hace presente la necesidad de contar con financiamiento para la adquisición de equipamiento topográfico, instrumentación meteorológica y material de dibujo, aparte de otros gastos, como el financiamiento de transporte en mulas en la cordillera.

Está claro que Lliboutry logró el respaldo formal para continuar con sus investigaciones glaciológicas, pero el apoyo en temas logísticos, equipamiento e infraestructura fue escaso, como queda de manifiesto en el informe de entrega del instrumental científico y material a su cargo, al término de su estadía en Chile, en abril de 1956. En lo que se refiere a material de montaña, el breve listado incluyó una cuerda de nylon, una cuerda de cáñamo, dos anafes, tres pares de grampones, cuatro mosquetones, nueve clavos de roca y hielo, dos piolets y una mochila.



La Casa Central de la Universidad de Chile, a principios de la década de 1950.



Cena de despedida de Darío Moreno, becado en Europa, octubre de 1952. De pie (Izq. a Der.): Roberto Pizarro, Zanelli, Louis Lliboutry, Gabriel Alvial, Nahum Joel, José Montecinos, Sergio Aburto, Juan Simken. Sentados: Eliana Pozo, Silvia Stantic, Sra. de Moreno, Darío Moreno, Isabel Garaycochea y Luisa Fernández.

Como una medida cuyo objetivo principal parece haber sido visibilizar y difundir la incipiente actividad de investigación en glaciología, Lliboutry impulsó la creación del Centro de Investigaciones de Glaciología en el Instituto Pedagógico, el que aparentemente nunca contó con un presupuesto específico ni con un grupo significativo de colaboradores, aparte de un reducido número de estudiantes que ayudaron en trabajos de terreno y análisis de datos. Lliboutry incorporó un membrete con el nombre del centro en el encabezado de su correspondencia, la que despachaba colocando como remitente su domicilio particular.

Su interés por mejorar el conocimiento de factores meteorológicos relevantes en los estudios de glaciares, y la necesidad de acceder a equipamiento básico del cual no disponía en la universidad lo llevaron a comunicarse con el director de Endesa en abril de 1955 para solicitarle que le facilitara en calidad de préstamo un teodolito moderno que le permitiera calcular la altura y ubicación de ciertos puntos y medir velocidades de ventisqueros. En la misma carta le solicita hacer instalar cinco nivómetros totalizadores a distintas alturas entre Corral Quemado (1.300 m) y el refugio-observatorio El Infiernillo (4.320 m en el valle del río San Francisco, a fin de establecer la variación de la precipi-

tación con la altura, dato fundamental para cualquier cálculo sobre las reservas de agua en la cordillera.

Frente a la carencia de recursos para la realización de sus estudios en la montaña, recurre al apoyo de terceros. Elabora una detallada encuesta que dirige a los andinistas a través de sus diversas conexiones con la comunidad de montañistas, especialmente de la Asociación de Ski y Andinismo de Santiago, de la cual era miembro, y a través de ella a diversos clubes andinos, de deporte, de ski y de excursionismo en el país. Mediante dicha encuesta, enviada desde el Centro de Investigaciones en Glaciología durante 1953, Lliboutry indaga sobre diversas características de las formaciones de penitentes de nieve y sobre los ventisqueros recubiertos de piedras y tierra. Asimismo, toma contacto con un club argentino de andinistas en busca de información sobre glaciares y ventisqueros en la vertiente Este de los Andes, y se comunica con el Laboratorio de Física Cósmica de la Universidad de San Andrés en La Paz, Bolivia, para solicitar información meteorológica del observatorio Chacaltaya que requiere para los estudios sobre transformaciones de la nieve y del hielo.

Por otra parte, en el contexto de sus estudios sobre transformaciones de la nieve y el régimen de los ventisqueros de la alta cordillera, solicita y obtiene información

meteorológica de la estación meteorológica que la línea aérea Pan American Grace Airways (PANAGRA) opera en Cristo Redentor junto a la ruta que comunica a Chile con Argentina, al interior del valle del río Aconcagua.

A fines de 1953, o quizás en enero de 1954, Lliboutry solicita a la Facultad de Filosofía y Educación la renovación de su contrato en la Universidad de Chile por un período de dos años a partir de marzo de 1954. En dicha solicitud reconoce que desde hace un año ha emprendido investigaciones en glaciología, respecto de las cuales no ha tenido mayor reconocimiento ni apoyo. Informa que aún cuando ha debido enfrentar circunstancias desfavorables, tales como la falta de ayudantes y laboratoristas rentados, los resultados han sido abundantes y promisorios, según lo atestiguan varios artículos publicados en revistas chilenas y extranjeras de fama mundial.

Destaca en su solicitud de renovación de contrato lo realizado respecto del desarrollo de una teoría sobre los penitentes de nieve y hace notar el impacto que sus investigaciones han tenido para el Instituto de Geografía y el Instituto de Geología de la Universidad, así como también para el Instituto Geográfico Militar. Como una forma de destacar la relevancia de la labor investigativa realizada, menciona las invitaciones que ha recibido para dictar conferencias sobre glaciología en Londres, Cambridge, París y Grenoble durante sus próximas vacaciones en Europa. En su presentación defiende la geofísica como una disciplina que se debe desarrollar en la Universidad de Chile, por la relevancia que tiene en estudios de geología, prospección, meteorología, sismología y oceanografía. Da cuenta del interés que despierta, indicando que al seminario de glaciología y al curso optativo de geofísica que está dictando no solamente asisten alumnos de física y de geografía del Instituto Pedagógico, sino que también estudiantes del exterior. Su solicitud termina con una frase que revela que la docencia de cursos de física general ha dejado de atraerle, quizás por la falta de interés que muestran los estudiantes: «Durante los próximos dos años podría también encargarme de alguna clase de física general, en el caso de faltar profesores». Su solicitud de renovación de contrato fue aprobada mediante decreto de Rectoría N° 2.653 de la Universidad de Chile de fecha 30 de abril de 1954.

Lliboutry trabaja sin descanso hasta el término de su estadía en Chile, en otoño de 1956. Durante la

primavera de 1955 realiza cinco excursiones a la zona alrededor del observatorio El Infiernillo, con una duración de uno a cuatro días cada una, con el objetivo de realizar análisis de suelo y estudios de glaciares de roca, contando con la colaboración de la compañía minera Disputada de Las Condes, que le proveyó hospedaje gratuito. Los resultados obtenidos se traducen en una nueva nota publicada por la Academia Francesa de Ciencias (la octava desde su llegada a Chile). Por otra parte, preocupado de la participación de Chile en el Año Geofísico Internacional que se celebraría en 1958, prepara un informe para el Comité Nacional de Geodesia, Geografía y Geofísica sobre el aporte que se podría hacer en el área de la glaciología. Durante enero de 1956 realiza una expedición a la zona de Torres del Paine, en la provincia de Última Esperanza, que le permite hacer correcciones al mapa de la región, estudiar las características del glaciar Grey, y glaciaciones antiguas alrededor del Paine. A fines de febrero de 1956 realiza un viaje de exploración y estudio glaciológico en los nacientes de los ríos Azufre y San José en alta cordillera frente a San Fernando. Le acompañan en esta excursión dos andinistas, estudiantes de la carrera de geología en la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Erik Klohn y Óscar González. Con este último, que desarrollaría posteriormente una larga vida académica en esa facultad como especialista en volcanología, mantendría una activa correspondencia una década más adelante relacionada con planes de desarrollo de investigaciones glaciológicas en la Antártica y la organización de una nueva visita de Lliboutry a Chile.

Vinculación con especialistas de la región

En el proceso que lo llevó a postular los mecanismos involucrados en la formación de las estructuras de hielo denominadas penitentes, a partir de fines de 1952 Lliboutry mantiene un activo intercambio de opiniones con el destacado geógrafo y glaciólogo argentino Jorge J. Heinsheimer, quien fuera hasta su fallecimiento, en 1971, miembro titular de la Academia Nacional de Geografía de Argentina. Se vincula además con otros científicos y especialistas argentinos en temas andinos como el profesor Arturo E. Corte, de la Universidad de Cuyo, en Mendoza, quien posteriormente, en la década de 1970, fue el primer director del

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Con él mantuvo un activo intercambio epistolar para consensuar la denominación en español de procesos y fenómenos específicos en el ámbito de la glaciología. Respecto de esta misma materia interactuó con José Federico Finó (1907-1977), bibliotecólogo argentino, bachiller en ciencias y letras de la Universidad de París, y dirigente del Club Andino Bariloche y de la Federación Argentina de Ski y Andinismo, quien en su labor en la Biblioteca Nacional de Buenos Aires se había especializado en investigaciones lexicológicas sobre temas andinos.

Durante 1957 mantiene un intercambio de correspondencia con el glaciólogo argentino Benito Colqui, a propósito de los trabajos que este último realizara en el glaciar del río Manso, en el volcán Tronador, Provincia de Río Negro. En respuesta a una solicitud de colaboración, a fines del mismo año, Lliboutry, ya de vuelta en Francia, se comunica con los integrantes chilenos de una expedición chileno-japonesa que prepara una expedición a la Patagonia. En relación a estudios glaciológicos, les recomienda estudiar el balance anual de los glaciares a distintas altitudes, el retroceso de los hielos y la edad de los bosques sobre los arcos morrénicos. También les sugiere medir la velocidad de algunos grandes glaciares orientales del hielo continental.

Lliboutry en los medios de comunicación y su relación con otras instituciones

La estadía de Lliboutry en Chile no pasó inadvertida en los medios de comunicación de la época. Así, su incorporación a la Universidad de Chile como profesor de física en 1951 fue motivo de una breve nota publicada en el diario *El Mercurio* el 30 de marzo de ese año bajo el título *Catedrático francés en el Instituto Pedagógico*, en la cual se exponía brevemente su trayectoria científica previa. Por otra parte, el trabajo pionero que emprendió en el campo de la glaciología a partir de 1952 con la colaboración de un reducido grupo de estudiantes y andinistas fue material noticioso difundido por la prensa. Específicamente, el diario *Las Últimas Noticias* publicó el 15 de abril de 1953 una entrevista a Lliboutry, con ocasión de la entrega de un informe a Juan Gómez Millas, que por entonces ocupaba el cargo de ministro de Educación, sobre los resultados de sus investigaciones

glaciológicas al cumplir dos años de permanencia en el país. En dicha oportunidad Lliboutry destaca la importancia económica de los estudios sobre nieve y glaciares por su impacto en la construcción de caminos e infraestructura de montaña, en la disponibilidad de agua potable y de riego para la agricultura, así como también sobre la disponibilidad de energía hidroeléctrica.

De este modo, muy temprano en su involucramiento en un nuevo campo de estudio que lo aleja definitivamente de sus líneas previas de investigación en el campo de la física, Lliboutry defiende la alta pertinencia de su nuevo rumbo científico. Es necesario reconocer que esta decisión no fue fácil ni libre de riesgos. En esto le ayudó su carácter resuelto, ajeno a la timidez. No tenía reparos en expresar su opinión, incluso si ésta pudiese



El Mercurio con fecha del 9 de noviembre de 1955, donde se menciona la compra de los terrenos para levantar el centro de esquí La Parva. Como una demostración de su interés por la montaña, Lliboutry se incorpora como miembro del Cuerpo de Socorro Andino de la Asociación de Ski y Andinismo de Santiago, y durante 1951 logra ser aceptado como encargado de observaciones científicas en los ámbitos de la geología, glaciología y meteorología de una expedición francesa a los Andes Patagónicos.

ser considerada políticamente incorrecta, proviniendo de un extranjero. Un ejemplo de lo anterior se revela en el contenido de una carta que envió al director de *El Mercurio* en agosto de 1955, de la cual no se logró obtener evidencia relativa a su eventual publicación. En ella, refiriéndose a un artículo recientemente publicado en dicho medio de comunicación con el título *Misterios geológicos*, Lliboutry rebate su contenido con el respaldo de la rigurosa formación obtenida en la Escuela Normal Superior de París, haciendo presente que las fuentes de información del autor son anticuadas, y que muchas de las teorías que señala ya han sido abandonadas por todos los científicos.

Luego de agregar diversos comentarios corrigiendo lo expresado en el artículo motivo de sus críticas, extiende éstas a la realidad nacional que observa como un extranjero de paso: «No hago estas observaciones para brillar en lo más mínimo, sino para deplorar la penuria de las observaciones científicas y el bajo nivel de la ciencia pura en América del Sur, si se ponen aparte algunos admirables autodidactas». Luego se pregunta: «¿Cómo culpar a los profesores de no mantenerse al corriente de la vida científica, cuando con 40 horas o más de clases efectivas a la semana, se los ha transformado en máquinas de repetir lo poco que aprendieron en otro tiempo? ¿Qué posibilidad, con ese horario agobiador (en Europa nunca tienen más de 20 horas de clase semanales), de seguir la ciencia en su rápida evolución? ¿Qué aliciente se les da para sacrificarse a seguir estudiando, cuando su sueldo se ve aumentado automáticamente cada tres años, hagan lo que hagan, tomen o no en serio su papel fundamental en la sociedad? Y por último, si tuviesen el tiempo necesario y el interés en ello, ¿qué posibilidades de información científica se pueden tener en Chile, donde los libros extranjeros parecen ser considerados por las autoridades como un lujo inútil, y las becas de estudio al extranjero como un despilfarro antipatriótico?».

En su afán por difundir una cultura de montaña, en un país como Chile lleno de ellas, Lliboutry escribe una carta al diario *El Mercurio*, que se publica el 14 de julio de 1953, a propósito de una tragedia ocurrida unos días antes en el sector de Lo Valdés, al interior del Cajón del Maipo, cuando una avalancha de nieve sepultó un grupo de veintidós estudiantes de los últimos cursos de la promoción del Liceo Salesiano Juan Bosco y los dos profesores que los acompañaban. Frente a la propuesta de un diputado que sugiere como medida preventiva

prohibir el acceso de estudiantes a la montaña durante el invierno, la equipara a una eventual prohibición de acceso a las playas porque se han ahogado bañistas, y argumenta con vehemencia en pos de mejorar la educación, el interés y el amor de la juventud por nuestra cordillera. Agrega en su carta que el desconocimiento de la cordillera por los chilenos es una cosa pasmosa, aseveración que en la actualidad sigue siendo válida, en un país donde la mayor parte de su población vive de espaldas a los Andes. En coherencia con las ideas expuestas en la carta, la revista *Andina* publica poco tiempo después un artículo escrito por Lliboutry con el título *Naturaleza de los aluviones y sus precauciones*.

En el contexto de vinculación externa a su quehacer universitario, Lliboutry colabora en aspectos técnicos de la demarcación limítrofe entre Chile y Argentina. En mayo de 1955 le comunica al director del Instituto Geográfico Militar (IGM) que al realizar un mapa esquemático de los hielos patagónicos entre los paralelos 49°S y 51°S ha encontrado que el trazado del límite en un mapa 1:250.000 entregado por técnicos norteamericanos para esa región parece carecer de fundamentos científicos y aún de sentido común, y que la corrección a dichos errores, aplicada por el Instituto en su Carta Preliminar, no es suficiente. En particular, le hace ver que en esa acción correctiva no se consideraron los dos únicos criterios a que tal trazado debía atenerse, a saber:

- Seguir en lo posible las líneas divisorias de hielos, o
- Unir con trazos rectos las cumbres reconocidas como fronteras.

La preocupación de Lliboutry a este respecto, y así se lo manifiesta al director del IGM, es exponer lógicamente el punto de vista de Chile sobre la demarcación de la frontera con Argentina en esta región, que hasta el día de hoy mantiene aspectos pendientes.

Personalidad de Lliboutry

El análisis de la correspondencia de Lliboutry y de sus actividades cuando vivió en Chile revela un perfil académico que resulta muy coherente con las actuales exigencias que se imponen a la investigación científica, donde aparte de los atributos de rigurosidad y excelencia de los estudios que se realizan, se exige que éstos sean relevantes y pertinentes al desarrollo del país, y la obligación de divulgar sus resultados.

En efecto, pese a las limitaciones que Lliboutry tuvo que enfrentar, logró avanzar el conocimiento en el campo de la glaciología en un nivel de profundidad y extensión inédito en Chile, lo que quedó demostrado al transformarse en pocos años en un referente internacionalmente reconocido en este campo disciplinario, a partir de su pionera labor de investigación desarrollada en Chile. Pero su desempeño también tuvo un carácter innovador, siempre preocupado de la pertinencia del quehacer científico y de su impacto en la sociedad. Las acciones de vinculación externa, su colaboración con empresas y actividades de *out-reaching* que realizó durante su estadía en Chile en la década de 1960, que seguramente fueron observadas con distancia y cierta sospecha por el sector académico más conservador de la época, son ahora parte del ideal académico que se busca instalar en las universidades.

Lliboutry reconoce en la introducción de su libro los apoyos externos a la Universidad que recibió para su trabajo investigativo, mencionando al Instituto Geográfico Militar, al Museo de Historia Natural, en la persona de su director, don Humberto Fuenzalida Villegas; a Corfo, a través de los geólogos Carlos Klohn y Max Junge; a Endesa personificada en la figura del ingeniero Enrique Arias, y a la compañía minera Disputada de Las Condes. Es interesante examinar con la perspectiva

del tiempo la forma como Lliboutry justificaba la necesidad de desarrollar estudios sobre nieve y glaciares, y la visión sociológica de la relación de la población en Chile con sus montañas, que en gran medida no ha cambiado hasta hoy. Lo siguiente está tomado de la introducción de su libro *Nieves y glaciares de Chile*: «Chile es uno de los países más montañosos del mundo, y sin embargo hay aún sólo una minoría de chilenos que se interesan por las montañas. En países con semejante porcentaje de ellas, como Suiza o Austria, una mucho mayor densidad de población ha obligado a la gente a vivir en las montañas, trabando mayor conocimiento con rocas, quebradas, nieves y rodados. En Chile, el fértil valle central será aún suficiente para alojar a toda la población durante siglos... para los chilenos la cordillera es sólo un marco, un 'baluarte', como reza el himno patrio: no viven en ella. Pero es, sin embargo, la cordillera que les suministra la vida, proporcionándoles agua para el regadío, el agua potable, el agua para las centrales hidroeléctricas, agua que proviene únicamente de la fusión de la nieve y del hielo».

Observatorio El Infiernillo

Luego del fracaso del proyecto de instalación de un observatorio de alta montaña en la cumbre del cerro



Punta sur del Infiernillo, donde se está construyendo el observatorio y el laboratorio de radiación cósmica. A la izquierda el Aconcagua y a la derecha el cerro Negro. Septiembre de 1954.



El observatorio del Infiernillo se halla en la línea de equilibrio de los glaciares Olivares, dos kilómetros más al este. Durante la edificación del refugio, Lliboutry solía invitar a sus amigos andinistas y esquiadores. Aquí Gerig y Dolly.

Colorado, cercano al pueblito de Farellones, Lliboutry une esfuerzos con Gabriel Alvia para la construcción de un observatorio que permita realizar observaciones meteorológicas en apoyo de su investigación en glaciología, y que sirva de base para los estudios experimentales sobre radiación cósmica que realiza el profesor Alvia. Con este objetivo, en las numerosas excursiones que Lliboutry realiza a la montaña desde su llegada al país, identifica un lugar apto para la construcción de este observatorio en la cumbre del cerro El Infiernillo, ubicado al sureste de la mina Disputada de Las Condes, al interior del valle de San Francisco, a 4.320 m sobre el nivel del mar. Se desconocen los detalles de la negociación para obtener el terreno donde se debía construir el observatorio, pero es claro que a mediados de 1953 ese objetivo ya se había logrado, a la luz de lo señalado en una carta que el profesor Alvia escribe al director del Instituto Geográfico Militar en agosto de ese año, solicitando la

colaboración del instituto para elaborar un pequeño mapa de ese terreno a escala 1:10.000, en base a las fotos aéreas trimetrogón tomadas por el instituto y los trabajos en terreno realizados por el profesor Lliboutry.

El 22 de junio de 1954 se protocolizó notarialmente la donación que Elfriede Maurach de von Kiesling hizo a la Universidad de Chile, de un terreno de una extensión cercana a dos hectáreas en la cumbre del cerro El Infiernillo, ubicado en su fundo Yerba Loca, en la comuna de Las Condes, para que allí se construyera un observatorio de radiación cósmica. La donación y el destino del terreno habían sido previamente aprobados en forma unánime por el Consejo Universitario en sesión del 13 de enero de 1954.

La construcción del observatorio se desarrolló a partir del verano de 1954-1955, y contó con la colaboración directa del ingeniero Carlos Mori Ganna, en ese tiempo decano de la Facultad de Ciencias Físicas y



Matemáticas de la Universidad de Chile. Las grandes dificultades que enfrentó la construcción del observatorio, debido a su gran altitud sobre el nivel del mar y las vicisitudes meteorológicas típicas de la alta cordillera, se resolvieron gracias a la competencia y habilidad de su constructor, Víctor Pirazzoli, quien por lo demás tenía experiencia previa en otras construcciones en la cordillera, como fue el observatorio meteorológico de Panagra, en Cristo Redentor, y otros trabajos a gran altitud realizados en Portillo, río Blanco y Guardia Vieja³. En esta iniciativa participó también activamente Juan Simken Iturriaga, andinista y estudiante de Lliboutry en el Instituto Pedagógico, quien trabajó posteriormente en el Centro de Radiación Cósmica. En un informe presentado al rector Juan Gómez Millas el 15 de marzo de 1956, Lliboutry da cuenta de que en la primavera anterior fue posible realizar las primeras observaciones meteorológicas en el observatorio, mediante la instala-

ción de un termógrafo-barógrafo-higrógrafo con una autonomía de registro de quince días. Fueron éstos los primeros datos meteorológicos registrados en Chile en la alta cordillera a más de 4.000 m de altitud. Por otra parte, durante ese verano, el último que pasó Lliboutry en Chile, se logró instalar la losa del techo del observatorio, restando solo la habilitación interior.

Con una planta de 108 m², construidos en forma rectangular en concreto y piedra, el observatorio contaba con un laboratorio de unos 20 m², un espacio para la instalación de generadores y baterías, una cámara oscura, un dormitorio con cuatro literas individuales, además de los espacios de estar, cocina, baño y duchas. El living incluía un espacio en el cual se podían habilitar literas para ocho personas, en caso de ser necesario. Sobre la terraza se instalaron las antenas de radio y de comunicaciones y la caseta meteorológica. El observatorio se abastecía de energía mediante un tendido



Para obtener datos de interés glaciológico y estudiar los rayos cósmicos de la alta atmósfera, Lliboutry propuso la creación de un refugio observatorio a 4.320 m de altura, cerca de la mina La Disputada de Las Condes. Durante el verano 1954-1955 se edificó una construcción de piedra y cemento, con techo de concreto, de 120 m², que será terminada en 1957. La construcción, a cargo de Víctor Pirazolli, constituyó una proeza: nunca se había edificado tan elevado a esa latitud.

eléctrico con corriente trifásica desde la mina Disputada de Las Condes. Considerando que los operadores del observatorio permanecerían totalmente aislados durante el invierno, período durante el cual no podían ser abastecidos, la planificación de su funcionamiento requirió un cuidadoso estudio de las necesidades dietéticas y su aprovisionamiento, así como de arsenal médico y quirúrgico y condiciones de saneamiento y aprovisionamiento de agua potable.

El Infiernillo comenzó formalmente su operación como observatorio de radiación cósmica y observatorio meteorológico en el otoño de 1958. Los primeros operadores, nombrados en febrero de ese año luego de un riguroso proceso de selección fueron Esteban Siqués, Pedro Mancilla y Humberto Figari, siendo los dos primeros andinistas con larga experiencia. Siqués, arquitecto y miembro del Andeski Club de Santiago, fue nombrado como el primer operador jefe del observatorio; Figari asumió la responsabilidad técnica de radiocomunicaciones y de la operación del instrumental de radiación cósmica, en tanto que Mancilla, también miembro del Andeski Club de Santiago, quedó como segundo operador para funciones de enlace y reemplazo. El laboratorio funcionó hasta 1982, quedando abandonado desde entonces.

Rol de Juan Gómez Millas

Los grandes avances en el campo de la glaciología que Lliboutry logró realizar durante su estadía en la Universidad de Chile no habrían sido posibles sin el apoyo de una alta autoridad institucional. Ese rol lo cumplió su amigo Juan Gómez Millas, quien siendo decano de la Facultad de Filosofía y Educación le ofreció un cargo de profesor en el Instituto Pedagógico, preocupándose personalmente de resolver los temas logísticos de su traslado desde París a Santiago en marzo de 1951. La principal tarea que el decano Gómez Millas visualizaba para Lliboutry en dicho Instituto era reforzar la formación de física de los estudiantes que allí se formaban, para ejercer posteriormente como profesores de enseñanza media en los liceos. Por entonces, el número de alumnos de pedagogía que se inclinaban por estudiar matemáticas era considerablemente mayor que el de aquellos que preferían la física, debido a la falta de buenos maestros en este último campo. De acuerdo a lo que Gómez Millas

le indica a Lliboutry en una carta enviada poco antes de su llegada a Chile, esta situación constituye un grave defecto de la educación secundaria en el país.

Desencantado con el trabajo docente, por las condiciones precarias en que debía realizarlo y la falta de interés de los estudiantes, el cambio de rumbo que resolvió Lliboutry respecto del objetivo inicial de su misión en Chile fue facilitado por su cercanía con Gómez Millas, quien durante todo el tiempo que Lliboutry vivió en Chile ocupó posiciones de poder, primero como decano, luego en 1952 como ministro de Educación y como rector de la Universidad de Chile a partir de 1953. En particular, todo parece indicar que la libertad que Lliboutry dispuso durante 1955 para concentrarse por completo en la redacción de su libro *Nieves y glaciares de Chile*, sin la obligación de dictar clases, fue autorizada por Gómez Millas, y es a él, y no al decano de la Facultad de Filosofía y Educación, a quien dirige un informe en marzo de 1956 sobre las actividades realizadas el verano de 1955-1956, pocas semanas antes del término de su misión en Chile. Al final de dicho informe, y luego de agradecer una oferta de renovación de su contrato, que ya había sido aprobado por el Consejo Universitario, le informa que ha aceptado la oferta de una cátedra de glaciología en la Universidad de Grenoble. Termina su informe con una frase que resume su agradecimiento por el apoyo recibido desde su llegada a Chile, en 1951: «Al dejar, momentáneamente espero, las aulas de la Universidad de Chile, me es difícil, Sr. Rector, expresarle a qué punto quedo agradecido, no sólo por su ayuda continua, sino sobre todo por su invaluable apoyo moral, y quedo para toda la vida a sus órdenes y S.S.».

Tales sentimientos de gratitud también los deja estampados en la introducción de su magna obra *Nieves y glaciares de Chile*, editada por la Universidad de Chile en 1956, el mismo año en que Lliboutry terminó su misión en el país. Allí expresa: «Al terminar esta introducción, quiero rendir homenaje al rector de la Universidad de Chile, don Juan Gómez Millas. No sólo estampar mi más sincero agradecimiento por haberme hecho venir a Chile, por haberse interesado constantemente en mis trabajos, por haberme ofrecido las más amplias facilidades para hacer investigaciones y para publicar este libro, sino también expresar mi más viva admiración por la magnífica labor que con entusiasmo y dinamismo realiza a la cabeza de esta Universidad, honra de las Américas».



Profesores del Insituto Pedagógico, Facultad de Filosofía y Educación, Universidad de Chile. El rector, Juan Gómez Millas, y el director del Insituto Pedagógico, Rodolfo Valenzuela, en la primera fila. Lliboutry, en la tercera, a la derecha. 1952.

Visita de Lliboutry a Chile en 1966

La visita a Chile de Lliboutry en 1966 se origina en una invitación que le hace Óscar González, antiguo estudiante de geología que lo había acompañado en la última excursión a la alta cordillera al interior de San Fernando en febrero de 1956, un par de meses antes del término de su misión en Chile. En mayo de 1965, Óscar González, ahora como profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Chile y responsable del área de Geología, Glaciología y Geomorfología del Departamento Científico del recién creado Instituto Antártico Chileno (INACH), invita a Lliboutry a realizar una visita a Chile para colaborar en la preparación de un plan de investigaciones antárticas. Esta invitación contó además con el respaldo del decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Prof. Enrique d'Etigny, quien veía con gran interés la posibilidad de incorporar el campo de la glaciología a las áreas de investigación que se cultivaban en la Facultad. La invitación también contaba con el apoyo del secretario general del INACH, vicealmirante (R) Jorge Araos Salinas. En su respuesta Lliboutry propone como una alternativa viajar a Chile entre septiembre y diciembre de 1966 para realizar cursos de entrenamiento en glaciología, excursiones a terreno y colaborar en la elaboración de un programa glaciológico en la Antártica.

En una carta enviada en octubre de 1965, Lliboutry le revela a Óscar González que su tarea para desarrollar la glaciología en Grenoble no ha sido fácil: «Adjunto te envío informes sobre mi laboratorio del CNRS, para que veas las dificultades que he tenido para fomentar la glaciología en Grenoble: ¡Ocho años de lucha!... Eso, por tratarse de una ciencia nueva, que hasta 1948 sólo interesaba a exploradores y geógrafos, y porque Francia no tiene los intereses en la Antártica y los extensísimos glaciares que tiene Chile». Quizás habría sido imposible, sin su experiencia previa en Chile.

En diciembre de 1965, el vicealmirante Araos vuelve a escribir a Lliboutry, para reiterarle el unánime interés que existe en el INACH y en la FCFM por su visita a Chile, pero que ella estaría condicionada a la formación previa de un grupo de investigadores que puedan obtener el máximo beneficio de su visita. Al respecto, le comenta que está en estudio un plan conjunto entre la Universidad de Chile, la Empresa Nacional de Electricidad (Endesa) y el Departamento de Riego del Ministerio de Obras Públicas para habilitar un área cercana a Santiago, que podría ser la cuenca superior del río Aconcagua, para contribuir a la formación de glaciólogos. Levantadas finalmente las trabas administrativas y burocráticas, Lliboutry resuelve satisfactoriamente el programa y los detalles logísticos de su nueva visita a Chile mediante interacciones

directas con Óscar González y el decano d'Etigny durante junio y julio de 1966.

Lliboutry llega a Valparaíso el 22 de septiembre de 1966 en la motonave «Donizetti», acompañado de su familia y 600 kg de equipamiento científico, incluyendo algún material fabricado en los talleres de su laboratorio en Grenoble que no se encuentra disponible en el comercio. Su apretado programa de trabajo incluye la dictación de un curso sobre glaciología dirigido a profesionales y estudiantes avanzados de ingeniería y geología, trabajos demostrativos en la zona de la mina Disputada de Las Condes, y la elaboración de un programa de investigación glaciológica para la región andina y la Antártica. El curso, realizado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, incluyó, entre otros temas, la descripción del balance hidrológico de un glaciar; aplicaciones de la prospección geofísica a la glaciología; deformación del hielo y aplicación al cálculo de caudales; dinámica de glaciares temperados y de glaciares fríos. Siempre preocupado por la divulgación científica, Lliboutry dicta la conferencia *El origen de las grandes glaciaciones*, que se realiza en la Sala Valentín Letelier de la Universidad de Chile el 15 de diciembre de 1966.

Durante la visita, Lliboutry realiza un informe para la Comisión de Límites y Fronteras del Ministerio de Relaciones Exteriores sobre temas glaciológicos pertinentes a la región de la Patagonia. Entre otras recomendaciones, sugiere la necesidad de desarrollar medios logísticos para la exploración de los glaciares, en particular el uso de aviones premunidos de skis para facilitar exploraciones en los campos de hielo. En el informe de su visita Lliboutry expone la complejidad de los estudios glaciológicos y el carácter multidisciplinario de ellos. Señala: «La glaciología actual ya no es una ciencia de exploración y de mera descripción cualitativa superficial que fue en sus principios: está basada en la geodesia, prospección geofísica, mecánica de cuerpos continuos, micrometeorología, estadística, análisis de isótopos, etc.». Propone, además, temas específicos de estudios para el establecimiento de un plan de investigación en glaciología, sugiriendo que éste se desarrolle en el Departamento de Geofísica de la FCFM.

Para la zona central sugiere comenzar los estudios en un glaciar de acceso relativamente fácil, de forma y pendiente regular, con una hoya bien delimitada y con muy poca carga morrénica. Sugiere además que

se encuentre lo más cerca posible del observatorio El Infiernillo, cuya estación meteorológica provee desde 1958 datos de temperatura, humedad relativa y radiación solar. A su juicio, el glaciar que satisface todas estas condiciones es el glaciar Olivares Gamma, respecto del cual recomienda realizar una determinación de la velocidad del hielo en un perfil transversal hacia los 4.000 m de altitud; balance específico a lo largo de todo el glaciar; un estudio detallado del balance térmico; la determinación de las estructuras de hielo y determinación del espesor del glaciar a lo largo de un perfil longitudinal. Estos estudios fueron parcialmente realizados por Sergio Sagardía, un joven ingeniero electrónico y andinista que trabajaba en la Sección Meteorología del Departamento de Geofísica. Sagardía se mostró muy interesado en la propuesta de investigación planteada por Lliboutry, logrando realizar en el verano de 1967 dos expediciones al glaciar Olivares Gamma y mediciones con balizas en el glaciar Juncal Norte.

Respecto del futuro de la glaciología en Chile, Lliboutry depositó muchas esperanzas en él, quien, junto a Cedomir Marangunic, un geólogo que por entonces se encontraba realizando sus estudios de doctorado en glaciología en la Universidad de Ohio, serían, a su juicio, los especialistas con quienes se podría iniciar el desarrollo de un grupo de investigación en glaciología en Chile. Lliboutry alienta a Sagardía para que realice estudios de posgrado en la Universidad de Grenoble, proponiendo incluso los cursos de un programa formativo de dos años que se extendería entre septiembre de 1967 y septiembre de 1969.

Ya sea porque falló la gestión de la beca en Francia, o porque no se cumplió la expectativa de Sagardía de obtener un contrato como investigador en el Departamento de Geofísica, esta apuesta fracasó, quedando interrumpidos los estudios preliminares realizados por él en el glaciar Olivares Gamma.

En la Universidad de Chile la investigación sobre nieve y glaciares continuó por algunos años, basada en los trabajos que investigadores del Departamento de Obras Civiles de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas realizaron en un laboratorio de nieve ubicado en Farellones que funcionó hasta principios de la década de 1970, y en investigaciones glaciológicas que impulsó el Prof. Cedomir Marangunic desde el Departamento de Geología de la FCFM.

Curso regional de formación en hidrología de nieves y hielos

Veinte años después de su primera llegada a Chile como profesor de física del Instituto Pedagógico, Lliboutry vuelve al país en 1971 como un glaciólogo de renombre internacional para participar en calidad de profesor invitado de un Curso Regional de Formación en Hidrología de Nieves y Hielos, organizado por la UNESCO a través de su división de Hidrología y de la Oficina de Ciencias para América Latina. Este curso, en el cual también participaron como profesores invitados el Dr. Walter Ambach, de la Universidad de Innsbruck, en Austria, y el Dr. Gunnar Ostrem, glaciólogo jefe del Consejo Noruego de Electricidad y Recursos Hidráulicos, se realizó en dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile entre el 15 de noviembre y el 18 de diciembre de 1971. La coordinación local estuvo a cargo de dos antiguos conocidos de

Lliboutry: Cedomir Marangunic, ahora académico del Departamento de Geología de la FCFM, y Benito Colqui, consejero científico del Instituto Antártico Argentino.

A esta actividad formativa, cuyo objetivo fue estimular la utilización de métodos y técnicas modernas para la adquisición y el procesamiento de los datos necesarios en las investigaciones sobre hidrología de nieves y hielos, asistieron profesionales de Chile, Argentina, Bolivia y Perú. Por parte de Chile concurren profesionales de Endesa, Corfo, el Instituto de Investigaciones Geológicas, la Dirección General de Aguas, la Oficina Meteorológica de Chile y la Universidad de Chile. El curso incluyó una estadía de cinco días en un campamento instalado en la Laguna Negra, cerca del glaciar Echaurren, donde los participantes fueron entrenados en diversas prácticas glaciológicas.

El legado de Lliboutry

Habiendo transcurrido más de 60 años luego de que Lliboutry sentara las bases de la glaciología moderna a nivel internacional, a partir de sus investigaciones realizadas en la Universidad de Chile, su obra continúa siendo fuente de inspiración para el reducido grupo de científicos, profesionales y técnicos que en diversos organismos estatales y privados, universidades y centros de investigación a lo largo del país dedican su vida a avanzar en el conocimiento de los procesos asociados a la criósfera andina y antártica y su evolución. Cabe destacar la labor que realiza la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, responsable de la elaboración del inventario de glaciares en Chile y su seguimiento; el Laboratorio de Glaciología del Centro de Estudios Científicos (CECS) en Valdivia; el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) en La Serena; el programa de investigación sobre nieve y glaciares de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente en el Departamento de Ingeniería Civil de la FCFM, U. de Chile; el Instituto Antártico Chileno y el programa de Magíster en Ciencias Antárticas con mención en glaciología de la Universidad de Magallanes, en Punta Arenas. Por otra parte, el legado de Lliboutry también se manifiesta en los aportes que en el campo de la glaciología han realizado el Departamento de Geografía en la Universidad de Chile, el Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad Austral de Chile y, más recientemente, la Universidad de Atacama.



Artículo de *El Mercurio* sobre el proyecto de un observatorio en la cumbre del cerro Colorado, cerca de Farellones. Se pretendía estudiar astrofísica, meteorología, rayos cósmicos y sismología, iniciando así una cooperación científica prometedora con el Observatorio de París. Debía tener un anteojo refractor de 10,70 m de distancia focal, siendo el tercero más grande de Sudamérica.

Juan Gómez Millas, Humberto Fuenzalida, Jean Borde y Louis Lliboutry

La incipiente cooperación científica entre Francia y Chile en 1950 no se puede entender sin tomar en cuenta la larga historia académica de la Universidad de Chile, fundada en 1842 y famosa en toda América Latina. En el siglo XIX y principios del XX, científicos y naturalistas extranjeros, la mayoría contratados por la Universidad de Chile, se dedicaron a describir y explicar la geografía, la vegetación y las formas del relieve en Chile. Entre ellos se encuentran Darwin, Gay, Domeyko, Pissis, Philippi, Steffen y Brügger.

La Universidad de Chile se benefició de la intensa labor del destacado académico Humberto Fuenzalida Villegas, contratado en 1930 en el Instituto Pedagógico, después de sus estudios en París. (El Instituto Pedagógico fue fundado en 1889 para la formación de los profesores). En 1944 creó el Instituto de Geografía en la Facultad de Filosofía y Educación y fue el primer director de la Escuela de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, dando un gran impulso a las investigaciones sobre las características y procesos de formación del territorio chileno.

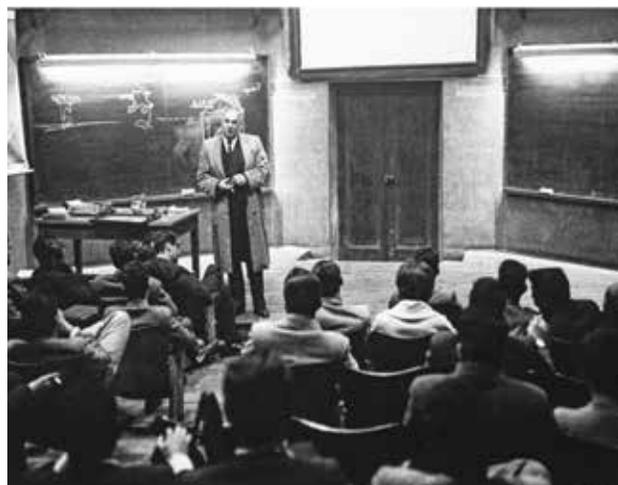
Responsable de la cátedra de geografía física desde 1934, Humberto Fuenzalida será un colaborador determinante para los universitarios franceses como Jean Borde y Louis Lliboutry, en tanto que el rector de la Universidad de Chile, Juan Gómez Millas, será el arquitecto de esta cooperación.

En pocos años, tanto Jean Borde como Louis Lliboutry, junto a Gómez Millas y Fuenzalida, contribuyeron significativamente a la transformación de antiguos cuadros académicos imperantes en Chile, entregando una visión moderna de la ciencia y de la investigación científica.

- (1) Gutiérrez C., Gutiérrez F., 2006. Física: su trayectoria en Chile (1800-1960). Revista *Historia* N° 39, Vol. 2, pp. 477-496. Instituto de Historia. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- (2) Diario *La Nación*, 3 abril de 1951.
- (3) Muñoz R., Jorge, 1958. Habilitación Médico-Sanitaria del Observatorio El Infiernillo. Anteproyecto de Memoria. Escuela de Medicina, Universidad de Chile.



El geógrafo Jean Borde, de la Universidad de Bordeaux, llega a Chile en 1950, un año antes que Lliboutry, para contribuir activamente al desarrollo del conocimiento geográfico de Chile.



El Instituto Pedagógico se beneficia de la actividad incansable de Humberto Fuenzalida. Se incorpora a la Universidad de Chile en 1930, después de sus estudios en París.



Juan Gómez Millas, rector de la Universidad de Chile, firmó en 1949 un convenio académico y científico con Francia.

El legado de Louis Lliboutry para seguir explorando los glaciares de Chile

Vincent Favier / CNRS, Universidad Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement, Francia.



El andinista y glaciólogo Jorge Quinteros.

Visitar Chile no se hace por casualidad. Encerrado entre el océano y las cumbres más altas de la cordillera de los Andes, este país es sinónimo de fin del mundo. Llegar hasta él requiere atravesar o rodear la impresionante frontera geográfica formada por la cordillera. Una frontera tan infranqueable que generó ecosistemas distintos en las cuencas del Atlántico y del Pacífico y la aparición de una multitud de plantas endémicas en Chile.

Las primeras exploraciones se realizaron por el océano. Las grandes altitudes andinas y los gigantes glaciares de la Patagonia han desalentado durante mucho tiempo a los aventureros y a los científicos. En el sur, la Patagonia permaneció invicta a causa de su clima extremo, y hubo que esperar hasta 1956 para

► Vista de un glaciar rocoso en el cerro Tapado, Valle del Elqui.

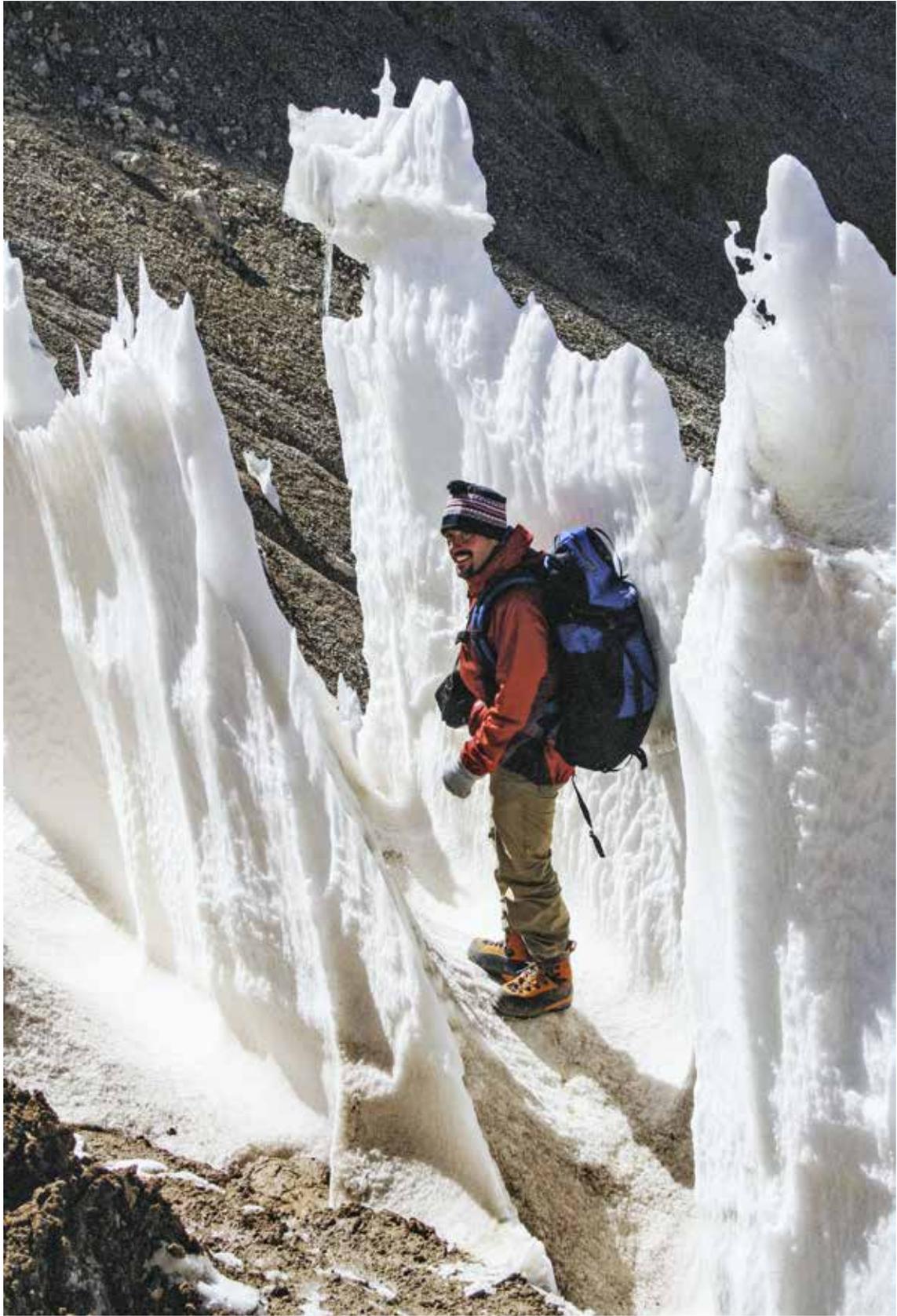
Penitentes de nieve en el Paso de Agua Negra. Al fondo se encuentra el cerro Tapado, que fue el lugar elegido por un equipo suizo para realizar extracción de muestras en febrero de 1999. ▼

que Harold William Tilman y Jorge Quinteros realizaran la primera travesía de oeste a este. Más al norte, el Aconcagua será vencido poco antes de iniciarse el siglo XX.

La cordillera de los Andes es de difícil acceso, lo que contribuyó seguramente a suscitar aún más el interés del alpinista y científico Louis Lliboutry, quien sentaría las bases de la glaciología moderna en Chile. Cartografió los glaciares de los Andes chilenos, aportando la mirada precisa de un físico sobre la dinámica del flujo del hielo. Pondrá en evidencia el interés de los glaciares rocosos en la criósfera de los Andes áridos. En la región del nevado Juncal, describirá los procesos de formación de extrañas esculturas de nieve: los penitentes de hielo. Estas láminas de hielo, a veces con alturas mayores a las que puede alcanzar una persona, alineadas y apuntando hacia el sol, ya habían llamado la atención de Charles Darwin.

Los procesos físicos que controlan la criósfera a lo largo de los Andes áridos de Chile intriguaron a numerosos glaciólogos que provenían en su mayoría del laboratorio fundado por Louis Lliboutry en 1958, el Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente (LGGE-Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement). Con Antoine Rabatel, Hélène Castebrunet, Simon Gascoin y Marion Reveillet nos hemos incorporado desde hace quince años al laboratorio de Glaciología del Centro de Estudios Avanzados





Penitentes de tamaño humano cerca del cerro Tapado, Valle del Elqui.



Campo de penitentes del área del cerro Tapado, Valle del Elqui.

en Zonas Áridas (CEAZA) en La Serena, donde todos hemos constatado que Louis Lliboutry nos adelantó en la comprensión de los procesos físicos involucrados. Nosotros también hemos disfrutado pisando los glaciares del cerro Tapado y del Juncal Norte, muchas veces guiados por la experiencia del ineludible e incansable Jorge Quinteros.

Es por ello que seguimos manteniendo hoy importantes nexos de colaboración con los glaciólogos chilenos, en particular con Gino Casassa, de la Universidad de Magallanes. En el Instituto de Geociencias del Medio Ambiente (Institut des Géosciences de l'Environnement-IGE), junto a Etienne Berthier, investigador en el Laboratorio de Estudios en Geofísica y Oceanografía Espaciales (LEGOS-Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales) en Tolosa. Colaboramos también con unos colegas de Argentina, Mariano Masiokas y Pierre Pitte, del Instituto IANIGLA (Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales) de Mendoza.

Nuestro enfoque se ha ampliado, puesto que las variaciones del clima no conocen fronteras. Hoy las imágenes satelitales permiten evaluar mejor la contribución de los glaciares a los recursos hídricos, así como el retroceso de los hielos desde la cordillera de Darwin hasta la Sierra Nevada Santa Marta, en el norte de Colombia. En el marco de su tesis doctoral, Inés Dussaillant evaluó con precisión las pérdidas de hielo en la cordillera de los Andes, mostrando que la sequía excepcional (Megadrought) registrada entre 2010 y 2015 en los Andes áridos del centro y de la Región de Los Lagos ha tenido un fuerte impacto en el retroceso de los glaciares.

También hoy sabemos que las pérdidas de hielo en la Patagonia están entre las más significativas a nivel mundial. Gabriela Collao presentó recientemente los resultados de sus trabajos de tesis de doctorado en la Universidad Grenoble-Alpes. Reproduciendo minuciosamente la dinámica del flujo del glaciar San Rafael y de las condiciones climáticas que reinan en la Patagonia, mostró que el flujo de este glaciar es incompatible



Instalación de una baliza de ablación en zona de penitentes para medir el derretimiento del glaciar Ortigas. Valle del Huasco.

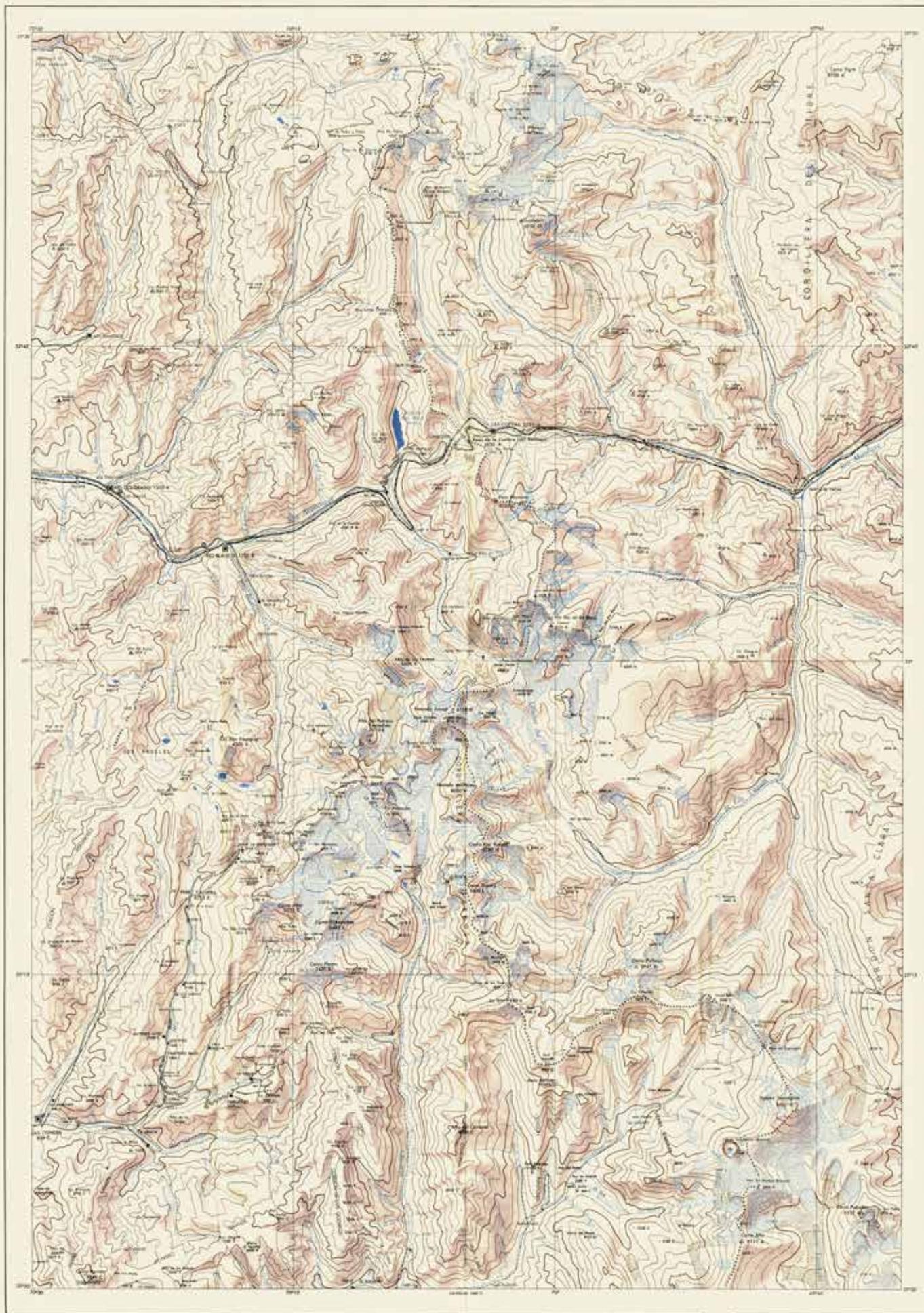


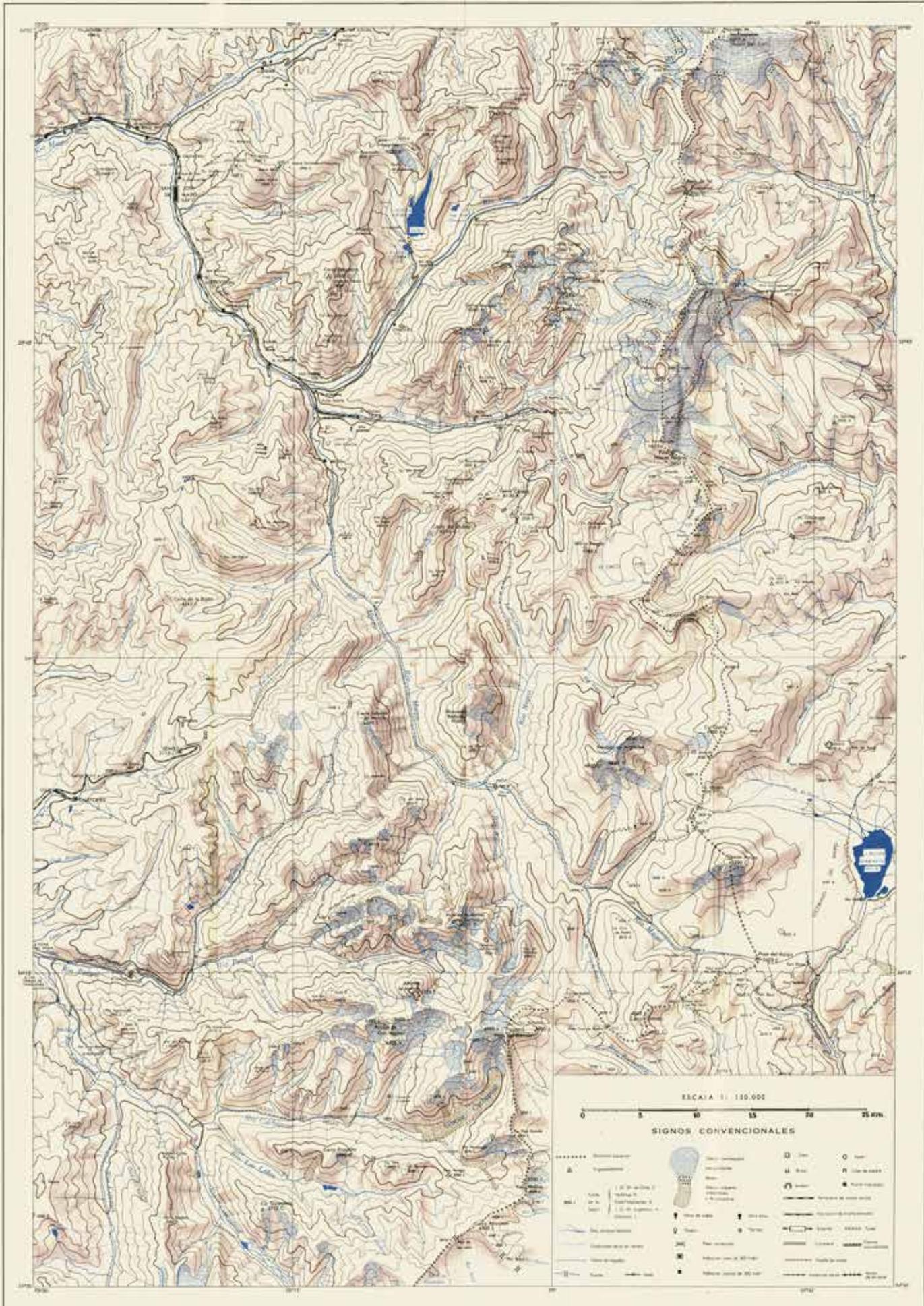
Instalación de una baliza de ablación en un área cubierta de escombros con el fin de evaluar el derretimiento del glaciar Toro, Valle del Huasco.

con los valores de acumulación de nieve señalados hasta ahora. Sus estudios demuestran que actualmente cae mucho menos nieve en Campo de Hielo Norte, en la Patagonia de lo que pensábamos antes, lo que pone en tela de juicio las hipótesis sobre las causas de su desequilibrio desde el fin de la Pequeña Edad de Hielo.

A través de nuestras modelaciones basadas en la reproducción de los procesos físicos nos mantenemos en la línea de los planteamientos propios de Louis Lliboutry. Al concentrar nuestros esfuerzos en la modelación de la dinámica, tratamos de aprovechar los avances científicos que aportó hace décadas y que le valieron el premio Seligman Crystal de la Sociedad Internacional

de Glaciología. Hoy, en Chile hemos extendido nuestra zona de estudio desplazándonos hacia el sur, hasta la península Antártica. Esta traslación, que nos permitirá evaluar mejor el impacto del clima según las latitudes, ya la hemos realizado en los glaciares del archipiélago de Kerguelen, que se encuentra en la misma latitud que la Patagonia, pero en el océano Índico. La Antártica y Kerguelen también son campos de estudio en los cuales Lliboutry ya había trazado el camino, mucho antes de que los glaciares entraran en una fase de retroceso acelerado, causada por el cambio climático. Lliboutry fue un visionario cuando fundó el Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente, y abrió una vía que continuamos siguiendo.





Carta preliminar al 1:120,000 del Instituto Geográfico Militar de Chile, ampliada y corregida según se explica en el texto

1922-1945



Louis Lliboutry, en la Escuela Normal Superior, en París, con su profesor Alfred Kastler. Febrero de 1943.



Nacimiento de un científico entre guerra y paz

Una juventud madrileña marcada por la guerra civil española

Todos los ancestros de Louis Lliboutry eran catalanes de Perpiñán.

«Me gusta creer que nuestro apellido, que se escribía LIBOLTRI en el siglo XVII, viene de liber olterinus (hortelano libre), ya que por el lado paterno, mis ancestros eran hortelanos de los jardines de Saint-Jacques. Uno de ellos vino a instalarse en la ciudad y su hijo, mi abuelo, llegó a ser agente de aduana, y vivió entre Cerbère y Portbou, por lo que tengo primos españoles en Barcelona» (Lliboutry, 1998).

Jacques Lliboutry, el padre de Louis, llega a Barcelona con su hermano Louis entre 1904 y 1910. Participa con Bernat Picornell, amigo del barón Pierre de Coubertin, en la fundación del primer club de natación de Cataluña y de España, el Club Natació Barcelona, y también de un club de pintura, l'Agrupació Artística, frecuentado por Juan Gris.

En 1914, ambos hermanos se instalan en Madrid donde Jacques va a ejercer el oficio de representante comercial. Proclives a las ideas republicanas, forman parte de una de las principales instituciones literarias y científicas de la burguesía madrileña, el Club Ateneo, un movimiento intelectual para el renacer de España, que participará en el advenimiento de la Segunda República española en 1931. Lliboutry padre escribirá más tarde: «El compromiso con la libertad y la independencia de espíritu es atávico en mí».

La Primera Guerra Mundial obliga a Jacques Lliboutry a regresar a Francia. Es movilizado como piloto de reconocimiento y se destaca en combates aéreos sobre el río Somme, por lo que recibirá la medalla militar.

En 1920 se casa en Perpiñán con Jeanne Danoy-Macabies, una joven atractiva y dinámica, quien tiene orígenes catalanes y nórdicos. Como Jacques, ella sueña con vivir en Madrid. Se instalan en un hermoso edificio, en el 3 de la calle de Villalar, donde nace su hijo Louis, el 19 de febrero de 1922. En aquella época, Jacques era representante de una compañía metalúrgica de Barcelona dirigida por franceses, ante los ministerios y los minoristas. René, el hermano de Louis, nacerá en 1927.



Louis, a los 4 años de edad, en Madrid.

En 1934, los Lliboutry se trasladan a Pozuelo de Alarcón, un pueblo cerca de Madrid, en una casona del barrio San José, lugar aislado en medio del campo, poblado únicamente durante el verano. Fácilmente accesible desde la estación de Príncipe Pío en Madrid, Pozuelo se sitúa en la ruta de La Coruña y Segovia, a 39 km de Madrid y a 52,7 km del paso de Navacerrada, en la sierra de Guadarrama, donde se encontraba en esa época una pequeña estación alpina, a 1.858 m de altitud, destino turístico de los habitantes de la capital española.

Los padres y el tío de Louis Lliboutry son miembros de la Real Sociedad Española de Alpinismo de Peñalara, el Club de los doce amigos, fundado en 1913 por un profesor naturalista, un profesor de derecho, dos astrónomos, cuatro funcionarios, un estudiante de derecho, un tipógrafo y dos poetas. El club es presidido por Bernaldo de Quiros, doctor en derecho penal, escritor, sociólogo, jurista y profesor, una de las figuras claves del Regeneracionismo Español.

La cima más alta de la Sierra de Guadarrama, el Peñalara, culmina a 2.428 m de altitud y domina un lago de origen glaciar. Es probable que el pequeño Louis haya participado en las excursiones de sus padres desde temprana edad, incluso antes de vivir en Pozuelo. Más adelante, evocará «los paseos dominicales a la sierra de Guadarrama en el pequeño Citroën 5 CV». Si bien no existía ninguna tradición familiar que hubiese podido



Jacques Lliboutry conoce a Jeanne durante un permiso, poco antes del final de la Primera Guerra Mundial, «con mucha prestancia, vistiendo su uniforme de piloto de aviación». Se casan en 1920.



llevarlo a la investigación científica, posiblemente las excursiones a la Sierra favorecieron su interés por las ciencias, la exploración, la montaña y los glaciares.

En Pozuelo, el niño colecciona insectos y plantas y elabora mapas de los alrededores, lee a Jules Verne y Jean-Henri Fabre, juega con Meccano. Su afición por la naturaleza y la mecánica lo acompañará siempre. Frecuenta el Liceo Francés de Madrid, donde obtiene todos los años el premio de excelencia. El establecimiento se encuentra en los números 8, 10 y 12 de la calle Marqués de la Ensenada, llamada la calle de los franceses hasta 1969.

A principios del siglo XX, el gobierno de Aristide Briand, buscando un acercamiento cultural y político con España, hizo construir dos establecimientos dedicados a la enseñanza y a la cultura francesa. Conocido primero bajo el nombre de Escuela de la Sociedad Francesa de Beneficencia, el colegio fue inaugurado en octubre de 1910 en el número 12 (y en octubre de 1919 tomó el nombre de Liceo Francés de Madrid). En marzo de 1913, el Instituto Francés abrió sus puertas en el número 10. Este liceo, que ofrece la posibilidad de preparar los dos bachilleratos, el francés y el español, era el liceo francés en el extranjero más grande y más famoso en aquella época. En 1932, un subsidio del Estado permite a la Sociedad Francesa de Beneficencia ampliar el liceo hasta el número 8 de la calle Marqués de la Ensenada.

En los años 1930, la calle de los franceses es un verdadero nido de la cultura gala en Madrid, donde se organiza una exposición sobre Víctor Hugo en 1935, y donde Paul Éluard dicta una conferencia sobre Pablo Picasso el 4 de febrero de 1936, pocos meses antes de que estallara la guerra civil. Louis escribe en sus cuadernos: «Entre los siete y los catorce años tuve una infancia feliz en Pozuelo, aunque siempre dedicada al estudio y bastante solitaria. La guerra civil de 1936 nos obligó a repatriarnos; perdimos todos nuestros bienes y mi padre perdió su empleo». «Madrid, sola y solemne / Julio te sorprendió con tu alegría de panal pobre / Clara era tu calle, claros eran tus sueños», escribe Pablo Neruda en *España en el corazón*.

En julio de 1936, los Lliboutry se encuentran de vacaciones, como cada verano, en el sur de España, quizás en Benidorm, un pequeño pueblo poco conocido y maravilloso, o en Santa Eugenia de Ribeira en Ría de Arosa o en Calella de Palafrugell en la Costa Brava, punto de encuentro de pintores. Sin embargo, el avance de las tropas franquistas es tan rápido, que no pueden regresar a Pozuelo, ya que el pueblo quedó atrapado durante el asedio de Madrid. Los franquistas ocupan las alturas de la capital. El sueño se convierte rápidamente en una pesadilla. La casona de la calle El Plantío ha sido saqueada. Los Lliboutry no recuperarán nunca su casa.



La casa familiar de los Lliboutry, en Pozuelo, antes de la guerra civil española. Tuvieron que abandonarla durante el avance de las tropas franquistas.

Un reportero de *Paris-Soir*, quien acaba de regresar de América del Sur, se encuentra en el frente: Antoine de Saint-Exupéry. El escenario político de España es una sucesión de dramas provocados por la guerra civil, y se parece a un cuadro de Goya o de Picasso, «una barbarie», según el piloto de la Aeropostale.

«Trágica solidaridad de este pueblo, frágil e inmortal, como un hacha de sílex en un terreno arado abandonado», dirá René Char, en su poema *Placard pour un chemin des écoliers*.

La compañía metalúrgica despide a Jacques Lliboutry, sin indemnización, en el marco de una verdadera «caza de brujas». Totalmente arruinado, es repatriado con su familia a Francia.

En cuanto al Liceo y al Instituto Francés, han sido requisados por la embajada de Francia entre 1936

y 1939: servirán de refugio para numerosos franceses de Madrid y miles de madrileños. Cuando se reabre el Instituto Francés, a finales de 1939, la primera conferencia es dictada por el matemático y normalista Robert Deltheil, experto en probabilidades geométricas. ¿Una señal del destino? Robert Deltheil será el rector de la Academia de Tolosa en el momento en que Louis Lliboutry se presente al concurso de ingreso a la Escuela Normal Superior.

► Lienzo republicano en una calle de Madrid, 1936.



1940-1945: Escuela Normal Superior de París



Escuela Normal Superior. Promoción de 1940, durante el invierno de 1940-1941.

«A pesar de la movilización de 1939, las clases preparatorias a las grandes escuelas no cierran sus puertas. [...] Las pruebas escritas de los concursos científicos y literarios se realizan durante la última semana del mes de mayo de 1940, en plena oleada alemana».

Al final de la guerra civil, cerca de un millón de españoles huyen de la represión franquista. Algunos científicos también abandonan España, entre ellos el más prestigioso, el padre de la física española, Blas Cabrera, humanista y gran profesor, una autoridad mundial en magnetismo y física experimental, el Einstein español.

Durante el asedio de Madrid, los caminos del exilio plantean el problema de la evacuación de los niños hacia Francia y los Pirineos Orientales. La madre de Louis, quien había seguido estudios de enfermería, y luego de asistente social, se convierte en secretaria departamental voluntaria de la organización Quaker en Perpiñán, para ayudar a los refugiados de España, cuya llegada fue sólo un preludio al éxodo masivo de la población civil. «Al fin y al cabo, nosotros éramos refugiados, repatriados de España», dirá Louis en su cuaderno de 1950.

Frente a esta España republicana que comienza a desmoronarse, hay que construir otra vida. El padre de Louis encuentra un empleo de contador, pero sus modestos ingresos no le permiten enviar a su hijo a preparar el ingreso a las grandes escuelas. Jacques y Jeanne Llibouty obtienen una beca de la fundación Honnorat y del Comité de protección de los hijos de franceses que residen en el extranjero. Louis estudia como interno en el colegio de Perpiñán, y luego en el liceo de Montpellier. Obtiene los Bachilleratos en Matemáticas y en Filosofía, con dispensa de edad, ambos con mención Sobresaliente. Luego sigue las clases preparatorias (el liceo de Montpellier impartía en 1939-1940 los

cursos de alto nivel de matemáticas especiales del liceo Louis-le-Grand). Los profesores se fijan en este alumno inteligente y reflexivo, a pesar de su corta edad.

«Aficionado desde mi infancia a la observación y a las ciencias naturales, me hubiera convertido en naturalista si no hubiera tenido facilidad para las matemáticas; lo que, según la organización actual de los estudios en Francia, me hubiera conducido directamente a la Escuela Politécnica. Sin embargo, entré a la Escuela Normal Superior, con el claro objetivo de dedicarme a la investigación, y elegí la física para alejarme de la abstracción, a la cual era demasiado propenso».

Durante el primer año se interesa sobre todo por la física mecánica, mientras que casi todos sus compañeros se orientan hacia el estudio del átomo o del núcleo. Sin embargo, en sus notas escribe: «A mi llegada a Montpellier, en un curso de matemáticas especiales, cuyos objetivos y carácter ignoro, me afectaron mi juventud y el hecho de no saber organizar mi vida».

Mucho más tarde se referirá en varias oportunidades al inicio de su recorrido de investigador, mostrando en particular que, en esa época, el acceso a las grandes escuelas era un camino sembrado de obstáculos para un alumno de condición económica modesta, a pesar de ser brillante. «Acceder a la burguesía requería varias generaciones y mucha suerte», decía Llibouty.

La Facultad de Ciencias de la Escuela Normal Superior (ENS) es una elección lógica. Como lo señala Dominique Pestre en *Física y físicos en Francia en los años de*

entreguerras 1918-1940, en respuesta a *La República de los profesores* de Albert Thibaudet:

«[...] la facultad de ciencias permite obtener una beca. Esta diferencia hace referencia a los orígenes sociales: por un lado los que pertenecen a la elite, a las buenas familias, los que son actores claves de la vida económica, y por otro lado los que vienen de familias modestas y han adquirido su estatus de la enseñanza, de la universidad, de la beca conseguida para estudiar, y cuya oportunidad laboral se limita a ser funcionario o docente. En otras palabras, la elite empresarial, y de nacimiento, opuesta a aquella de los profesores y del mérito. [...] Pero aquí, los que predominan son los becarios, la gente de izquierda, los pro-Dreyfus: no estamos en el colegio de abogados, sino en la facultad de ciencias, en la sección de física de la Escuela Normal y, lógicamente, los herederos adinerados son minoritarios». (Pestre, 1984).

La probabilidad de una nueva guerra en Francia atormenta de nuevo al joven Lliboutry. Los acuerdos de Munich, ratificados en noviembre de 1938, aceleran el dominio de Hitler sobre Europa, en un escenario que hace caer a España en el campo de las potencias del Eje. Lliboutry recuerda la movilización en Barcelona, los soldados armados, los desfiles republicanos en Cataluña: «No pasarán». Un pasado del cual intenta alejarse, atraído por las luces de la ciencia y de la investigación. Saint-Exupéry publica *Tierra de hombres*, en febrero de 1939. Pero, al final del verano, estalla la Segunda Guerra Mundial. Varsovia, la Madrid de Europa oriental, es asediada y bombardeada sin cesar, hasta su rendición el 28 de septiembre. «Con una marcada tensión nerviosa provocada por los eventos políticos, y entre ataques de llanto», escribe el joven Louis en sus cuadernos.

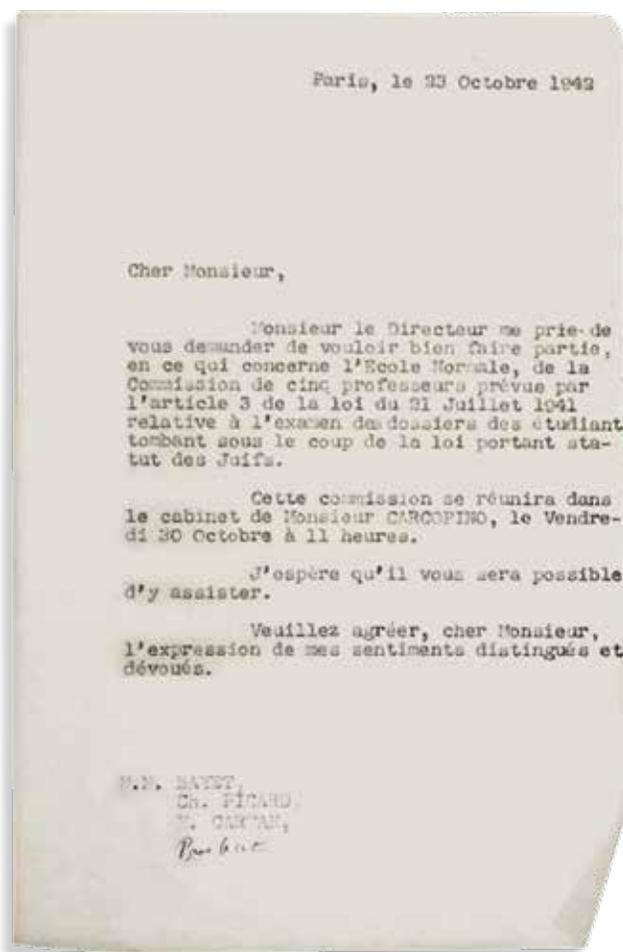
En 1940, la tragedia que se desarrolla en Francia parece surrealista: la debacle del ejército francés arroja a las carreteras a millones de civiles, mientras que en París, algunos universitarios tratan de mantener los concursos de ingreso a las grandes escuelas para miles de estudiantes que no están movilizados. Louis se resigna a separarse de su familia. Pero, en este contexto complejo, ¿seguirá siendo posible su sueño de ser investigador?



Lliboutry obtiene el cuarto lugar en el concurso de admisión a la Escuela Normal Superior y una beca para seguir una licenciatura —diecinueve alumnos son admitidos en ciencias y veintitres en letras— en un marco universitario desorientado y trastornado.



En el otoño de 1940, la escuela de la calle d'Ulm es ocupada por las tropas alemanas, puesto que su nuevo director, el experto en la Roma Antigua Jérôme Carcopino había aceptado adherirse al régimen de Vichy.



La mayoría de los alumnos es hostil al régimen de Vichy. Pero Jérôme Carcopino prefiere respetar la ley del 21 de junio de 1941 y responde esmeradamente a la pregunta del Secretario de Estado sobre las «estadísticas» relativas a los alumnos de confesión judía: tres alumnos son identificados en 1942 y tres más en 1943.

La obra de Stéphane Israël sobre la escuela de la calle d'Ulm, *Les études et la guerre. Les normaliens dans la tourmente (1939-1945)* (*Los estudios y la guerra. Los estudiantes de la Escuela Normal Superior en la tormenta*), relata esa época tormentosa:

«A pesar de la movilización de 1939, las clases preparatorias a las grandes escuelas no cierran sus puertas. [...] Las pruebas escritas de los concursos científicos y literarios se realizan durante la última semana del mes de mayo de 1940, en plena oleada alemana. [...] Una vez realizadas las pruebas escritas, se hace difícil organizar las pruebas orales: la debacle dispersó a los candidatos, la derrota dejó a Francia dividida por una línea de demarcación infranqueable. Jean Bayet, quien preside el jurado de la sección Letras, y Georges Bruhat, su homólogo para las Ciencias, deciden mantener a toda costa el resto de las pruebas. La única solución consiste en organizar, para cada concurso, una sesión oral en la zona norte y otra en la zona sur». (Israël, 2005).

Georges Bruhat cuenta en su informe *Concurso de las Ciencias*, en 1940: «Las pruebas escritas se han realizado sin incidentes entre el 25 y el 29 de mayo. Llegaron bien a manos de los examinadores y no se extraviaron en el caso de los alumnos que se habían replegado. [...] La notificación no pudo ser enviada a los rectores de la zona libre antes de la ruptura de las comunicaciones postales. Como era imposible que los candidatos atravesaran la línea de demarcación, se acordó que un examen oral tendría lugar en Tolosa el 22 de agosto y que otro tendría lugar en París el 11 de septiembre».

Lliboutry obtiene el cuarto lugar en el concurso de admisión a la Escuela Normal Superior y una beca para seguir una licenciatura (en la academia de Montpellier) —diecinueve alumnos son admitidos en ciencias y veintitrés en letras— en un marco universitario desorientado y trastornado (lo que no le impide adjudicarse el puesto treinta y uno en el concurso de ingreso a la Escuela Politécnica).

En el otoño de 1940, la escuela de la calle d'Ulm es ocupada por las tropas alemanas, puesto que su nuevo director, el experto en la Roma Antigua, Jérôme Carcopino, había aceptado adherirse al régimen de Vichy.

Los estudiantes de la Escuela Normal son acogidos de forma provisoria en las dependencias de la Escuela Politécnica, vacantes después de su traslado a Lyon. Los alemanes evacuan finalmente la Escuela Normal el 15 de noviembre. Los alumnos que estaban en París se



Laboratorio de Química de la Escuela Normal Superior. 1942.

encuentran de nuevo en la calle d'Ulm el 8 de diciembre. Sin embargo, la escuela está siendo sometida a restricciones en todos los niveles: se detienen todas las investigaciones científicas estratégicas, lo que tiene como consecuencia una reducción significativa del financiamiento. Por otra parte, la luz y el agua se racionan y la calefacción ya no funciona.

No obstante, la construcción de nuevos laboratorios científicos ofrece a los alumnos condiciones de trabajo mejores que antes de la guerra: el laboratorio de física, con una superficie de 8.000 m², terminado a principios de 1940, le permitirá a Pierre Auger instalar en 1941, junto a Joseph Pérès, una de las primeras cubetas reo-

gráficas (Alfred Kastler utilizará estas cubetas en trabajos que darán origen al rayo láser después de la guerra).

Entre 1912 y 1944, tres grandes físicos, que también eran docentes excepcionales, se sucedieron como directores del laboratorio de física de la Escuela Normal Superior, cuya construcción habían concebido y dirigido: Henri Abraham, Eugène Bloch y Georges Bruhat. «Este ambicioso proyecto demostraba la importancia recientemente atribuida a la cultura científica en una enseñanza que había privilegiado las humanidades durante mucho tiempo».

Los tres murieron en los campos de concentración nazis, entre 1943 y 1944.

Censura y Servicio del Trabajo Obligatorio en calle d'Ulm

Louis Lliboutry solicitó una beca para preparar la agregación en física y química, con el compromiso de restituirla en caso de no trabajar durante diez años en la enseñanza. Su padre, empleado en la oficina de Administración de Puentes y Caminos de Perpiñán, no tiene recursos suficientes para financiar sus estudios en París.

Como interno y becario del Estado, se le proporciona alimentación, alojamiento, calefacción, servicio de lavandería, y un subsidio de ciento cincuenta francos por mes, pero las condiciones de vida en el internado son deplorables. Las comidas se resumen a menudo al «ciclo infernal» colinabos-nabos-zanahorias. La escuela ya no está conectada al sistema de calefacción urbana, a diferencia de los liceos y de La Sorbona; y el suministro de carbón es insuficiente, por lo que la escuela debe buscar en sus propias reservas, lo que limita el uso de la ducha a la tarde del día sábado. Carcopino cuenta:

«Hay ciento cincuenta alumnos internos en la Escuela Normal Superior. Conozco sus méritos y también sus defectos, sobre todo externos. Me gustaría verlos con una tenida impecable. ¿Cómo podría exigirlo en un medio tan sórdido y deteriorado, en una casa donde hasta los cuidados de limpieza más básicos se hacen complicados?».

En octubre de 1941 la dirección de la ENS trata de alertar al presidente del Socorro Nacional acerca del estado de «la futura elite de la nación». La salud de la mayoría de los alumnos está lejos de ser satisfactoria a causa de las restricciones alimentarias y el director solicita que la ENS pueda también beneficiarse de la distribución de harina y galletas, que se realiza en los liceos y colegios. En marzo de 1943, Jérôme Carcopino envía un correo al Secretario de Estado de Educación Nacional para solicitar raciones idénticas a aquellas de las otras grandes escuelas:

«El Secretario de Estado de Agricultura y Abastecimiento ha otorgado a los alumnos de la Escuela Normal Superior las mismas raciones que aquellas atribuidas a los alumnos de la Escuela Politécnica. Este régimen especial, por resolución del 1 de febrero de 1943, ha quedado reducido a raciones de pan, carne y queso. Fue suprimido

luego de la disolución del ejército, con el armisticio, en cuanto al vino, el café, las legumbres, las pastas, las papas, la sal, el pescado y las mermeladas. Sería justo que nos fuera otorgado el régimen incluyendo los productos alimenticios citados anteriormente, el cual es asignado a los liceos, a los restaurantes universitarios, a la Escuela de Altos Estudios Comerciales, etc., y que había desaparecido a causa de un régimen especial».

A pesar del toque de queda, los estudiantes de la Escuela Normal Superior frecuentan la sala de cine de la calle de las Ursulines, o aquellas más concurridas de la ribera derecha del Sena. Van a ver las películas en boga, como *La Fille du puisatier*, de Marcel Pagnol; *Les Visiteurs du soir* de Marcel Carné o *Goupi mains rouges* de Jacques Becker. Algunos no tienen escrúpulos en ver películas alemanas: Louis Lliboutry cuenta en su cuaderno (que llamó *Lecturas y discusiones 1940-1941*) que le horrorizó *El judío Süß*, película de propaganda antisemita. «Este llamado al odio me repugna. ¡Pero lo que más me indigna, es la gente que no reacciona!».

Lliboutry protesta violentamente contra un discurso de Darlan (difundido por radio en mayo de 1941), que relata su entrevista con Hitler, donde éste presenta la colaboración como la única actitud lógica frente a la propaganda comunista y gaullista: «¡Todo esto es insostenible!».

Los jóvenes estudiantes de la ENS también tienen a su disposición la biblioteca de la escuela. Louis lee mucho, intercambia con algunos de sus compañeros reflexiones filosóficas y comentarios sobre obras que le llaman la atención: Gide, Péguy, Louÿs, Stevenson, Alain, Benda, Nietzsche.

«Si se trata de constituir una biblioteca, ésta debe ser lo más reducida posible, e incluir sólo obras excepcionales», dice Lliboutry. Por lo demás, a la literatura él prefiere los libros escritos por científicos como Georges Tessier «[...] que exponen numerosas ideas, claras y fuertes, en pocas palabras».

Lliboutry se rebela contra los autores de obras seudocientíficas que se aprovechan de la credulidad de los lectores. El 18 de julio, escribe:



Entrada principal de la ENS, rue d'Ulm, cerca del Panthéon en París. 1945.



Laboratorio de Física donde estudió Lliboutry. La Gestapo realiza cuatro expediciones punitivas entre el 14 de febrero y el 4 de agosto de 1944.

«Definitivamente debo cerrar los ojos y taparme los oídos frente a estos monumentos de la estupidez humana. Hoy encontré en la librería Joseph Gibert, en la sección dedicada al magnetismo, un libro de un desconocido que, en 1874, publicó el resultado extraordinario de veinte años de reflexión: ¡el alma está compuesta de “éter magnético”!... ¡Aparte del estudio o del arte, sólo existe la acción!».

La mayoría de los alumnos es hostil al régimen de Vichy. Pero Carcopino prefiere respetar la ley del 21 de junio de 1941 y responde esmeradamente a la pregunta del Secretario de Estado sobre las «estadísticas» relativas a los alumnos de confesión judía: tres alumnos son identificados en 1942 y tres más en 1943. Varios informes son enviados a las autoridades de tutela, caratulados «Alumnos en situación particular». En los sobres escritos a mano se puede leer: «Judíos, Becarios Zona libre, Hijos de extranjeros, Huérfanos, Alumnos israelíes, Renovación de becas en las facultades de la zona libre, Correspondencia de alumnos».

Carcopino hace llegar varios informes a la Dirección de Educación Superior. Carta del 7 de octubre de 1942:

«Relaciones con las autoridades de ocupación: a) Incidentes, detenciones: M. Plard, alumno de la Escuela Normal Superior, quien había sido detenido el 7 de junio, fue liberado el 31 de agosto. M. Paillas, auxiliar de laboratorio, fue detenido en su domicilio el 24 de septiembre a las 23 horas por representantes de la policía alemana acompañados por un agente de la policía francesa. Otros informes: el agregado cultural

de la Embajada de Alemania visitó la Escuela Normal Superior el lunes 21 de septiembre. Fue recibido por el director de la escuela».

Carcopino se preocupa de mejorar las condiciones de trabajo de sus estudiantes. Solicita al prefecto del Sena y al servicio de la Defensa Pasiva de París una autorización de las autoridades alemanas para establecer una galería de comunicación entre la antigua escuela y los laboratorios de física y química bajo los cuales se encuentran los refugios contra bombardeos. Los agentes de la prefectura de policía, situada en el 5 rue des Irlandais, observan regularmente infracciones en cuanto al uso de la luz en los laboratorios. «Les solicito recordar a los alumnos de su escuela que se exponen a graves sanciones si no se atienden estrictamente a las prescripciones de la Defensa Pasiva».

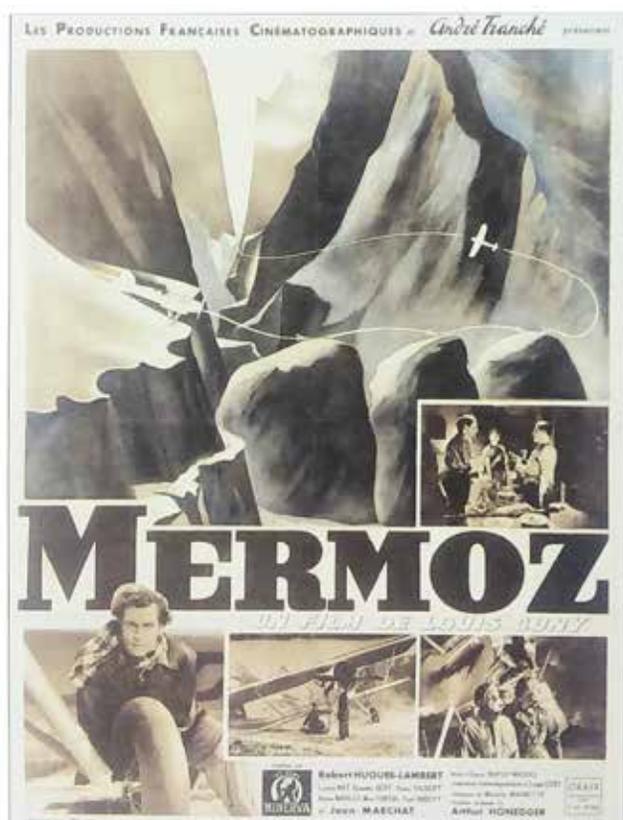
En abril de 1942, la Alemania nazi impone al gobierno de Vichy la implementación del Servicio del Trabajo Obligatorio (STO), que luego será endurecido por una nueva ley.

«A partir de ahora, todos los jóvenes aptos para el servicio militar en 1940 a 1942 son requisicionados para el trabajo forzado en Alemania. Como todos los estudiantes, los alumnos de la Escuela Normal se ven duramente afectados por esta medida: más de dos tercios de los 194 alumnos presentes en el inicio del año escolar de 1942 pertenece al grupo señalado por esta ley y deben presentarse inmediatamente en el servicio de mano de obra» (Israël, 2005).

El director de la ENS solicita y obtiene un plazo de gracia para sus alumnos hasta el verano de 1943, para

que puedan presentarse a los exámenes y concursos. Luego cada alumno puede elegir entre tres posibilidades: aceptar uno de los destinos de trabajo previstos por la ley, unirse a la Resistencia o declararse incapacitado para el STO. Si bien resulta relativamente fácil ser declarado «incapacitado para ir a Alemania», es más difícil ser considerado «incapacitado total», y así librarse de cualquier obligación relacionada con el trabajo obligatorio.

Citado por primera vez el 27 de julio de 1943 para un examen médico, Louis Lliboutry obtiene finalmente un certificado de incapacidad para ir a Alemania, en noviembre de 1943. Envía una carta al director de la Escuela Normal el 20 de agosto de ese año:



La película *Mermoz* se estrenó en París en 1943. Cuenta las aventuras del famoso piloto francés en la cordillera de los Andes, cerca de Copiapó. El actor que interpreta a Mermoz, Robert-Hughes Lambert, fue internado en el campo de concentración de Drancy durante el rodaje de la película. El actor fue reemplazado por Henri Vidal, que tenía una extraña similitud física con Lambert. Para poder finalizar la película, Lambert aceptó grabar los últimos diálogos clandestinamente en la cárcel donde estaba detenido. Murió en 1944 en un campo de concentración en Alemania. ¿Habrá Lliboutry sido influenciado por esta historia?

«Estimado señor Director,

Como me sentía cansado, pasé un examen de salud con el médico inspector departamental, quien me declaró incapacitado total (categoría 0). Le agradecería que tuviera a bien comunicar este resultado y dejarme en regla ante el STO, que considera seguramente que no he respondido a la convocatoria».

Lliboutry se encuentra en Perpiñán en la casa de sus padres, pero en París la Resistencia intensifica sus acciones contra el ocupante.

«Hasta el verano de 1943, pocos alumnos de la Escuela Normal han sido detenidos por los alemanes o la policía francesa. La situación empeora bruscamente durante el último año de ocupación. Entre julio de 1943, fecha en la cual Marc Zamansky es detenido en París, y el principio de agosto del año siguiente, marcado por la deportación de Georges Bruhat y de Jean Baillou, muchos alumnos son víctimas de la represión alemana o mueren en los combates de la Resistencia» (Israël, 2005).

Luego de que unos panfletos gaullistas fueran repartidos en la ENS, Abel Bonnard, ministro de Educación Nacional, acérrimo partidario de la Colaboración, envía una carta a Jérôme Carcopino el 14 de marzo de 1944:

«Personas ajenas a la vida universitaria y que muchas veces no son francesas, entran a las facultades para provocar manifestaciones. [...] Está formalmente prohibido introducir y repartir panfletos al interior de las facultades, en particular en la facultad de derecho. Los decanos serán responsables de hacer cumplir esta prohibición. Cualquier transporte de paquete o documentos deberá ser controlado, para comprobar la naturaleza de su contenido. [...] Sin embargo, me dirijo principalmente a los estudiantes: deben entender que sería desastroso y lamentable para ellos convertirse en los instrumentos y juguetes de unos agitadores tenebrosos, quienes tienen sólo desprecio e indiferencia por el destino de nuestros jóvenes. [...] ¡Que defiendan y garanticen la autonomía de su vida universitaria! El autocontrol que así realizarán será la mejor policía y no será necesario recurrir a otra. [...] En un gran país desafortunado, que algunos enemigos enmascarados tratan de corromper, la rectitud, la disciplina, la seriedad misma de los jóvenes son señales que pueden devolver a la nación entera la confianza en sí misma y la esperanza en el futuro».

«Gracias a varios certificados médicos complacientes, que exageraban mis trastornos y no mencionaban que estaba sanado, logré ser declarado incapacitado para el STO en Alemania por los servicios de salud alemanes».

COMITÉ NATIONAL CENTRAL - SERVICE DU TRAVAIL OBLIGATOIRE
 En cas de départ du destinataire, prière de retourner
 à, rue d'Aligre (XII)

Monsieur Labourey Louis
 45 rue D'Ulm

5^e

CONVOCAATION IMPRIMÉE & REVÊTEME de SUITE

Paris,

En explication des dispositions de la
 Loi du 16 Février 1943, portant institution
 du Service du Travail Obligatoire, vous
 devrez vous présenter

le . . . 27 JUIL. 1943 . . . à . . . h.

à l'ÉTABLISSEMENT MUNICIPAL ÉLECTRO-RADIOLOGIQUE
 37, Boulevard Saint-Jacques à PARIS (5^e), en
 vue d'y passer une visite médicale.

Le fait de ne pas déférer à la date
 ci-dessus à cette convocation vous expose-
 rait aux sanctions prévues à l'article 5
 de la Loi du 16 Février 1943.

Le Directeur Départemental
 du Service du Travail Obligatoire :

NOTA

Peypignan, le 20 Août 1943

Monsieur le Directeur

M. le Procureur m'a transmis une
 convocation pour le 27 Août à Paris en
 vue du Service du Travail Obligatoire par
 une lettre qui ne m'est parvenue à mon
 adresse actuelle que le 17.

M'étant justement fatigué, j'ai
 passé aussitôt une visite médicale auprès du
 médecin inspecteur départemental qui m'a déclaré
 incapable de travail (catégorie 0). Je vous serai très
 obligé de vouloir bien faire notifier ce résultat
 et me faire mettre en règle auprès du S.T.O.
 qui doit actuellement me considérer comme
 n'ayant pas répondu à la convocation. Je joint
 votre convocation endossée par le médecin inspecteur.

En cas de difficultés, le
 S.T.O. des Pyrénées orientales (Rue Fourc, Peypignan)
 recevra toutes pièces justificatives utiles.

Je vous prie d'agréer, M. le Directeur,
 mes plus respectueux salutations.

Louis Labourey

Louis Labourey
 30, Av. des Calanques
 Peypignan (P.O.)

Los últimos días de la ocupación alemana

En este contexto pre-insurreccional que anuncia la liberación de París, Louis Lliboutry permaneció en la Escuela Normal Superior. Escapa a las represalias de los alemanes, pero es testigo, desamparado y sin poder hacer nada, del destino funesto de algunos de sus profesores.

«La Gestapo realiza cuatro expediciones punitivas entre el 14 de febrero y el 4 de agosto de 1944. Los tres primeros allanamientos afectan a los laboratorios científicos, donde [...] los jóvenes preparadores Pierre Piganiol y Raymond Croland han desarrollado una red importante de informaciones para la Francia libre a partir del otoño de 1940» (Israël, 2005).

El 26 de febrero, los Prilliez, guardianes del laboratorio de física, son detenidos por haber acogido y escondido a varios militares llegados en paracaídas.

La escuela será estrechamente vigilada por los alemanes. Las detenciones se multiplican. El último allanamiento de la Gestapo tiene lugar el 4 de agosto de 1944, pocos días antes de la liberación de París.

La Gestapo, acompañada por varios franceses, irrumpe en la rue d'Ulm cerca de las 23 horas y registra toda la escuela para encontrar a Claude Roussel, alumno de la Escuela Normal y miembro de la Resistencia.

«Pidiendo sin éxito la dirección de Roussel, la Gestapo decide tomar como rehenes a las esposas de Baillou y Bruhat, llevándolas inmediatamente a la rue de la Pompe para interrogarlas. El chantaje de la Gestapo es aterrador: ellas serán fusiladas al día siguiente a mediodía si no se indica ninguna pista relativa a Roussel. La amenaza incluye la deportación de todos los alumnos y miembros de la administración presentes en la Escuela» (Israël, 2005).

Ambas serán liberadas al día siguiente. Pero al término de un nuevo allanamiento de la Gestapo, Baillou y Bruhat son detenidos para investigarlos.

«El 11 de agosto, Aline Baillou, según su propio testimonio, toma la iniciativa de pedir una audiencia al cónsul general de Suecia, Nordling, para solicitarle que intervenga ante Otto Abetz (embajador de Alemania). Lo que hizo. Sin embargo, la respuesta de Abetz deja poca esperanza: “No me hable más de la Escuela Normal. Es una escuela de asesinos. Debería ser quemada. Encuentro que la Gestapo ha sido demasiado suave. Yo

hubiera actuado de manera diferente. Seguramente le habrán engañado acerca de Baillou, no es más que un infame terrorista”» (Israël, 2005).

Diez días antes de la liberación de París, ambos profesores son deportados a Buchenwald. En *Los Tres Físicos*, Bernard Cagnac cuenta:

«En el campo de concentración de Buchenwald donde ha sido llevado, Georges Bruhat levanta el ánimo de otros prisioneros hablándoles de física; su conversación bajo el sol [...] tendrá un auditorio más amplio. Luego es transferido al campo de Sachsenhausen, donde también reúne a un grupo de estudiantes, de ingenieros y oficiales, ávidos por aprender. Pero el 20 de diciembre, padece una bronconeumonía que empeora, [...] muere en el hospital del campo en la noche del 31 de diciembre de 1944, mientras la mayor parte del territorio francés ya está liberado».

El ex director del departamento de física de la calle d'Ulm muere, como también Léon Abraham y Eugène Bloch, víctimas del exterminio nazi.

«Más joven y robusto, Baillou regresa a la escuela en la primavera de 1945, acogido por alumnos felices de verlo de nuevo pero espantados por su extremo enflaquecimiento. Hubert Gallet de Santerre dejó el siguiente relato: Cuando el rumor de su regreso se extendió en la primavera de 1945, muchos de nosotros nos reunimos en el acuario para aclamarlo. Pero cuando lo vimos entrar, vestido todavía con su innoble pijama de rayas de prisionero, apoyándose en dos familiares, un gran silencio, a la vez respetuoso y angustioso, se instaló entre nosotros, producto de una fuerte emoción. El hombre ágil, vigoroso que nos había dejado en agosto, se había convertido en un esqueleto ambulante, un despojo humano: sus ojos eran lo único que brillaba en su rostro demacrado.

El drama del 4 de agosto y la deportación de Bruhat y Baillou siguen siendo un recuerdo doloroso, pero también un tema controversial en la memoria de los alumnos de la Escuela Normal. [...] El 22 de agosto de 1944, Jérôme Carcopino, a pesar de haber actuado con prudencia, o más bien con oportunismo, al hacer izar la bandera nacional en la fachada del 45 rue d'Ulm, es detenido en su oficina por un equipo de las FFI (Fuerzas Francesas del Interior) y llevado al Velódromo de



Lliboutry, Fruhling, Schatzman, Roussel y Damblans, en uno de los techos de la Escuela Normal Superior, en mayo de 1945. A Louis Lliboutry le cuesta perdonarse por no haberse comprometido con la Resistencia, a pesar de haber participado en la liberación de París como camillero de las Fuerzas Francesas del Interior durante los combates que ensangrentaron las calles de la capital francesa.

Invierno. [...] Como todos los ex ministros del gobierno de Vichy, es acusado de haber atentado contra la seguridad interior y exterior del Estado» (Israël, 2005).

La detención de Carcopino divide a los alumnos de la Escuela Normal. En respuesta a una solicitud de apoyo al científico, un segundo texto es presentado a la firma de los alumnos el 23 de enero de 1945, desaprobando los términos del primer texto y apartándose de sus signatarios:

«Los suscritos, alumnos de la Escuela Normal Superior, considerando que ciertos alumnos han firmado hoy una solicitud de apoyo en favor del señor Carcopino, ex ministro del gobierno de Vichy, y constatando que dicha solicitud no representa la opinión unánime de los alumnos de la escuela, declaran que no aprueban los términos de ésta y se apartan de sus signatarios:

Suscriben: Apéry (S1936), Blin (L1937), Routhier (S1937) Lenouvel, Bourrion, Nataf (S1938), Nordon, Schatzman (S1939), Vroeland, Ferré, Lliboutry (S1940), Fortassier, Deloffre, Rinuy (L1941), Soutif (S 1942) [...]».

Esta segunda solicitud reúne cuarenta y cinco firmas, incluida la de Louis Lliboutry y de muchos alum-

nos de la sección científica, menos sensibles que sus compañeros de la sección literaria al prestigio intelectual del autor de *La vida cotidiana en Roma en la época imperial*, y que quieren «[...] expresar cierta forma de solidaridad con Georges Bruhat, quien falleció en Buchenwald a finales de 1944». Entre los suscritos se encuentran varios alumnos que han sido víctimas directas de la legislación antisemita de Vichy, y que difícilmente perdonan al director, quien ha sido cómplice de las medidas antisemitas.

A Louis Lliboutry le cuesta perdonarse por no haberse comprometido con la Resistencia, a pesar de participar en la liberación de París como camillero de las FFI durante los combates que ensangrientan las calles del V distrito de la capital francesa. A finales de 1941, el estrés de los años de preparación a la Escuela Normal y la penuria alimentaria provocaron en él graves trastornos mentales, y debió acogerse a licencia médica durante un año, eludiendo así el STO. Tuvo la intención de librarse de ello uniéndose al «maquis» Pero, en este caso, ¿hubiera podido seguir adelante con sus estudios?

Los profesores de Lliboutry: Bruhat, Cotton, Kastler y Néel

Es difícil entender la formación intelectual y moral de Lliboutry en la ENS sin hablar de la personalidad de sus profesores, en particular de Georges Bruhat, Alfred Kastler y Louis Néel. Sin olvidar a varios físicos brillantes que ocupan la esfera académica de la ENS, como Aimé Cotton.

Georges Bruhat («mi difunto maestro Georges Bruhat», escribirá más tarde Louis Lliboutry) es nombrado profesor titular de la agregación en 1909 y enseña durante un año en el liceo Buffon en París antes de obtener un puesto de preparador en la ENS, lo que le permite preparar una tesis de doctorado en ciencias en el laboratorio de física de la escuela, bajo la dirección de Aimé Cotton. Movilizado en 1915, está encargado de formar una nueva sección de localización por sonido, y de dirigirla en el frente. Los avances que aporta a esta técnica le valdrán la Cruz de Guerra. Después del regreso a la paz, es nombrado profesor asistente en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lille y luego profesor titular en 1921. En 1927, Georges Bruhat reemplaza a Eugène Bloch como profesor asistente de física en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París. Publica una obra muy valiosa para la enseñanza, en cuatro tomos: su Curso de física general. André Guinier, uno de sus ex alumnos de la ENS, cuenta:

«Para caracterizar la enseñanza de Bruhat, podríamos decir que su objetivo era desarrollar la verdadera mente del físico, es decir una mente intermedia entre aquella del matemático que pone en marcha su pesada y potente máquina [...] y aquella del naturalista que busca más hacer observaciones que deducciones. Las conferencias de Bruhat, más directas, más íntimas que las clases magistrales de La Sorbona, nos quitaban poco a poco nuestras preocupaciones de colegiales. Era para nosotros una iniciación a la física experimental, la física que se hace, no aquella que se enseña en los manuales».

En 1935, Bruhat es nombrado subdirector de la ENS. A partir del 1 de octubre de 1941 ocupa la cátedra de física en reemplazo de Eugène Bloch, destituido por el gobierno de Vichy. Director adjunto

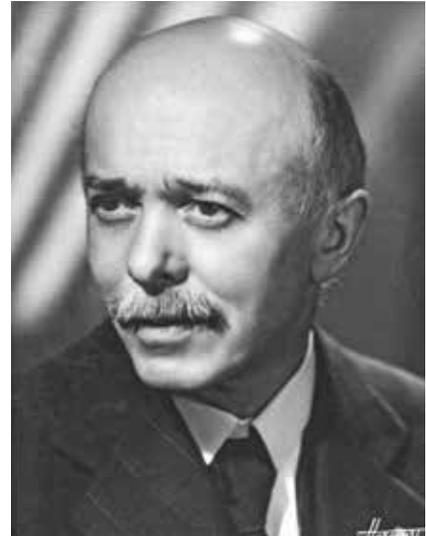
de la escuela, asume interinamente el puesto de Jérôme Carcopino como director del establecimiento entre 1941 y 1942, mientras Carcopino es ministro. El 4 de agosto de 1944, la Gestapo lo detiene, como también a Jean Baillou, secretario general de la escuela, por no haber comunicado informaciones relativas a un alumno miembro de la Resistencia. Este mismo mes son deportados al campo de Buchenwald.

Dos de los profesores de Lliboutry, ex alumnos de la Escuela Normal Superior, recibirán el Premio Nobel de Física: Alfred Kastler y Louis Néel.

Alfred Kastler enseña a partir de 1931 en el liceo Michel-Montaigne en Burdeos. Luego presenta, en 1936, en París, una tesis de doctorado sobre las consecuencias de la conservación del momento cinético en la difusión de la luz y en la fluorescencia de los átomos. Es nombrado profesor asistente en Clermont-Ferrand y luego profesor titular en Burdeos. En 1941 Georges Bruhat lo llama para trabajar en el laboratorio de la Escuela Normal Superior, en reemplazo de Pierre Auger, refugiado en Estados Unidos. En su obra *Los Premios Nobel de Ciencia franceses*, Michel Rouzé comenta:

«Su disponibilidad, su gentileza no tenían límite. Escuchaba a sus interlocutores sin interrumpirlos. Su generosidad podía ir hasta lo que hubiera podido ser considerado como ingenuidad. Durante la Ocupación, Aimé Cotton fue detenido por la Gestapo. Kastler se preocupaba por lo que podía suceder al viejo hombre a quien admiraba. Decidió pedir a los alemanes que liberaran a Cotton a cambio de su propia detención. Otro amigo de Cotton, Pierre Jacquinet, quiso imitarlo [...]. Pero la mujer de Cotton se opuso a esta idea insensata. Por suerte, Cotton fue liberado poco después».

Louis Néel es profesor en la Facultad de Ciencias de Estrasburgo a partir de 1938, y posteriormente en la Facultad de Ciencias de Grenoble, a partir de 1945. En 1939 es movilizado y enviado a la Marina Nacional. Su trabajo sobre la desmagnetización de los buques de guerra permitió salvar cientos de vidas en 1940. Entre 1940 y 1943, Néel instala en la Facultad de Ciencias



Dos de los profesores de Louis Lliboutry recibieron el Premio Nobel de Física: Alfred Kastler en 1966 y Louis Néel en 1970. A la derecha, Georges Bruhat.

de Grenoble (Institut Fourier, place Doyen Gosse, actualmente IUT) su «laboratorio de ferromagnetismo», en la puerta del cual figuraba hasta 1959-1960 la inscripción siguiente, bastante misteriosa: «Magnetismo del buque», que intrigaba mucho a los estudiantes que pasaban por ahí cuando iban al anfiteatro que se encontraba al lado.

Según Néel, es urgente crear en Francia «laboratorios especializados con potentes herramientas», que reúnan la investigación fundamental, la investigación aplicada y la investigación industrial. Obtiene al año siguiente la creación de una cátedra para Michel Soutif, el mejor experto francés en el ámbito de la resonancia magnética, en la universidad de Grenoble. Simultáneamente, Néel consigue que Soutif venga a Grenoble con parte de sus colaboradores y buena parte del material que ensambló en París. Trabajólico y apasionado por lo que hace, Louis Néel es sin duda un «gran patrón» preocupado por el futuro de los colaboradores por los cuales siente aprecio. Egresado de la Escuela Normal, manifiesta su preferencia por los ex alumnos de esta escuela. Contrariamente a Kastler, Néel parece estar totalmente alejado de la vida política, y el laboratorio sigue siendo su principal horizonte.

Aimé Cotton, egresado de la ENS en 1890, enseñó física en la Escuela Normal, donde sus alumnos lo consideraban como un profesor excepcional. Asimismo, fue uno de los garantes de la libertad política y del

internacionalismo, «[...] alineándose con los simpatizantes de Dreyfus, defendiendo a Sacco y Vanzetti, y llamando a una intervención de Francia contra Franco. Comprometido desde muy temprano contra el nazismo, respalda sin cesar los movimientos de resistencia a partir de 1940». (Cotton, 1998).

Dominique Pestre, en su obra *Física y físicos en Francia en los años de entreguerras* (Pestre, 1984), muestra cómo la física en la Francia de esa época se encuentra dominada, como también en los años de posguerra, por un grupo centralizado que acumula importantes cátedras y puestos en la Academia y en varios consejos científicos, y por algunos profesores que han dejado sus huellas por lo menos en un centro de investigación o un laboratorio (es el caso, por ejemplo, de Georges Bruhat, profesor de Louis Lliboutry en la ENS).

Sin embargo, en la víspera del conflicto, mientras éste se prepara para ingresar a la ENS, los esfuerzos de Jean Perrin, premio Nobel de Física, y de Jean Zay, ministro de Educación Nacional del gobierno del Frente Popular, por fin se ven recompensados: el Centro Nacional de Investigación Científica Aplicada es creado en 1938, y luego el CNRS en 1939. Al mismo tiempo, se crea una subsecretaría de Estado para la investigación científica, que buscará promover la instalación de laboratorios en los sectores considerados como decisivos para la investigación en Francia y financiar becas para estudiantes, publicaciones y viajes científicos.

1945-1951



Las Grandes Jorasses, las Périades y la Dent du Géant, en el macizo del monte Blanco. 1948.



Un camino de aprendizaje en los Alpes

Tesis, esquí y alpinismo en Grenoble

En abril de 1945, la guerra oficialmente todavía continuaba. La primera consulta electoral después de 1936 es convocada por el general De Gaulle. Las mujeres francesas votan por primera vez.

A principios de la primavera, Louis Lliboutry aprueba los exámenes para obtener la agregación de ciencias físicas (la sesión de 1944 había sido postergada), junto a otros físicos que tendrían un gran futuro, como Brossel y Schatzman: Brossel y Lliboutry obtienen el tercer puesto, ex æquo, y Shatzman el número 12. Como Lliboutry se encuentra dentro de los primeros, se libera de tener que ejercer la docencia en la enseñanza media. Para él es un alivio, ya que no siente

ninguna vocación por este oficio, y así puede optar por dedicarse a la investigación.

El profesor Néel, futuro premio Nobel, miembro del jurado de la agregación, le propone inmediatamente un puesto de asistente en la facultad de Grenoble, para preparar una Tesis de estado bajo su dirección. Néel escribirá más tarde:

«Tenía una mente original, una inteligencia abierta, un carácter un poco imprevisible, y era capaz de tomar iniciativa frente a los problemas que se le presentaban y sabía profundizar los contenidos que consideraba interesantes. [...] En la época en que Lliboutry llegó al laboratorio en 1946, me interesaban la interpretación



Grenoble, plaza Grenette, después de la liberación de Francia.

de ciertas partículas curiosas de la histéresis ferromagnética, la reptación de los ciclos de imantación disimétricos y las variaciones de imantación provocadas por choques. Aunque estos fenómenos eran conocidos desde hace miles de años, no habían sido interpretados satisfactoriamente y faltaban datos precisos al respecto. [...] Me parecía que Lliboutry tenía las aptitudes necesarias para profundizar el tema, y le pedí que los estudiara. No me defraudó».

Pero antes de asumir sus funciones en octubre, el joven agregado quiere aprovechar sus vacaciones, las primeras desde la Liberación, para descubrir la alta montaña, escenario de una nueva iniciación.

El 15 de agosto de 1945, luego de un interminable viaje en tren, Lliboutry llega de noche a la pequeña estación de Les Praz de Chamonix y se instala en la Escuela de esquí y alpinismo para realizar una práctica de quince días que se ofrecía a los alumnos de las escuelas normales superiores. Es el único del grupo que no es alumno de la Escuela Normal de Educación Física.

«Despierto en un hermoso día de agosto en Les Praz de Chamonix, con una vista impresionante de los Alpes y de la alta montaña, desde la ventana de mi habitación. La imponente pared empinada del Dru se erige en la sombra, sólo a 5 km, con su pequeño glaciar en el medio, y de fondo un cielo intensamente azul y unas fascinantes cimas nevadas. Un espectáculo asombroso para alguien que hasta entonces sólo había visto montañas de pastoreo con pendientes frondosas. Nos dieron zapatos, piolets y crampones, y nos llevaron a un curso de escalada en hielo en la lengua del glaciar de Bossons. ¡El hielo es un material extraordinario! Cruje como vidrio bajo el piolet, y por otro lado fluye lentamente desde las pendientes resplandecientes del mont Blanc como un líquido muy viscoso. No es un hielo “negro” —esta escarcha pegada a las rocas o a la calzada—, ni un hielo “azul”, proveniente de la nieve y en el cual todo el aire ha sido expulsado, sino un hielo “blanco”, con “burbujas”. Este hielo que se encuentra en la lengua del glaciar de Bossons, se formó a 4.000 m de altitud, donde los nevés están a una temperatura inferior a cero grado (“fríos”, como dicen los glaciólo-



La película *Premier de cordée* cuenta la historia de un guía de montaña en los Alpes. Fue estrenada en 1944, adaptada del famoso libro del alpinista y escritor Roger Frison-Roche.

gos) y donde los episodios de derretimiento superficial son escasos. Pensé: “estoy escalando sobre agua”. Un día, mucho tiempo después, tendría que luchar para que el hielo fuera clasificado entre las rocas metamórficas, y para que no se relacionara el estudio del hielo natural, la glaciología, con el estudio de las aguas naturales, la hidrología, a pesar de la importancia biológica y económica del agua».

Lliboutry realiza algunas escaladas en la Aguja de Argentière y, luego de dos excursiones fáciles, asciende el monte Blanco. «Encordado con un aspirante a guía de montaña, llegué rápidamente a la cima. Era bueno empezar por el mont Blanc, para deshacerse de una vez por todas de esa obsesión por la altitud alcanzada».

A finales de octubre, asume su cargo en Grenoble y encuentra una habitación donde los Durand, en Seysinet-les-Îles. El inicio del año universitario no frena su nuevo entusiasmo por el alpinismo. Participa en excursiones de montaña con diferentes grupos: la Asociación de los albergues juveniles, la Asociación de alumnos

Páginas siguientes: izquierda, el macizo del mont Blanc; derecha, el *Aiguille du Roc*.







El macizo des Écrins, en los Alpes del Delfinado. La Barre des Écrins es la cima más alta, con 4.015 m.

ingenieros del IPG y, sobre todo, la sección Isere del Club alpino francés (CAF). «Pero los buenos alpinistas de la sección no participaban en las excursiones colectivas, por lo que desde la tercera salida fui designado jefe de cordada. Tenía la autoridad requerida, a falta de competencia».

También aprende rápidamente a esquiar, y en la primavera de 1946, subiendo con pieles de foca, asciende el Rocher Blanc des Sept Laux, la Croix de Belledonne y varias cimas alrededor del Alpe de Villar-d'Arêne, en un campamento de Semana Santa del CAF.

En ese verano parte hacia la Vanoise y el Oisans con sus compañeros del CAF y realiza, entre otros, el ascenso a la Barre des Écrins (su primera cima de más de 4.000 m) como jefe de cordada, después de pasar la noche en el refugio Caron, repleto, donde el guardián «apretuja rápidamente a los turistas». También realiza una travesía de la Meije, muy movida, con su amigo Breynat y dos otros alpinistas encordados. Tras tres horas de escalada, en el paso llamado «la gran muralla», Louis, cansado, duda acerca del camino a seguir, pero de repente se da cuenta de que está cayendo. Es el gran salto al vacío, de cabeza.

«Veo frente a mí el glaciar de Etançons, 500 m más abajo. No estoy aterrorizado, sino más bien furioso contra mí mismo. Pensé: “Mi vida se acabó ¡Qué final tan estúpido!”. Pero milagrosamente mi caída es frenada y se detiene por fin 10 m más abajo en una pequeña cornisa, la última después del enorme acantilado. Breynat, a pesar de su ubicación precaria, me había atrapado con la cuerda, quemándose las manos».

En 1947, Lliboutry regresa tres veces a la escuela de Les Praz: dos veces durante dos semanas en invierno para aprender a esquiar (su monitor es André Lachenal) y tres semanas en verano para perfeccionarse en alpinismo. Los ascensos como primero de cordada le aportan inmensos beneficios psicológicos y sanan poco a poco las heridas abiertas de la Resistencia.

En 1948 participa en una exploración de la cueva del Biolet con el espeleo club alpino de Lyon. ¡Pero esta estadía de treinta y nueve horas bajo tierra le quita para siempre las ganas de seguir haciendo espeleología!

«Lo que más me gustaba era el esquí de primavera, pues disfrutaba más del ascenso, delineando la huella, que del descenso demasiado breve. Disfrutaba la marcha regular, con los esquís bien apretados, y admirando el paisaje. Disfrutaba trazando en la gran pendiente de nieve virgen una rampa muy regular, incluyendo curvas en lugares más fáciles; descubriendo el estado siempre cambiante de la nieve, programando el ascenso y eligiendo la exposición para tener en el descenso una nieve de primavera “en su punto”, derretida en la superficie pero firme abajo».



El trencino de Montenvers, al pie de la Mer de Glace, el glaciar más grande de Francia, cerca de Chamonix.



Lliboutry, en la cumbre del Aiguille Verte. 4.122 m. Fue ascendida por primera vez por Edward Whymper con los guías Christian Almer y Franz Biner en 1865.

«Mis primeras carreras me han brindado un indispensable bienestar psicológico, porque estaba avergonzado de no haber participado en la Resistencia francesa. Nunca había arriesgado mi pellejo. Tenía que retomar confianza en mí, probar que yo era un hombre». (Lliboutry cuadernos de notas, 1950).

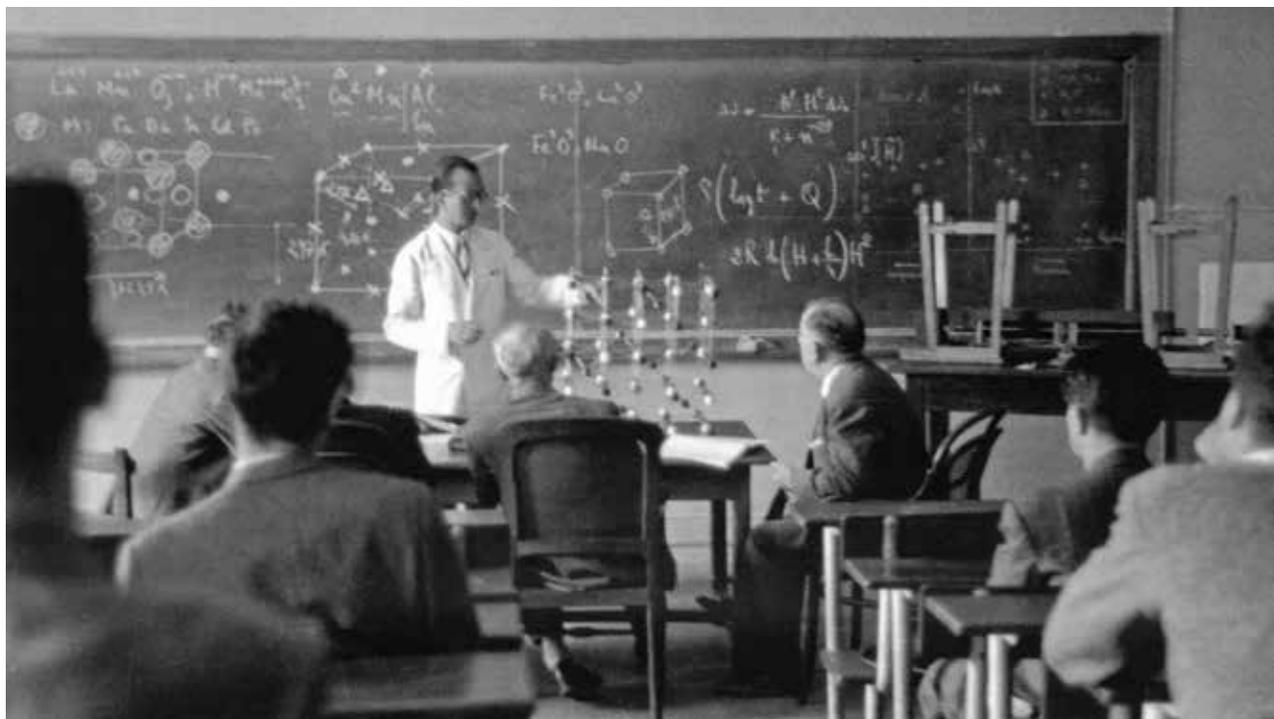
Doctorado en ciencias físicas

Las excursiones de montaña sólo son posibles durante los fines de semana y las vacaciones. Lliboutry dedica el resto del tiempo a preparar su tesis y realizar experimentos en el laboratorio del profesor Néel.

«El profesor Néel me pidió elegir entre dos temas de tesis que me había propuesto. Como me interesaba la mecánica, escogí el tema que la incluía. [...] Consistía en estudiar las variaciones de imantación de una barra de acero suave sometida a choques, y compararlas con aquellas obtenidas sometiéndola a tracción. [...] Las variaciones de imantación se miden en función de la corriente eléctrica que producen en una bobina, más exactamente en función de la carga total transportada por dicha corriente. En 1946 sólo disponíamos para ello de un fluxómetro Grassot, muy poco sensible, por lo que tuvimos que utilizar unas barras gruesas de 30 mm de diámetro. Las tracciones y las compresiones eran obtenidas con una prensa para ensayos de materiales del Instituto Politécnico, que podía ejercer una fuerza de 35 toneladas.

Luego de cientos de experimentos, yo la manejaba con la misma destreza que un operador de maquinaria de obras públicas manejando una pala mecánica. Para producir choques en los extremos, colgué con hilos de nylon dos barras idénticas, de 90 cm de largo, de cuatro taburetes invertidos atornillados en una mesa. En reposo, las barras estaban en contacto y perfectamente alineadas. Cuando apartábamos una de las barras para luego soltarla, ésta quedaba inmóvil al chocar contra la otra, mientras que la barra chocada, a la cual habían sido transmitidas toda la energía y la cantidad de movimiento, iba hacia adelante. Era frenada y detenida al final de su carrera por una simple muesca, gracias a la elasticidad de los hilos de nylon. Lo que se asemejaba a un gong magnífico, con un sonido cristalino, un carillón cuando la muesca no jugaba su rol, y no perdíamos ninguna oportunidad de hacer escuchar este sonido a cada visitante [...].»

«Néel venía a verme todas las tardes y seguía mi trabajo de cerca, lo que no hacía ningún otro director



Louis Lliboutry presenta su tesis de doctorado ante un jurado compuesto por los profesores Néel, Fortrat, Andrieux y Escanglon, el 7 de junio de 1950.

de tesis. Pero nunca se preocupó por mis precarias condiciones materiales, y veía con malos ojos mi pasión por el esquí y la montaña.

[...]En esa época, yo soportaba condiciones deplorables y una ausencia de calidez humana en el laboratorio de Néel. A los veintiocho años, todavía alojaba donde los Durand, sin tener una habitación verdaderamente independiente. A mediodía —como no tenía acceso a los restaurantes universitarios, reservados exclusivamente para los estudiantes— sólo podía almorzar en un boliche administrado por un sepulturero, frecuentado únicamente por algunos asistentes de facultad como yo, asistentes de investigación y barrenderos municipales».

Por otra parte, Lliboutry aborda con objetividad su permanencia en el laboratorio de Néel.

«¿Cuál era mi futuro en el laboratorio de Néel? Yo quería dedicarme a la investigación científica desde los trece años. Es por ello que en 1940 opté por la Escuela Normal Superior, aunque había aprobado los exámenes de ingreso a la Escuela Politécnica y obtenido un buen lugar (treinta y uno) en el concurso. Sin embargo, yo entendía la investigación como la de Louis Pasteur sobre los microorganismos o la de Fabre sobre los insectos. No tenía ningún contacto con el mundo industrial, lo que me hubiera mostrado que la investigación está relacionada con los desarrollos técnicos y depende cada vez más de ellos. Yo prefería el trabajo intelectual puro. Y en el laboratorio de Néel, no podía lanzarme en la teoría, ya que él se encargaba de ello. Además, en la Escuela Normal, había recibido la misma enseñanza que él: los programas científicos no habían cambiado desde hacía veinte años. En matemáticas, en 1940, todavía no se enseñaban temas esenciales para la física, como la transformada de Fourier y la distribución de Dirac, las matrices, los valores propios de un operador lineal o los grupos de simetría. Se estudiaba la física en los libros de Georges Bruhat, redactados en los años 20 y que no iban más allá del modelo del átomo de Bohr. Los alumnos de la Escuela Normal tenían acceso únicamente a una introducción a la microfísica moderna a través de las conferencias de Louis de Broglie, quien sólo exponía su teoría y hacía sombra a las de Heisenberg, de Dirac y Feynman, entre otros, que tenían mucho más futuro. Como yo tenía el mismo bagaje intelectual que Néel, no se esperaba que yo pudiera aportar un punto de vista original en los temas que él había explorado. Lo más sensato era migrar hacia otra área».



El joven doctor en ciencias de la Universidad de Grenoble es también miembro del Club Alpino Francés.

La Sociedad americana de metalurgia, basada en Cleveland, Ohio, a través de su publicación *Metal Progress*, lo contacta en enero de 1946 para ayudar a los científicos franceses, profesores e ingenieros víctimas de la guerra o en situación precaria. En una carta dirigida al editor E.E. Thum, Lliboutry menciona la existencia de la Sociedad de Socorro de los ex alumnos de la Escuela Normal Superior, que haría buen uso de sus donaciones.

«Efectivamente, muchos de sus miembros fallecieron a causa de la agresión nazi, fusilados, asesinados, muertos en deportación, dejando viudas o hijos que necesitan ayuda. [...] Por otra parte, existe un sanatorio que acoge a intelectuales tuberculosos en Saint-Hilaire du-Touvet, donde paquetes de víveres serían obviamente bien recibidos».

Pero luego Lliboutry agrega algunas observaciones que muestran cierta osadía, considerando su propia situación.

«Excepto en estos casos particulares de desamparo, creemos que no debemos aprovecharnos de los sentimientos caritativos y filantrópicos de nuestros colegas de América. Aunque los profesores no son muy bien remunerados en Francia, nuestra situación nos permite ahora cierta comodidad; las restricciones alimentarias hoy ya no pueden dañar nuestra salud, ni tampoco afectar nuestra capacidad de trabajo».



La ascensión del Cervino (4.478 m) fue, sin duda, uno de los mayores desafíos alpinos de Lliboutry.

Concluye su carta pidiéndole que haga llegar a Grenoble un material científico americano imprescindible para la investigación en Francia, como también publicaciones periódicas y revistas científicas a la biblioteca del Instituto Fourier, «las que serían muy apreciadas por los físicos especializados en metalurgia».

Las privaciones y las escapadas a los Alpes los fines de semana no le impiden avanzar con su tesis.

En el otoño de 1949 ha acumulado suficientes informaciones y resultados para empezar a redactarla.

«Aquí es necesario dar algunas explicaciones sobre el magnetismo. En 1945 no se enseñaba en la universidad y no se encontraba en los libros para estudiantes más información que la que había al final del siglo XIX sobre el magnetismo de los metales. [...] Mientras la excitación magnética a la cual está sometida una muestra sigue siendo baja, las variaciones de la imantación (global) obedecen a leyes experimentales enunciadas en 1887 por Lord Rayleigh. [...] En 1916, Weiss y Freudreich habían abordado la ley de Rayleigh, asimilando un medio magnético a una aglomeración de imanes microscópicos con ciclos de histéresis de todo

tipo. Mientras yo preparaba mi tesis, [Néel] mostraba interés por el arrastre magnético: después de la variación brusca de imantación que provoca una variación de la excitación magnética, mientras que ésta ya no varía, la imantación sigue variando durante varios minutos e incluso varias horas, siendo cada vez más baja. [...] Mi tesis estaba estrechamente relacionada con estos temas».

Louis Lliboutry defiende su tesis el 7 de junio de 1950, «una tesis excelente», según el profesor Néel. «Posteriormente, no logré encontrar a jóvenes capaces de continuar la obra de Lliboutry». Un artículo publicado en el diario *Les Allobroges* del 8 de junio de 1950, relata el acontecimiento en estos términos:

«Bajo una avalancha de preguntas complejas que para él no lo eran, Lliboutry no dio nunca la impresión de ser tomado por sorpresa, atacando como un esgrimidor de la escuela italiana, mostrando pleno dominio del tema que tenía el honor de tratar ante una audiencia selecta. [...] Lliboutry recibió entonces el título de Doctor en Ciencias con mención “muy honorable”, y felicitaciones del jurado».

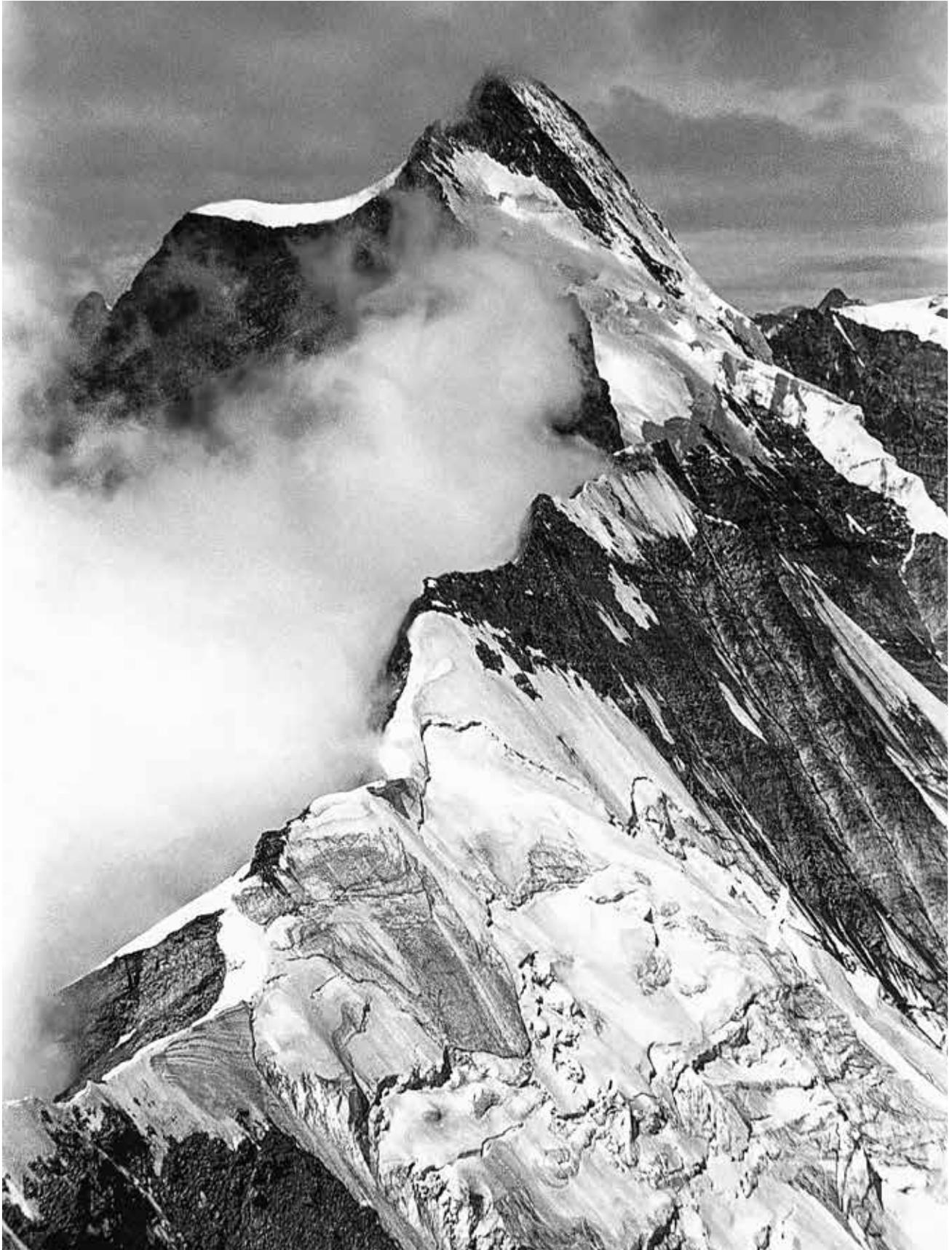
Su tesis, elaborada «con taburetes e hilos de pescar», es efectivamente excelente y posteriormente dará lugar a numerosos trabajos.

Jacques y Jeanne Lliboutry viajan para estar presentes en esta oportunidad. ¡Un largo camino ha sido recorrido desde el liceo francés de Madrid!

«En la celebración que siguió la presentación de mi tesis, lamenté mucho la ausencia de una joven a quien yo había conocido durante mi primer año en Grenoble, cuando ella tenía sólo diecisiete años: Claude Micanel. Muy artista, como toda su familia materna, estudiaba piano; no era para nada científica, ni alpinista. No sé qué nos atrajo... Más tarde, una vez casados, ella me confesó que había preferido no venir ese día para luchar contra ese amor que le parecía irrazonable».

Cómo no pensar en esta frase de John Tyndall (1820-1893), físico irlandés que se convirtió en alpinista a causa de su pasión por los glaciares: «Comparado con el vidrio, el hielo es lo que es un oratorio de Haendel comparado con los gritos de la calle o de la feria: el vidrio es un ruido, mientras que el hielo es una música».

El monte Cervino en los Alpes Suizos. ▶



El llamado de la Universidad de Chile

Después de una última escalada (el ascenso al Cervino por la arista de Lion), parte de vacaciones a Perpiñán y luego a Cataluña, donde saca sus primeras fotografías en color.

Louis Lliboutry entendió que no iba a obtener rápidamente un puesto de profesor asistente:

«Estaba hartado de la universidad, y pensé en dejarla. Encontré absurdo desde el primer día el hecho de seleccionar a los alumnos más dotados de Francia para los estudios científicos, formarlos a un alto costo, y luego mandarlos a dar clases a los jóvenes menos dotados para las matemáticas y la física, y que habían reprobado los exámenes de ingreso a las grandes escuelas».

Razón por la cual decidió solicitar en 1947 su traslado al extranjero «muy lejos y en un país montañoso: Chile, Perú o Afganistán». La Dirección General de Relaciones Culturales del Ministerio de Asuntos Exteriores le informó que se encontraba vacante un puesto de profesor de física en la universidad de Arequipa en Perú. Louis seguramente pensó seriamente en esta posibilidad, como lo muestra la respuesta del Agregado Cultural de la Embajada de Francia en Perú, Robert Bazin, del 10 de enero de 1948:

«Le ruego que no se impacienta. Su caso me interesa no sólo por solidaridad normalista, sino también a causa de su especialidad. Sin embargo, merece algo mejor que lo que ha sido inicialmente propuesto y voy a tratar de encontrarle un puesto en el cual usted pueda ser un aporte y al mismo tiempo continuar su trabajo de investigación. La universidad sólo significaría una enseñanza de la física bastante básica. Existen otras posibilidades mucho más interesantes, en materia de magnetismo puro, y en materia de geodesia. [...] En cuanto a sus preguntas, las contestaré en la medida de lo posible. Pero debo señalar que los Andes en Perú no se prestan para esquiar, ni que yo sepa para hacer alpinismo; allí uno circula más bien en vehículo, incluso a 4.000 m de altitud».

Finalmente le avisan, en octubre de 1950, que hay un puesto vacante en la Universidad de Chile en Santiago y que su candidatura, apoyada por el profesor

Jean-Lucien Andrieux, el fundador de la electrometallurgia, y Félix Esclangon, está siendo estudiada.

«El profesor Fortrat, mi ex decano, luego de escucharme anunciarle mi probable partida de Francia, no pudo contenerse, y me dijo: “¿Perdóneme, pero Chile se encuentra a la derecha o a la izquierda?”. Seguramente quiso decir “al este o al oeste”. Le respondí que se encontraba a la izquierda. Hubo un silencio mientras lo grababa en su memoria, y luego comentó: “¡Qué pena! ¡Ya no podrá hacer alpinismo!”».

A mitad de diciembre, su candidatura ha sido aceptada. Escribe a Jean Coulomb, director del Instituto de Física del Globo, para decirle que desea abandonar la física por la física del globo, y en particular por la glaciología.

«Aunque mi tesis, sobre la imantación de los glaciares en los campos magnéticos bajos (arrastre magnético, efecto de tensiones, de choques, etc.) también trata de la mecánica y la física del metal, me gustaría ocuparme en el futuro de la física del globo. Admito que soy absolutamente novato en esta materia. [...] Pero como soy aficionado al aire libre, al esquí de primavera y al alpinismo, los fenómenos naturales nunca me han dejado indiferente: es tentador pasar del glaciario a la glaciología... Por otra parte, me parece que Chile es un terreno privilegiado para realizar observaciones en magnetismo terrestre, vulcanología y sismología, donde la literatura es poco abundante, según he podido juzgar.

Y para ser sincero, espero partir allá con el título de profesor asistente. Será más fácil para mí encontrar a mi regreso una cátedra de geofísica que una cátedra de física general».

La respuesta de Coulomb (algo graciosa) no tarda en llegar:

«Me agrada saber que el Departamento de Física del Globo quiere aprovechar sus capacidades. Sin embargo, debo avisarle que existen pocas cátedras de geofísica. [...] A priori, me parece que tendría que limitar sus ambiciones al magnetismo terrestre y a la sismología que obviamente interesa a los chilenos, quienes, luego de brillar en ese ámbito en la época de



Pot d' Archicubes, Grenoble 1950
 Néel, Schiltz, Antoin Pariselle, Mme X, Mme Fortrat, Weil, Reymen, Caraccio
 Esclançon, Fortrat, Mme Pariselle, Mme Esclançon, Santon, Mme Mathias
 Mme Mugier, Mme Felici, D'orgeval, Denhamps, Mugier, Kuntzmann,
 Gabiani. Cachés: Mathias et Jacob
 Manquent: Felici, Traynard, Maurice Pariselle, Gignoux,

Montessus de Ballore, volvieron a cero. Me contaron que los americanos fueron a evangelizarlos al respecto. Lo que deja prever una bella batalla. [...] Sin embargo, no es en Chile donde usted podrá adquirir conocimientos en geofísica. Podemos tratar de darle una formación rápida en tres semanas, a la medida, pero sería muy poco y sería realmente —se lo aseguro— una obra de abnegación».

Finalmente se le ofreció a Lliboutry una formación rápida y básica en sismología. Esta ciencia, basada en la elasticidad de los sólidos, está en esa época apartada no sólo de la geología, sino de cualquier preocupación práctica.

Antes de partir escribe otra vez más a Charles Bouhet para señalar que quiere ser nombrado profesor asistente en el marco de la enseñanza superior

en el extranjero, ya que la enorme cantidad de candidatos le deja poca esperanza de obtener este grado en Francia.

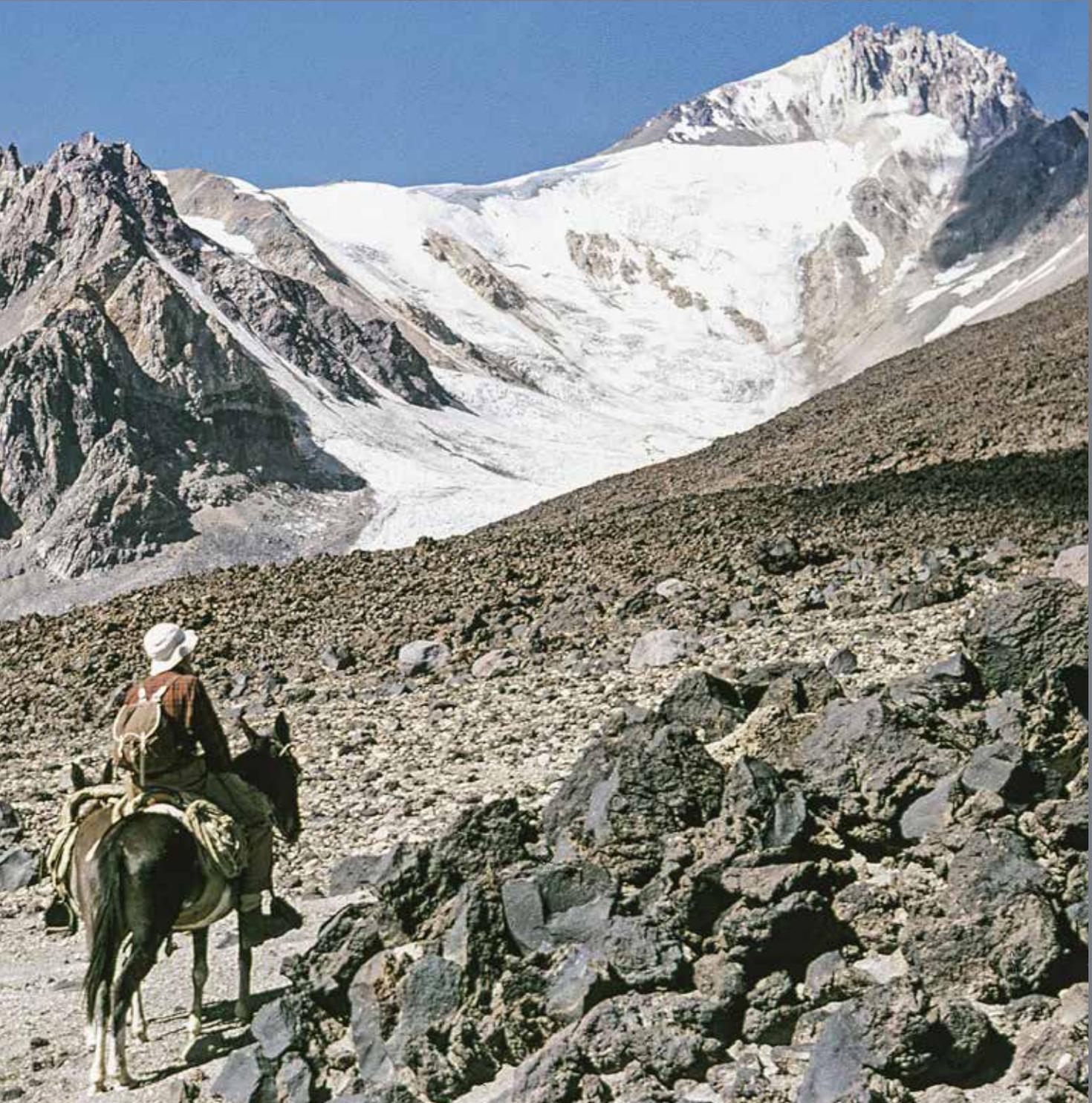
El 4 de noviembre de 1950 escribe también a Alphonse Creach, director del Instituto Francés de Santiago para presentarse y anunciar su llegada:

«Mi tesis ha sido realizada en el Laboratorio de electrostática y física del metal de Grenoble, bajo la dirección del profesor Néel, autoridad a nivel mundial por sus trabajos teóricos sobre el ferromagnetismo. [...] Por lo demás, nada asegura que voy a conservar esta especialización, puesto que, con veintinueve años, soy bastante joven y todo puede cambiar...».

1951-1953



Cerro Alto del Azufre, de 4.691m, en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, cerca de la ciudad de San Fernando, Chile.



El tiempo de los pioneros De la astrofísica a la glaciología

Nuevos cielos, nuevos amigos



El «Florida» zarpa desde Marsella el 28 de febrero de 1951 para llegar a Buenos Aires el 19 de marzo.

Finales de febrero de 1951. Ha llegado la hora de una nueva aventura. Louis Lliboutry se embarca en Marsella en el barco «Florida». Un mistral glacial sopla en el muelle donde sus padres, emocionados, agitan sus pañuelos en señal de despedida. Jeanne Macabies y Jacques Lliboutry vinieron de Perpiñán para dar un último abrazo a este hijo que los llena de orgullo y que ha decidido expatriarse por varios años.

Para llegar a Santiago —donde deberá asumir sus nuevas funciones— Louis prefiere viajar en barco y en tren, en lugar de avión, para disfrutar plenamente de su mes de vacaciones. La travesía está a la altura de sus expectativas, con sabrosas comidas, largas siestas en la reposera, partidas de bridge y samba.

«Una brisa fresca nos acompañó hasta Dakar. Luego aparecieron los peces voladores, como saltamontes en los campos; el sol apareció y desapareció, sin amanecer ni atardecer; y la estrella polar se sumergió en el océano.

Llegamos a Río de Janeiro bajo un calor sofocante; el barco está detenido y ya no podemos tomar tantas duchas como lo hacíamos a bordo. Techos bajos, y todo el mundo con el paraguas a la mano esperando el aguacero de las 16 horas. Unas notas extremadamente exóticas: una mayoría de negros y mulatos, selva tropical a las puertas de la ciudad, casas antiguas amarillas de estilo rococó entre los plátanos, favelas encaramadas en los cerros. Sin embargo, cada minuto un avión despega entre los rascacielos, y la gente toma Coca-Cola».

Luego Lliboutry descubre a bordo los cristales de lentes antisolares metalizados, lo que lo llena de amargura.

«Hace algunos años, en el laboratorio, luego de que se volatilizara el filamento de una ampolleta debido a un error de montaje, me di cuenta de que el vidrio se había convertido en un excelente cristal ahumado antisolar. Entusiasmado por ese hallazgo, fui a ver a Néel para decirle que teníamos que patentarlo. Me convenció de no hacerlo, asegurando que estos films metálicos no eran estables. ¿A lo mejor temía que yo abandonara mi tesis? ¡Dios mío, después del alpinismo, una patente para lentes!».

Luego de desembarcar en Buenos Aires, emprende la travesía del continente en tren para llegar a Santiago, un viaje de 1.200 kilómetros desde la capital argentina.

Construido a finales del siglo XIX por ingenieros chilenos y noruegos (quienes se desplazaban con esquíes en invierno), el «Trasandino» recorre la inmensa pampa desolada y árida («un vértigo horizontal») y atraviesa valientemente la cordillera a más de 3.500 m de altura.

Una proeza tecnológica que movilizó por varios años a un ejército de obreros procedentes del mundo entero, para construir puentes y túneles a gran altura.

El joven catedrático lleva en su equipaje algunas páginas de una novela de Tchekhov que él mismo dactilografió. ¿Quizás para conjurar lo desconocido o prepararse mentalmente para su nuevo puesto?

«Para dar un curso de calidad, que no sea aburrido pero que al mismo tiempo sea provechoso para los asistentes, hay que tener —además del talento— experiencia y técnica; y también hay que tener una idea clara de sus fuerzas y de aquellas de los asistentes. [...] Tengo frente a mí cincuenta rostros diferentes unos de otros, y cincuenta pares de ojos fijados en mí. Mi objetivo es vencer a esta hidra de múltiples cabezas. [...] Ningún deporte, ningún juego o diversión me han procurado nunca tanto placer como el hecho de dar clase. Sólo en esa actividad he conseguido abandonarme por entero a mi pasión. [...] Y no creo que Hércules, incluso después de su mayor hazaña, haya experimentado jamás la voluptuosa lasitud que yo sentía al final de cada clase» (*Una historia aburrida*. Antón Tchekhov).



El «Trasandino» rumbo a Santiago de Chile. «Todo el día, atravesamos la Pampa, teniendo como único espectáculo, aquí y allá, bueyes blancos pastoreando a la sombra de escasos árboles. Al día siguiente, llegamos a Mendoza, descubriendo a través de la bruma de calor, la barrera nevada de los Andes, encima de los 5.000 m. No he querido tomar el avión, entre otras razones, por necesitar mis libros y otros efectos personales».



El cerro San Ramón (3.253 m), en la precordillera de los Andes, se eleva frente al fértil valle del río Mapocho y de la ciudad de Santiago, 1951.

Maravillado, Louis descubre la cordillera, cuyas altas cumbres se divisan a través de la ventana del vagón. El tren, rodeado por vertiginosas cascadas de rocas coloradas, se desliza entre estas míticas montañas que fueron, veinte años antes, el escenario de las aventuras de los primeros “alpinistas” de la Aeropostale: Saint-Exupéry, Mermoz y Guillaumet realizaban proezas a 5.000 m de altitud, atravesando los temibles pasos de las altas cumbres andinas para llevar el correo a Europa: Aconcagua, Tupungato, Maipo, nombres tan grandiosos como aterradores, ligados a los periplos de los héroes de *Tierra de hombres*, y que Louis dimensiona por primera vez.

«En Mendoza aparecen de repente las primeras montañas, totalmente peladas, y atrás la primera cumbre nevada. Los Andes son interminables cuando uno los atraviesa en tren: valles desérticos con pequeños arbustos espinosos, gigantescos pedregales con colores flamígeros, desde “ocre amarillo” hasta “tierra de Siena”, y de vez en cuando unas extrañas tobas volcánicas. Durante un instante se vislumbra en el fondo del Valle de los Horcones la ladera sur del Aconcagua, muy escarpada. En medio de todas las montañas de 5.000 m que lo rodean, levemente espolvoreadas con nieve, se alza como el señor de los Andes, casi himalayano».

«Luego nos detenemos: policía, aduanas, reemplazo de la locomotora a vapor por una locomotora con tracción eléctrica; y después de un túnel, llego finalmente a Chile, donde debo esperar cuatro horas a causa de un desperfecto eléctrico». Cuenta a sus compañeros del CAF (Club Alpino Francés): «¡Llegué a Santiago a las 3 de la mañana!».

«Al día siguiente, gracias al agregado cultural y a unos franceses amables, yo tenía un pequeño departamento amoblado, muy céntrico, con teléfono, una empleada doméstica (habían elegido la más fea, por precaución), un talonario de cheques (mucho más utilizados que en Francia) y los 350 kilos de equipaje que habían llegado sin problema.

[...] La cocina está lejos de igualar a la cocina francesa, pero existen platos desconocidos en Europa: los locos (una especie de molusco), las paltas, una variedad de higos que es mucho mejor que en Europa. Y los famosos vinos chilenos muy generosos, pero muy inferiores a los vinos franceses cuando buscan imitar un vino de Borgoña o del Rin; sin embargo algunos se asemejan al Banyuls o al Martini. El champagne es bastante aceptable.

En cuanto a las chilenas, la mayoría son muy bonitas, a veces muy *olé-olé*, con el pelo y el pecho al estilo america-

no. Fui a escuchar a Georges Ulmer en una discoteca, pero no invité a ninguna a bailar, ya que es muy incorrecto aquí cuando la mujer no está sentada en la misma mesa».

La Universidad de Chile se divide en cinco facultades, entre las cuales están la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Facultad de Filosofía y Educación. La primera, que forma ingenieros, dispone de laboratorios e incluye un centro sismológico. Louis Lliboutry ha sido contratado por el decano de la segunda facultad, Juan Gómez Millas, y enseñará física en el Instituto Pedagógico.

El Pedagógico se encarga de la formación de los profesores de enseñanza secundaria, «la mayoría son mujeres (los hombres prefieren la carrera de ingeniero, mejor pagada) y la rivalidad entre católicos y comunistas es muy fuerte». Lo que se espera de Louis Lliboutry es que elabore un curso de física «serio» en colaboración con dos jóvenes chilenos que acaban de terminar sus estudios en Europa, Gabriel Alvial y Nahum Joel. En pocos días, los tres implementan un programa de física que se imparte en cuatro años. Louis enseñará electricidad y bases de termodinámica en segundo año.

«En el Pedagógico, además de su entorno montañoso y de las numerosas estudiantes que distraen la mirada (¡Sin ser malpensado!), estoy muy bien instalado: un gran piso subterráneo donde se encuentra una pequeña sala de clase (nada parecido a un anfiteatro), armarios (con un buen material de hace treinta años), lo que será la sala de trabajos prácticos para los alumnos, y tres salas para los profesores. Mandé a instalar una ventana en una de las paredes de mi sala (¡perforar el hormigón armado de un edificio antisísmico no es una tarea fácil!), pero nos percatamos que había una pequeña grieta. En Francia uno ni siquiera se preocuparía por una grieta diez veces más grande, pero aquí le tienen mucho miedo a los terremotos; entonces vamos a poner nuevas barras de fierro ¡A lo mejor tendré mi ventana antes del fin del invierno! (aquí todas las construcciones son “antisísmicas” con muchas barras de fierro, según las técnicas utilizadas en California).

Por otra parte, se quemaron los cables eléctricos; estoy sin corriente continua y sin red de alto voltaje. Y el parquet se deterioró a causa de una fuga de agua y debe ser reparado, lo que significa que los obreros llenaron los espacios donde yo quisiera ver a los alumnos realizar trabajos prácticos».

El 23 de mayo, en una carta dirigida a Jean Touchard, director de las relaciones culturales en el

Ministerio de Asuntos Exteriores de Francia, Lliboutry señala que su principal apoyo en Santiago es el decano Juan Gómez Millas, quien tiene una visión muy clara de las necesidades ligadas a la enseñanza y de las reformas a realizar, y confía mucho para ello en los profesores jóvenes. Como cualquier director de enseñanza, dedica su tiempo a luchar para obtener financiamiento, por lo que espera algunas hazañas espectaculares para impresionar a los diputados. Se dirige también al profesor Kastler —de quien recibirá una respuesta favorable sólo al año siguiente— para pedirle materiales de precisión, ya que quiere dedicarse a la investigación sin tener que esperar.

«Estoy encargado de enseñar física en el Instituto Pedagógico. Cuento para ello con la ayuda de Joel, quien ha pasado dos años con Bernal después de haber estado con usted (él dice que su cerebro está en Londres, que su corazón está en París y que su paladar está en Chile).

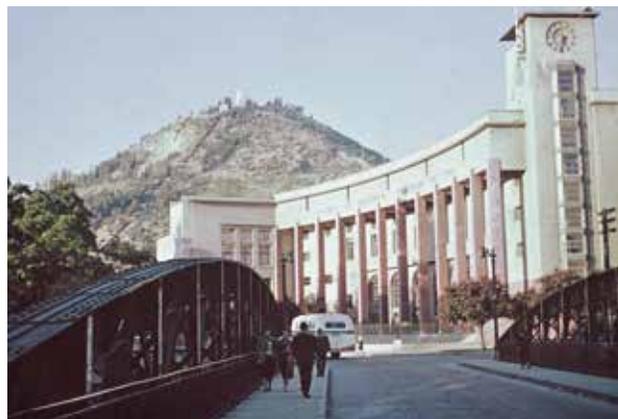
[...] En cuanto a mis investigaciones, superviso la compra y la construcción del material. [...] Por lo que, si todavía tiene la intención de mandar a construir varios espectrógrafos con gran apertura para estudiar la luz del cielo nocturno y crepuscular, le agradecería mucho si pudiera inscribirme para conseguir uno, como me lo propuso tan amablemente».

El 22 de abril, poco tiempo después de su llegada, escribe a sus compañeros del CAF:

«Anteayer llovió, [...] y los primeros contrafuertes de los Andes que dominan Santiago aparecieron con una leve capa de nieve, como Belledonne en noviembre. Sin embargo esta primera nieve no es lo que me hizo pensar en ustedes: quería escribirles, pero no tenía mucho tiempo».

Es de imaginar que Louis Lliboutry se acostumbró a vivir en Santiago y que le agradaba la ciudad, ya que su topografía le recordaba sin duda a la de Grenoble.

«Santiago se encuentra a 500 m de altitud. Al oeste, el horizonte está delimitado por la cordillera de la costa que culmina a más de 3.000 m. Al oriente, muy cerca de la ciudad, la muralla del cerro San Ramón también se eleva a 3.000 m. Es el borde de una penillanura, disecionada por unos valles profundos, llamados quebradas cuando son estrechos, y cajones cuando son anchos. Las altas cumbres de los Andes, de 5.000 a 6.000 m de altura o más, no son visibles desde Santiago, excepto en el noreste, en la brecha que constituye el valle del río Mapocho. A 50 km en línea directa, se divisa el cerro El Plomo (5.400 m), flanqueado a la izquierda por un



Avenida Américo Vespucio con Colón (arriba) y la Facultad de Derecho de la Universidad de Chile (abajo).

El decano Gómez Millas escribe a Lliboutry el 22 de enero de 1951: «Me complace en pensar que Ud. nos será de gran ayuda para la no menor misión de modernizar nuestros estudios de física y preparar buenos maestros en la materia. [...] Debe comprender nuestras deficiencias y procurar con su experiencia europea y sus estudios aconsejar para que se remedien y estimular a nuestros jóvenes [...] por tanto dependerá de usted y sus colaboradores el éxito de esta empresa a que lo he invitado, porque sé que lo anima una sana y noble ambición en el campo científico y un verdadero propósito de dejar su nombre ligado al apareamiento de un nuevo centro de vida espiritual en este lejano rincón del mundo».

extenso glaciar, La Paloma. Es la única mancha de nieve o de hielo visible desde Santiago en verano.

A través del valle del río Mapocho uno accede a la mina de cobre La Disputada (3.424 m) y a la estación de esquí de Farellones (2.600 m), que está equipada sólo con una tele-cuerda para principiantes y un telesquí, y alberga únicamente el hermoso chalet de los Edwards, un hotel chalet, y tres o cuatro refugios. Bordeando el cerro San Ramón por el sur, a través del cajón del río Maipo (el único valle poblado), se accede a la otra estación de esquí de Santiago, Lagunillas. [...] Tuve la oportunidad de visitar ambas estaciones a principios de abril».

El proyecto de un observatorio astronómico en el hemisferio sur



Una numerosa comitiva, encabezada por los decanos de las facultades de Filosofía y Educación y de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Juan Gómez Millas y Reinaldo Harnecker, se reúne en Farellones el domingo 13 de mayo de 1951 para hacer público un proyecto de construcción de un observatorio en la cumbre del vecino cerro Colorado.

Recién llegado, Louis Lliboutry emprende un proyecto muy importante para él: la construcción de un observatorio de gran altitud, «[...] donde estudiaremos astrofísica, los rayos cósmicos, y donde luego podríamos colocar un lente de 60 cm de apertura, el más potente jamás instalado a esta altura. Fuimos a pasear en mula en la montaña y escogimos un cono situado a 3.300 m, a dos horas caminando desde la estación de esquí de Farellones».

En una carta dirigida al Sr. Rivière, director del CNRS, donde relata su instalación en Santiago, menciona este proyecto de observatorio, como aquel construido por Jules Janssen en el mont Blanc:

«La acogida en Chile ha sido excelente, y he trabajado mucho desde mi llegada, hace un mes: acondicionamiento del local que nos ha sido asignado en el Instituto Pedagógico, elaboración de un nuevo programa de estudios de física (bastante diferente al anterior, pero ha sido aceptado por todos con entusiasmo)».

«Por otro lado, he transmitido las cartas del Sr. Danjeon, quien logró convencerles de que había que construir un pequeño observatorio de alta altitud (3.300 m), cerca de Santiago, en un lugar actualmente accesible en el día, por carretera hasta 2.800 m, y luego en burro.

Este observatorio funcionaría «en colaboración» con los observatorios franceses del Pic du Midi o de Haute Provence. [...] El director del observatorio astronómico de la Universidad de Chile, Dr. Federico Rutllant, es una persona muy competente, que ha estado en Francia, en Alemania y en Dinamarca; está consciente del inmenso interés que representa para ellos trabajar en colaboración con un observatorio importante como el de París. El observatorio de Chile pondrá a nuestra disposición una montura ecuatorial y un visor, una fuente de energía eléctrica (generador diésel y acumulador), y durante la próxima primavera se empezará a construir un pequeño refugio de material sólido. Si las observaciones meteorológicas son satisfactorias, piensan construir luego un observatorio donde instalarán el lente de 60 cm de apertura que ya tienen a disposición. [...] Escribiré dentro de algunos días al Sr. Danjeon y al Sr. Chalonge, cuando el lugar exacto esté confirmado».

Lo hará efectivamente unos días más tarde:

«Ha sido fácil elegir el lugar: Portillo (2.890 m) y Cristo Redentor (3.800 m) se encuentran demasiado lejos de Santiago (y son de difícil acceso, como Serre-Chevalier desde Grenoble pasando por Gap y Embrun). Las minas Disputada de Las Condes y Lo Valdés están demasiado encajonadas. También se pensó en las estaciones de esquí de Farellones y de Lagunillas. Finalmente se escogió el cerro Colorado, arriba de Farellones. [...] Altitud: 3.350 m, sin nieve durante ocho meses al año, y sin nubes durante diez meses al año. Visibilidad perfecta en todas las direcciones».

En una carta dirigida al director de Educación Superior de Francia, Lliboutry señala:

El cerro Colorado en 1938, 3.300 m. ▶



«Nuestro agregado cultural me presta un apoyo constante. La tradicional gentileza de los chilenos se confirmó, y mi conocimiento del español facilitó mucho las cosas. Los primeros contactos que tomé fueron para transmitir la propuesta de los profesores Danjeon y Chalonge, del Instituto de Astrofísica de París, que consiste en proporcionar un espectrógrafo con óptica de cuarzo para realizar espectrogramas de estrellas en el hemisferio sur. Esto forma parte de un proyecto más general para construir un observatorio a gran altura, cuya envergadura me asusta un poco».

En junio, le escribe Daniel Chalonge, astrónomo y astrofísico, nacido en Grenoble, egresado de la Escuela Normal Superior y uno de los fundadores del Instituto de Astrofísica de París:



Juegos panamericanos de esquí en Farellones. Un avión saluda a sus amigos esquiadores. 1938.

«Ha sido una grata sorpresa saber, a través de su carta, que nuestro proyecto iba por buen camino, gracias a usted. [...] Estoy prácticamente seguro de que los créditos solicitados van a ser otorgados.

Los primeros ensayos realizados en mayo con espectrógrafos armados apresuradamente han sido muy satisfactorios, por lo que estamos seguros de que tendremos buenos resultados. Pero el material, muy robusto y manejable, es poco luminoso y pienso que permitirá estudiar sólo unas cuarenta estrellas, las más brillantes del cielo austral. De todas maneras sería un excelente comienzo y, existiendo ya un puente entre Francia y Chile, podríamos considerar la posibilidad de una exploración más profunda del cielo con un material un poco más sofisticado».

La ubicación del cerro Colorado es lógicamente la mejor elección, pero suscita envidias insospechadas:

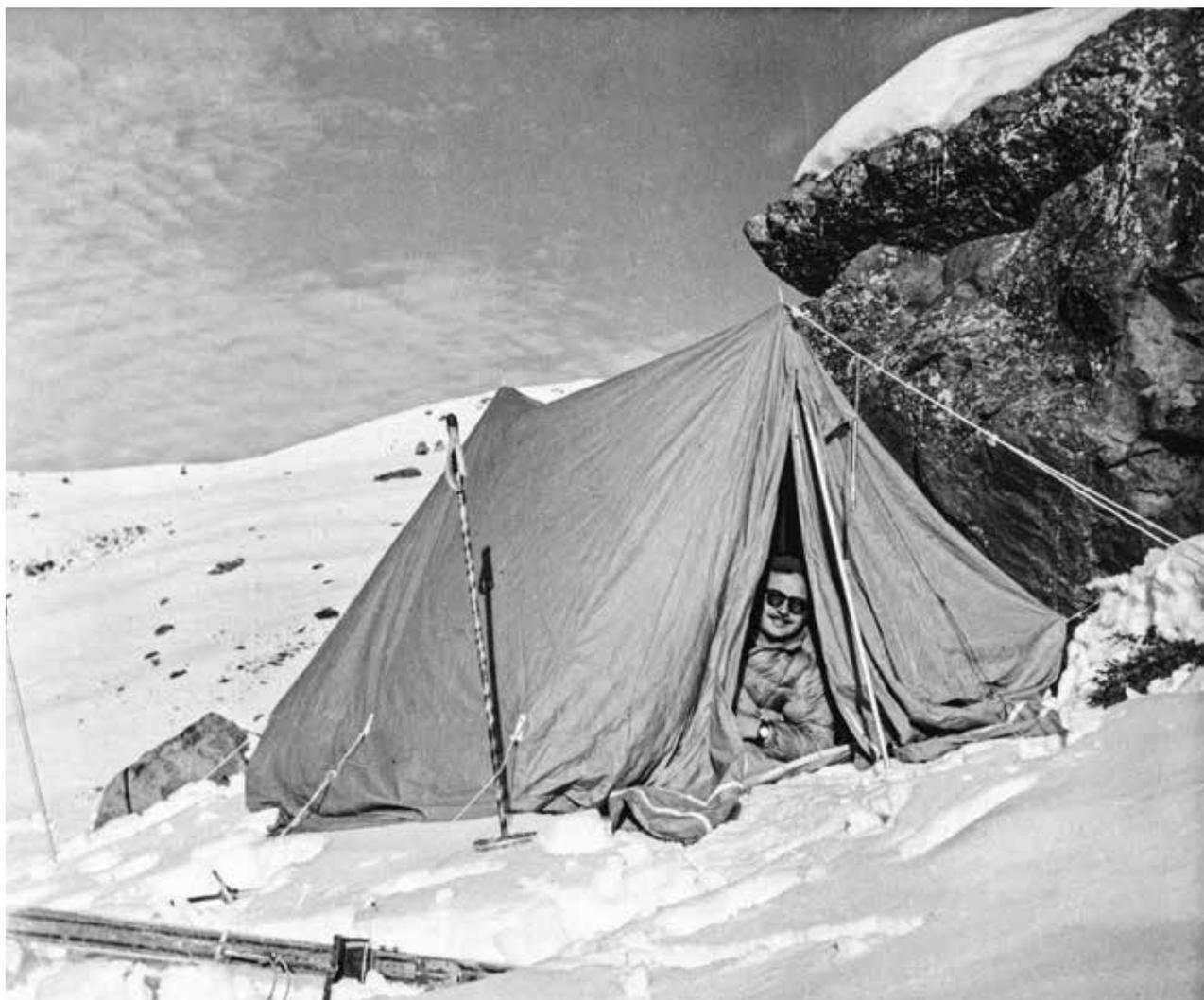
«El decano Gómez Millas estaba seguro de conseguir que el ejército construyera una carretera. El trato estaba hecho, *El Mercurio* lo había anunciado, se había fijado la fecha de la ceremonia de colocación de la primera piedra... pero dos meses más tarde, el proyecto fracasó. El decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas manifestó un fuerte interés por la instalación de un sismógrafo en este observatorio. Era una idea descabellada, pero nadie se atrevió a contradecirle. Él decía que no debía haber ninguna vibración en el lugar escogido y, por ende, ningún motor de telesquí. Pero el americano Leatherbee (casado con la influyente campeona de esquí chilena Sarah "Mimi" Gacitúa), quien había instalado y administraba la telesilla de Farellones, pretendía instalar una telesilla hasta el cerro Colorado. Y para él, el motor debía siempre colocarse en la extremidad superior de un telesquí, donde la tensión del cable es la más fuerte y la adherencia sobre la polea es la mejor. Le expliqué que en los Alpes los motores se colocan abajo, cerca de las viviendas, pero se encogió de hombros: ¡un francés que quería enseñar una técnica a un americano! Y para evitar cualquier proyecto de observatorio, el americano compró inmediatamente todo el cerro Colorado, tomando por sorpresa a la comunidad universitaria, que no había pensado que esta parte de los Andes inhabitada pudiera tener dueños».

El proyecto de construcción de un observatorio astronómico en el hemisferio sur se concretará mucho más tarde, en el cerro Tololo, en el valle del Elqui.



«Tuve que ser el primero en bajar esquiando la cima norte del cerro Colorado, más elevada y con sus laderas más hermosas, La Parva. Este nombre proviene de su forma piramidal truncada que recuerda las grandes pilas de heno o haces de trigo, que llamamos allí parvas».

Esquí y andinismo en la cordillera de los Andes: Portillo, Farellones, La Parva y Disputada de Las Condes



«Alrededor de la mina Disputada de Las Condes existen las más bellas y variadas canchas de la región, con bajadas de hasta 1.600 m de desnivel y nieve esquiable hasta noviembre. Hay innumerables otros lugares en los Andes de Santiago en donde se podrían hacer espléndidas excursiones con esquís en agosto y septiembre, pero es necesario alojar bajo carpa y muy conveniente contratar mulas para alcanzar la nieve».

Poco después de su llegada, Lliboutry se reúne en varias ocasiones con Eduardo Cruz-Coke, secretario de la Facultad de Química y Farmacia, profesor en la Escuela de Medicina y candidato a la presidencia de la República, «a quien nuestro director de Educación Superior, el Sr. Donzelot, conocía personalmente», como lo señala Lliboutry en la carta dirigida al Sr. Rivière.

Eduardo Cruz-Coke es, sin duda, uno de los pocos científicos chilenos que podían compartir con Lliboutry recuerdos de la Guerra Civil española. En 1935, cuando el joven Louis era alumno del liceo francés de Madrid, Eduardo Cruz-Coke se hizo amigo del poeta Federico García Lorca y de varios científicos republicanos. Era un férreo adversario del franquismo.



«El centro de esquí de Portillo: Espléndido hotel de gran lujo, accesible en una mañana de tren desde Santiago a Valparaíso. Por su altura y encajonamiento entre soberbias paredes de roca, con frecuencia hay excelente nieve polvo en julio».

Las elecciones presidenciales de 1952 en Chile dan la victoria a la coalición de centro izquierda del general Carlos Ibáñez del Campo, embajador de Chile en Francia en 1940. Las mujeres chilenas votan por primera vez. Arturo Matte Larraín obtiene el 27,81%, Pedro Enrique Alfonso Barrios el 19,95% y Salvador Allende Gossens, candidato del Partido Socialista, obtiene 5,45% de los votos.

Louis Lliboutry conoce también a varios republicanos españoles en la Universidad de Chile y en el círculo andinista de Santiago, ya que muchos de ellos se habían refugiado en América del Sur, en México, en Argentina y en Chile.

A partir de finales de mayo, empieza a ir casi todos los fines de semana a la estación de esquí de



Banderines que conservó Lliboutry en su casa de Grenoble.

Farellones y sube hasta la cima del cerro Colorado con pieles de foca. Esta práctica era desconocida en Chile; él era el único que la utilizaba. También será el primero en descender en esquí desde la cima norte del cerro Colorado, más alta y con pendientes más bellas: La Parva. Su instinto le hace recomendar el lugar a algunos amigos franceses, entre otros a André Bossone, originario de Chamonix y radicado en Chile desde la Liberación, quien construirá una nueva estación de esquí a pocos kilómetros de Farellones. El 21 de mayo de 1951 escribe a Lucien Devies, presidente de la Federación Francesa de Montaña:

«Esto no tiene nada que ver con los Alpes. Primero se trata de lugares totalmente estériles e inhabitados, sin bosques, sin pasto ni carreteras, y cualquier excursión toma el carácter de expedición. Imagínense la región de Oisans y el macizo de las Grandes Rousses sin ninguna carretera entre el río Arc y el río Durance, excepto un camino de tierra hasta Le Bourg d'Arud, y cimas de 5.000 m hasta Turín».

En julio Lliboutry llega por primera vez a Portillo, a un hotel grande y lujoso en plena cordillera de los Andes, frecuentado por la alta sociedad chilena, y donde se realizará el Campeonato Mundial de Esquí Alpino en 1966.

Los andinistas son un pequeño grupo de gente adinerada y que goza de tiempo libre; considerados como locos, buenos para comer y para beber. No sólo hay alemanes; los chilenos también están presentes.

También hay muchos esquiadores, pero aquí el esquí es un deporte de *happy few*, y Emile Allais, entrenador del equipo americano, sólo ha podido enseñarles a esquiar en pistas, con telesquíes, nieve compacta y mucho sol. El esquí de primavera es desconocido.

El equipo americano de esquí entrena en Portillo. Un día, Louis Lliboutry se acerca en la pista a este «dios del esquí francés», que era en realidad un hombre muy cordial. Luego de una breve conversación «Emile Allais se despidió y retomó el entrenamiento. Pero, para mi sorpresa, no les enseñaba el famoso método Allais (*Christiana*), sino lo que se llamaría el *slalom*, que había inventado sin que lo supiéramos bajo el nombre de *Mambo-christiana*».

El joven francés empieza a relacionarse con varios andinistas, a quienes les llama la atención el material ultraliviano que utiliza, ya que en Santiago, no se encuentran «[...] ni cuerdas adecuadas, ni chaquetas acolchadas, ni calzado de esquí antideslizante con peluche, ni ferretería». Escribe a sus amigos del CAF: «Espero conocer al presidente del Club Andino, Carlos Piderit, el mejor andinista de Santiago, según me contaron. La idea es organizar la visita a Santiago de nuestros héroes del Annapurna».

Le sorprende que los mapas que existen sean muy poco precisos y sin toponimia.

«El mapa que vende el Instituto Geográfico Militar es absolutamente falso», escribiría Lliboutry.

«Pero el andinismo posee otros atractivos: han descubierto hace poco, a 50 km de Santiago, dos montañas de más de 5.000 m que no aparecían en ningún mapa. No sólo se puede escalar cumbres vírgenes, sino que hay que descubrirlas y bautizarlas. Por eso espero meterme en el andinismo y formar una cordada francesa, ya que en el Instituto Pedagógico donde trabajo hay otro francés, geógrafo y pirineísta, y de mi edad, Jean Borde».

En Santiago, en la universidad, Louis establece



André y Lionel Bossonney, el Príncipe Starhemberg y Maurice Mathieu, en Portillo.



Emile Allais, director de la Escuela de esquí de Portillo, triple campeón mundial de esquí, una leyenda viva de los deportes blancos.

rápidamente relaciones con muchas personas extranjeras, docentes franceses con puestos en Chile, ingenieros, aventureros.

«Pero el personaje más extraño que he conocido en Santiago en 1951 es el presidente de una Asociación Nacional de Andinismo y Esquí, Sergio Moder.

Se ganaba la vida restaurando cuadros antiguos, y era el único en Santiago que llevaba una barba de chivo y una humita. [...] Había sido marino en su juventud. Un día, mientras pasaba al sur de Tierra del Fuego por el Canal de Beagle con un cargamento de contrabando, y convencido que sus dos cómplices estaban planeando algo contra él en pleno mar, escapó a la isla Navarino llevándose la brújula del barco. Y debió esperar tres meses para que pasara el primer barco [...].

Sergio y sus jóvenes amigos andinistas habían encontrado la manera de tomar el aperitivo gratuitamente: sólo debían ir al lujoso restaurante de los hermanos Chiaranda. El menor (de nombre Vicente) era aficionado al andinismo, pero su profesión no le permitía tener mucho tiempo para entrenar, le obligaba a vivir entre vapores de alcohol y humo de tabaco, y a nunca acostarse antes de las dos de la mañana.

A pesar de ello, Chiaranda logró ascender el Aconcagua al primer intento, filmando la ascensión.

Llegó a la cumbre en plena forma, con una mesa plegable, la instaló y se subió arriba para que lo filmaran. Nos presentó su film, titulado *Un metro más arriba del Aconcagua*.

Desgraciadamente, cuando regresé a Francia en 1954, me informaron que el entusiasta Chiaranda había desaparecido en la montaña, durante un ascenso al Mercedario. Nunca se ha podido encontrar su cuerpo».

Expedición francesa a los Andes Patagónicos: la conquista del Fitz Roy

A finales de mayo, Louis Lliboutry se entera de que el CAF organiza una expedición al Fitz Roy en la Patagonia, una ascensión mítica en el mundo del alpinismo. Le piden mapas chilenos de la zona, y los hace llegar al CAF por intermedio de Jean Touchard. Se trata de copias fotostáticas de mapas aéreos que todavía no estaban en el mercado.

Y decide ofrecer sus servicios para participar en la expedición.

«Sin pretender integrar las cordadas de asalto, yo podía ayudar a transportar las cargas hacia los campamentos de altura, elaborar un mapa topográfico de la región, realizar observaciones geológicas y glaciológicas. Era un poco atrevido de mi parte, ya que yo no era topógrafo ni geólogo, pero mi propuesta fue inmediatamente aceptada».

Manifiesta su intención al director de Educación Superior de Francia:

«Tengo el honor de comunicarle que tengo previsto realizar una expedición con alpinistas franceses, en el sur de la Patagonia. Dicha expedición, patrocinada por el Club Alpino Francés, apoyada por el Ministerio de Asuntos Exteriores de Francia y las autoridades argentinas y chilenas, estará integrada por cinco alpinistas franceses de primer nivel (entre ellos Lionel Terray, quien hizo parte de la expedición al Annapurna), un francés de Buenos Aires y yo. Estaré encargado de realizar estudios topográficos y observaciones científicas.

Quizás le parecerá extraño que no hayan recurrido a un geólogo o a un naturalista. Además del hecho de encontrarme relativamente cerca del lugar de la expedición y de poder ayudarlos en las gestiones desde el lado chileno, dos razones explican esta elección: 1- Las tres cuartas partes del sur de la Patagonia están cubiertas de hielo, y en el lado donde vamos, los estudios de glaciología y morfología glaciaria son a priori los más interesantes, y son temas en los cuales no soy profano. 2- Considerando que se trata de un territorio prácticamente inexplorado, cualquier muestra de rocas u observación que pueda realizar un aficionado informado resulta interesante.

Y puede ser el preludio de una expedición claramente científica, enfocada hacia un aspecto en particular.

Me puse en contacto con Humberto Fuenzalida, director del Instituto de Geografía de la Universidad de Chile y del Museo Nacional de Historia Natural de Santiago, con André Cailleux en Francia, con Seligman en Inglaterra, y con un compañero que trabaja en la Jungfrauoch. Recibí de todos ellos consejos y documentación.

[...] Uno de los mayores inconvenientes es que no existe ningún buen tratado de física en español. Estoy pensando en publicar uno, como introducción a las obras de Bruhat o Rocard.

Creo que es un trabajo urgente a realizar en este ámbito en América del Sur, tanto para ellos como para Francia.

Para terminar, espero que mi nombramiento como Profesor Titular Universitario en el extranjero sea pronto confirmado».

Lliboutry también escribe al profesor Néel para informarle del viaje a la Patagonia. Es interesante ver que todas sus actividades están ligadas entre sí por una sola y misma pasión que todavía no tiene nombre. Al principio escribe: «Empecé un curso sobre la física de los metales (propiedades mecánicas, cristalinas, aleaciones, magnetismo, etc.), un tema muy importante para Chile». Luego, después de haber anunciado la expedición al Fitz Roy, agrega: «La física del hielo constituye un punto de conexión con la física de los metales: en ambas encontramos recristalización, sinterización, planos de deslizamiento, fluencia, con temperaturas y escalas de tiempo más accesibles».

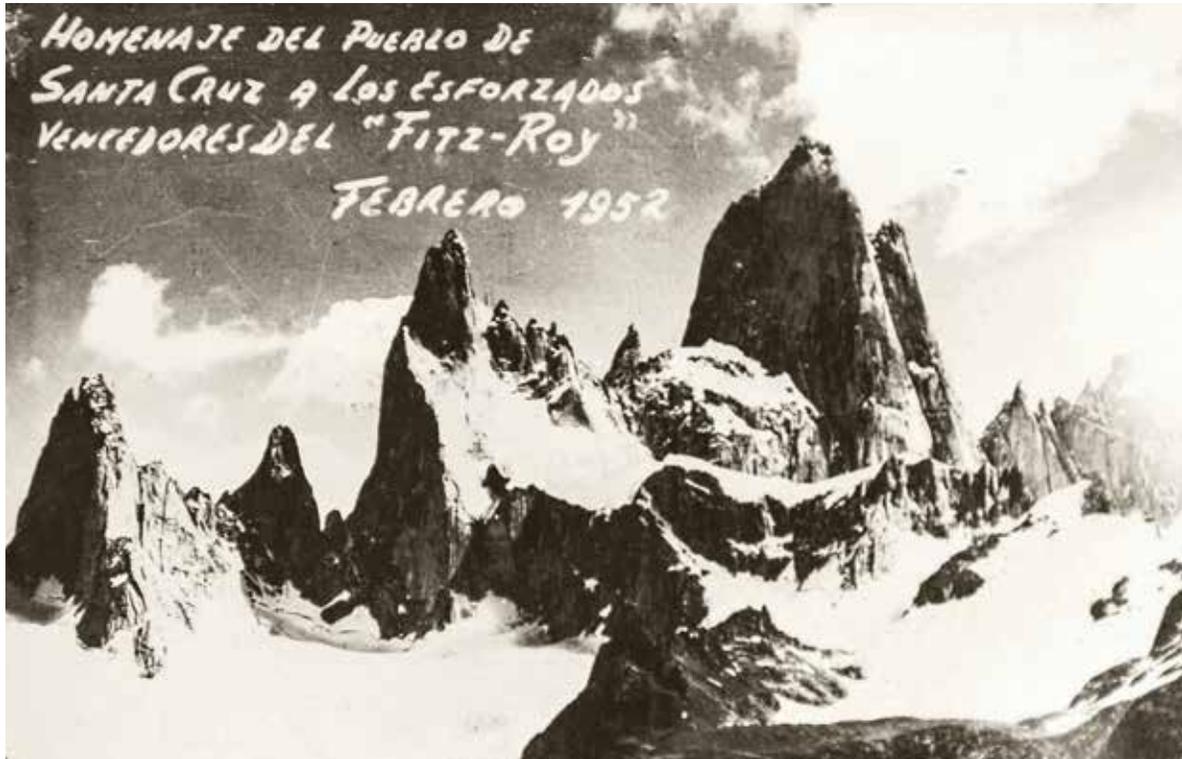
El 27 de agosto envía a André Cailleux las observaciones siguientes, que demuestran su participación relevante en una ciencia todavía poco conocida:

«Todo lo que se sabe acerca de los glaciares de la Patagonia se puede resumir en algunas observaciones de Féruglio que datan de 1931-1936.

[...] Lo que significa que quedan muchas observaciones por hacer. El tiempo del que dispondremos para la exploración dependerá del grado de resistencia durante el ascenso al Fitz Roy, primer objetivo de la expedición.



«El Fitz Roy propone una sed de aventuras y a la audacia humana un problema distinto de los ya en gran parte resueltos en los Andes no Patagónicos. La dificultad no consistía en la altura apunante, sino en la inclemencia del tiempo, en la dificultad técnica de la escalada y en el escarchamiento de la roca. Pero la zona de Fitz Roy es también de sumo interés científico para el levantamiento de un mapa geológico y de estudios glaciológicos».



Expedición francesa al Fitz Roy. De izquierda a derecha: Georges Strouvé, Louis Lliboutry, Louis Depasse, Suzanne Depasse, Frédéric Marmillod, Guido Magnone, René Ferlet, Lionel Terray y Francisco Ibáñez (en uniforme).

Intentarán escalamiento del macizo patagónico Fitz Roy

En misión científica va físico Lliboutry, del I. Pedagógico

Los ventisqueros que desfilan de las montañas de hielo vertical, avanzan y retroceden, con raras huellas, hacia abismos desconocidos, como que los científicos con la colaboración de algunas bases de estalaje. Con este propósito y otros de estudio, hidrográfico, una expedición francesa intentará la ascensión del macizo Fitz Roy, situado en los Andes patagónicos, en el límite argentino-chileno, más de 200 kilómetros al sur de Puerto Arión.

Polémica la expedición al macizo de Fitz Roy del Instituto Pedagógico de Chile. M. Louis Lliboutry, que ha viajado desde París, dice que escalará la montaña de las precipitadas edificaciones de Fitz Roy, en la zona que al sur limita con el mar. Junto a la zona de la montaña, en el límite argentino-chileno, se encuentra el macizo de Fitz Roy, que al sur limita con el mar. Junto a la zona de la montaña, en el límite argentino-chileno, se encuentra el macizo de Fitz Roy, que al sur limita con el mar.



UNA RESBALADA Y... — M. Louis Lliboutry, está considerado como uno de los físicos más esclarecidos del mundo. Hace dos años fue contratado en Francia para que integrara la comisión que estudia la reforma de los Programas de Estudios de Física en el Instituto Pedagógico. Integrará la expedición francesa que intentará la ascensión del Fitz Roy, un macizo patagónico que, por su configuración geográfica es uno de los más importantes del mundo en cuanto al "desgaste" de ventisqueros que hay a su alrededor. Lliboutry, parte hoy a Buenos Aires, para integrar la misión científica. Ayer lo sorprendió LA NACIÓN cuando inspeccionaba los "zapatos" que utilizará en el escalamiento de los 3.240 metros del inviolado monte. "Hasta el último clavo debe ser revisado, nos dijo. Una resbalada y..."

al Himalaya, al Everest y al Annapurna, total y definitivamente, la expedición científica que se le ha encomendado. Con todas las experiencias de las expediciones alpinas más antiguas por todos los continentes, Fitz Roy y sus alrededores en especial, que el ser humano en la Patagonia, desde el inicio de la historia, ha estado visitando.

de a los interesados, dice M. Lliboutry. Desde luego, nos interesa el estudio glaciológico del hielo continental en esta región desconocida. Aparecen fenómenos extraños que pretendemos descifrar. Es ley, por ejemplo, que todos los ventisqueros disminuyan con el tiempo, pero el llamado Francisco Moreno, que va a desaguar en el Lago Argentino, ha aumentado al extremo de que las aguas arrasaron algunas estancias. ¿Por qué? Ya lo sabremos.

que va a desaguar en el Lago Argentino, ha aumentado al extremo de que las aguas arrasaron algunas estancias. ¿Por qué? Ya lo sabremos.

Artículo de *El Mercurio* del 13 de diciembre de 1951. «Desde luego nos interesa el estudio glaciológico del hielo continental en esta región desconocida. Aparecen fenómenos extraños que pretendemos descifrar. Es ley, por ejemplo, que todos los ventisqueros disminuyan con el tiempo, pero el llamado Francisco Moreno, que va a desaguar en el Lago Argentino, ha aumentado al extremo de que las aguas arrasaron algunas estancias. ¿Por qué? Ya lo sabremos.»

«La Patagonia, tierra de pioneros y aventureros, no aparece nombrada en ningún atlas actual. Ninguna provincia chilena o argentina lleva este nombre que enciende y alimenta la imaginación».

conocido como guía e instructor de esquí en la Escuela de Les Praz en Chamonix. [...] Algunos días después llegó Lionel Terray, un viejo amigo de Depasse, desde la época en que ambos eran instructores en la Escuela Militar de Montaña. [...] Luego llegó el cuarto miembro de la expedición, el oficial de enlace argentino y subteniente de las tropas de montaña Francisco Ibáñez, Paco para los amigos. El quinto miembro, el doctor Marc-Antoine Azéma, cirujano en Béziers, llegó por avión el día siguiente con su esposa; más tarde llegaron por barco y en tercera clase los cuatro parisinos: René Ferlet, Guido Magnone, Jacques Poincenot y Georges Strouvé».

El Dr. Azéma, en *La Conquête du Fitz Roy*, el libro que publicó en 1954 sobre esta aventura, cuenta lo siguiente:

«Al lado de Francisco Ibáñez, [...] un joven con cara de niño, con una mirada penetrante atrás de unos espejos lentes, nuestro compatriota, el catalán francés Louis Lliboutry. Profesor universitario de ciencias físicas, encargado de misión en Santiago de Chile, su vocación alpina se despertó años atrás en Grenoble y el alpinista, en él, no tenía nada que envidiar al intelectual».

[...] Afortunadamente, tenemos ahora excelentes tomas aéreas de estas regiones a escala 1:250.000. He podido ver las fotografías aéreas, pero la mayoría son confidenciales.

¿Es posible, en tan poco tiempo, obtener informaciones correctas sobre la velocidad de los glaciares?».

El 13 de noviembre de 1951 escribe por última vez a Jean Touchard para pedirle que hiciera pasar a través de la valija diplomática una cámara fotográfica Leica último modelo que le habían regalado. Un mes más tarde llega el momento de partir.

«Tomé el avión hacia Buenos Aires el 13 de diciembre de 1951. Allí me esperaba otro miembro de la expedición francesa al Fitz Roy, Louis Depasse, a quien había

Entre quienes acogen a los expedicionarios se encuentra Freddy Marmillod, ingeniero químico que representaba la compañía Sandoz en América Latina. Con su mujer, Dorly, realizó varias primeras ascensiones en la cordillera de los Andes y escaló dos veces el Aconcagua. Luego de haber regresado a Suiza a la edad de jubilación, la pareja perderá la vida en el ascenso de la Dent d'Hérens. «Fueron encontrados muertos, a causa del frío, apretados uno contra el otro, en una actitud serena. Sin duda, una dulce y bella muerte para unos alpinistas», dice Lliboutry.

En Buenos Aires, Louis Lliboutry conoce a Lionel Terray. Hubieran podido encontrarse mucho antes. En 1945, cuando el joven profesor Lliboutry llegó a Chamonix para iniciarse en el alpinismo, Terray era desde poco tiempo guía de alta montaña. Años más tarde realizará con Louis Lachenal sus primeras ascensiones en las grandes caras de los Alpes, en particular las caras norte de las Grandes Jorasses y del Eiger. Su pasión por la montaña y el esquí lo alejó desde la adolescencia de la carrera universitaria que su padre, un brillante ingeniero químico, quería que estudiara.

La aventura en el Fitz Roy marca el inicio de una amistad entre Terray y Lliboutry. ¿Quizás Terray veía en Lliboutry al superdotado en ciencias que soñaba ser cuando estaba en el liceo de Villars-de-Lans?

«No es necesario presentar a Lionel Terray al lector. Siempre fue el primero en levantarse, escogiendo las cargas más pesadas, con un ánimo inquebrantable, la mejor locomotora para una gran expedición. Si bien durante las conferencias no escondía el hecho de que estaba consciente de sus capacidades, en privado mostraba una extrema simplicidad, siempre ávido de aprender, con mucho interés por Nepal y Perú, y por los humildes campesinos que había conocido, haciéndose querer por ellos».

A Juan Domingo Perón, Presidente de Argentina desde hace cinco años, le gusta el montañismo; ha sido durante mucho tiempo oficial de las tropas de montaña. Recibe a los expedicionarios franceses en la Casa Rosada, y en algunas horas resuelve los últimos problemas de organización y transporte.

«Se abre la puerta y Perón nos acoge con una sonrisa:

—Nosotros —nos dijo— asumimos la responsabilidad de vuestro viaje horizontal, a Uds. la responsabilidad del viaje vertical. ¿Qué necesitan?

—Ya no queda espacio en los aviones que van al Sur...

—¡Llamen al ministro de Transporte!

Un minuto más tarde llegó el ministro. Puso un avión especial a nuestra disposición.

—No hay mucha conexión entre Puerto Santa Cruz (en la costa atlántica) y el Fitz Roy, para desplazarlos y transportar nuestras dos toneladas y media de equipaje. También quisiéramos tener una conexión por radio.

—¡Llamen al ministro de Guerra!

Algunos minutos más tarde, dos camiones militares y un camión-radio fueron puestos a nuestro servicio».

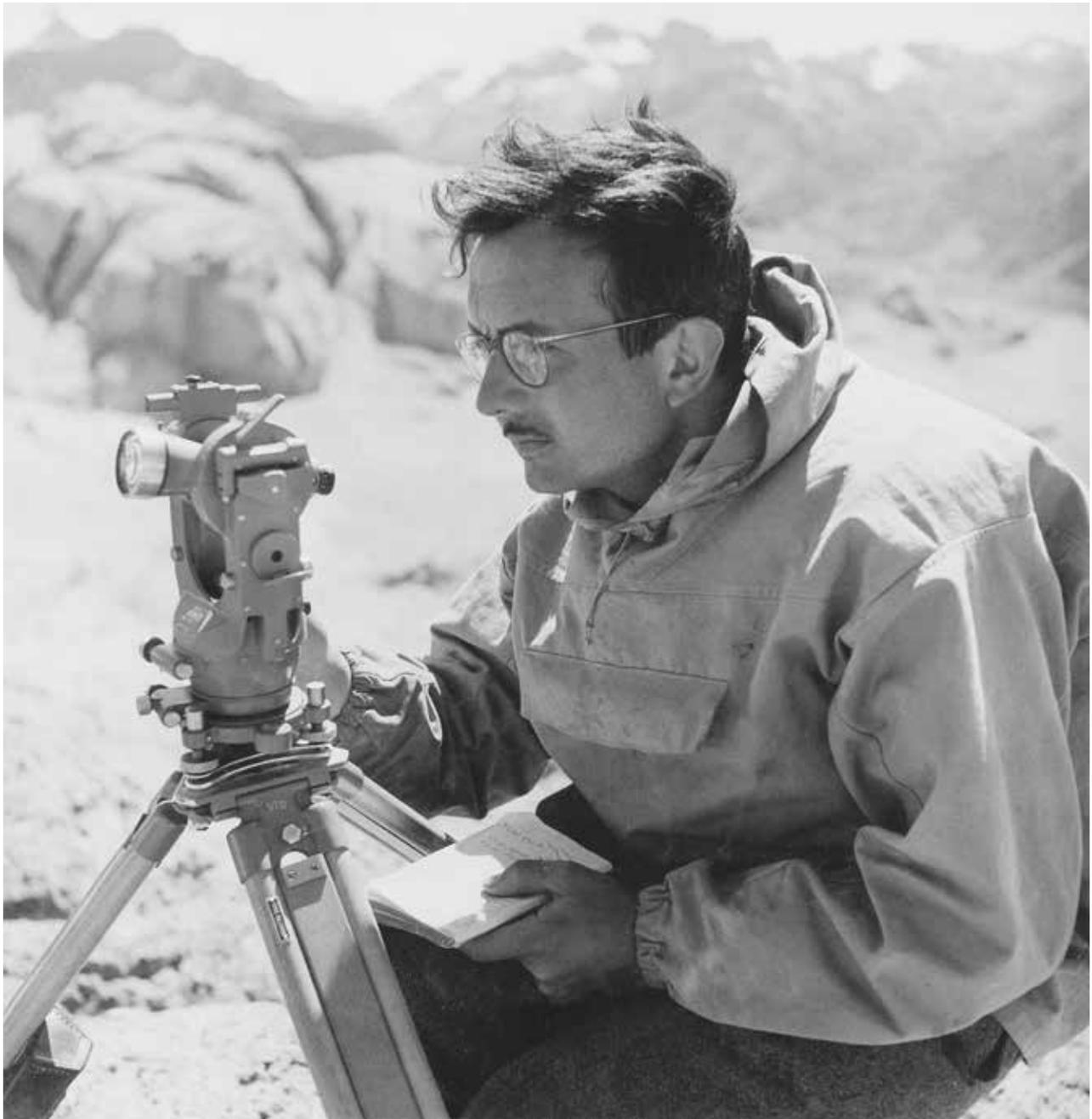
En el Instituto Geográfico Militar argentino entregan a Lliboutry un teodolito Wild T2 y, para su sorpresa —puesto que no lo había pedido—, un nivel geodésico. Sin mira vertical ni portamira, el nivel es absolutamente inutilizable. Además de un termómetro de máxima y mínima y un barómetro traídos de Francia, era el único material científico de la expedición.

El grupo despega en un DC-3 desde el aeropuerto de Ezeiza y aterriza de noche en Puerto Santa Cruz dieciocho horas más tarde.

«Salimos el 24 de diciembre de 1951 de Puerto Santa Cruz en dos camiones militares, recorriendo 250 km de pampa bajo el sol y sin ningún árbol. Nos detuvimos en una estancia donde nos habían invitado a presenciar la esquila del rebaño. [...] Aparte de esta estancia, escondida en el valle del río Santa Cruz, y de dos aldeas (que por lo menos figuran en los atlas), es un desierto. Sólo vimos algunos ñandúes (pequeñas avestruces), dos guanacos (llamas salvajes), un tatú, y sobre todo un hombre que corría bajo el sol, con el torso desnudo y la camisa puesta como turbante en la cabeza. Era Lionel Terray, que había bajado del camión que iba delante de nosotros y quería perder algunos kilos de grasa superflua adquiridos durante la gira de conferencias».

Al día siguiente, la caravana llega a su destino. Mientras sus camaradas descargan los camiones, Louis aprovecha el tiempo excepcional para realizar varios levantamientos con el teodolito, que le permitirán llevar a cabo su trabajo de topógrafo. No tiene experiencia en topografía y no sabe utilizar un teodolito, «pero [...] moviendo todos los botones, logré entender cómo funcionaba».

Para preparar la expedición, Louis y sus compañeros sólo han tenido acceso a un libro, con muchas ilustraciones, publicado por Alberto De Agostini, un padre salesiano italiano quien exploró los alrededores del Fitz Roy en los años de 1930.



«La zona del Fitz Roy prácticamente no ha sido estudiada desde el punto de vista geológico, ni hubiera podido serlo correctamente, por no existir un mapa detallado de ella. Medidas efectuadas con un teodolito por Lliboutry. Los puntos base escogidos fueron el punto más alto del cerro Rosado y la cumbre central del cerro Polo. El teodolito fue colocado encima de una excavación circular de un metro de diámetro y cincuenta centímetros de profundidad».

Desgraciadamente, este libro no incluye ningún croquis topográfico de la ladera oeste. En cambio, el agregado militar de la embajada les proporcionó una vista aérea del macizo del Fitz Roy desde el oeste, tomada por la Fuerza Aérea estadounidense, que con el consentimiento del gobierno chileno, había realizado en 1945 una cobertura de aerofotogrametría de todo Chile por vuelo Trimetrogon.

«La Patagonia, tierra de pioneros y aventureros, no aparece nombrada en ningún atlas actual. Ninguna provincia chilena o argentina lleva este nombre que en-

ciende y alimenta la imaginación. Hay que consultar los atlas del siglo pasado para ver nombrada Patagonia a la región que cubre la punta sur del continente sudamericano, más allá de los 38° de latitud sur, una región distinta a Chile y Argentina, y que escapaba al control de las autoridades criollas de Santiago o de Buenos Aires».

A pesar de las promesas del Presidente Perón, el transporte del equipaje y de los víveres no se desarrolla como estaba previsto. Fue imposible arrendar caballos en el lugar, lo que es imprescindible para cruzar torrentes en crecida; Lionel Terray y Jacques Poincenot parten



El Monte Fitz Roy, o el cerro Chaltén (3.405 m) visto desde el cerro Polo. Debe su nombre al capitán inglés Robert Fitz Roy, quien, en 1831, realizó a bordo del HMS «Beagle», misiones hidrográficas y cartográficas con Charles Darwin en la Patagonia y Tierra del Fuego.

«La extraordinaria cumbre del Fitz Roy se alza a 5 km al este del Hielo Continental que se extiende sin interrupción desde el río Pascua hasta los fiordos Peel y Mayo, es decir unos 320 km, con un ancho medio de unos 50 km. Es cumbre fronteriza entre Argentina y Chile».

a pie llevando cargas pesadas. Esta impaciencia propia de los europeos le costará la vida a Jacques.

El 4 de enero, Azéma y Lliboutry salen a reconocer el terreno, con víveres para tres días, con la intención de rodear el Fitz Roy. Siguiendo la ribera izquierda del río donde se había ahogado su compañero, llegan al segundo día al pie de la montaña. En *La conquête du Fitz Roy*, Azéma cuenta:

«Cuando llegamos al paso, Lliboutry me propone subir a la cumbre. Estoy contento de dejar el enorme bolso que había acarreado hasta entonces bajo el calor agobiante, y de poder divertirme un poco.

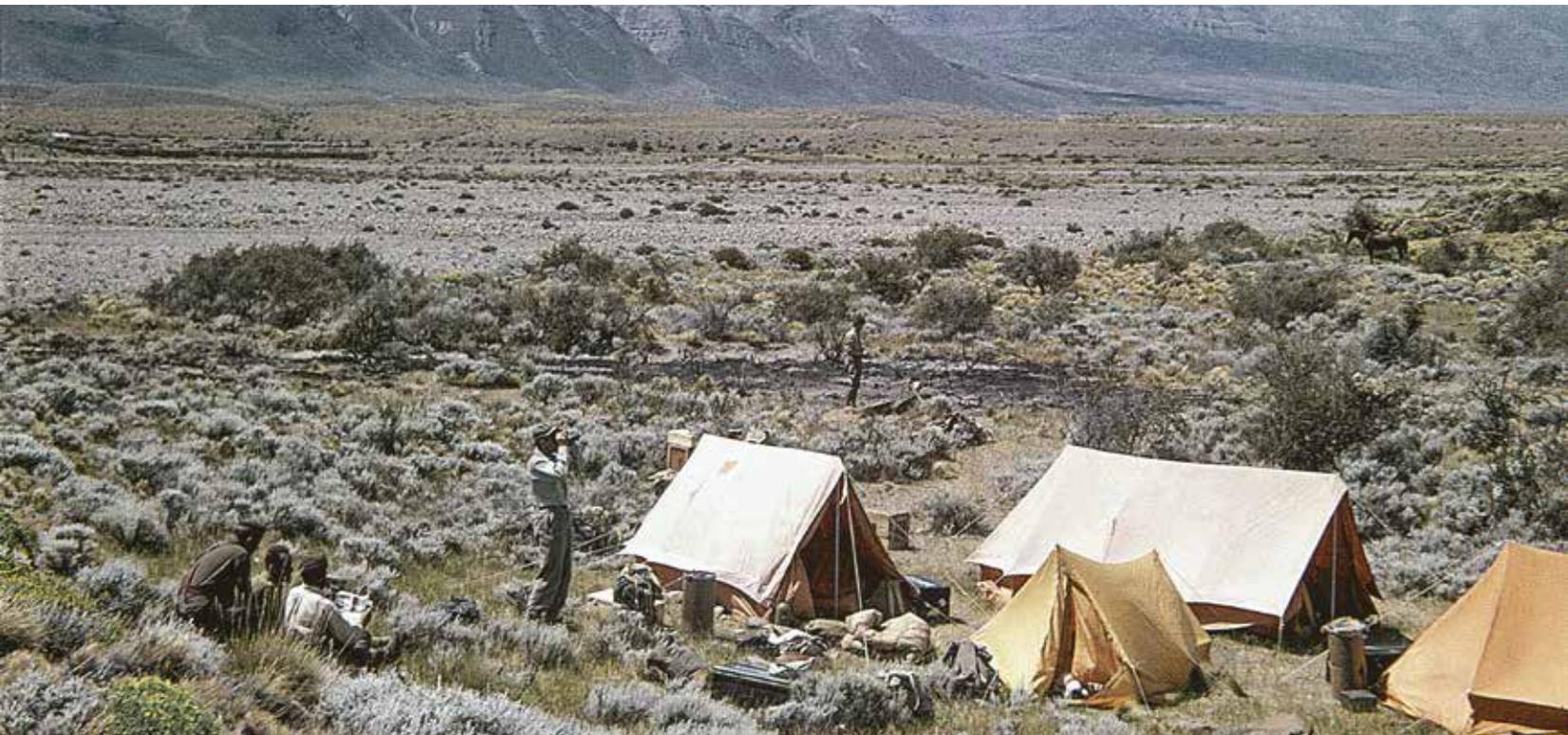
Algunos minutos después, livianos y ágiles, llegamos a la cumbre y recibimos nuestra recompensa: la otra cara de la moneda, una vista impresionante. Primero el valle alto del Fitz Roy, largo paso rectilíneo hacia el oeste, cerrado por los glaciares y las crestas del cordón Adela.

[...] Frente a nosotros, el cerro Solo, punta avanzada de la cadena montañosa, ostenta sus rocas oscuras

y sus neveros resplandecientes. A la derecha la pirámide del Fitz Roy, negra a contraluz, domina el escenario. Lliboutry cumple a cabalidad con sus atribuciones de topógrafo y el transporte de pesados instrumentos. Mientras él calcula y triangula, yo tomo fotografías panorámicas. Algunas dificultades de terreno nos empujan hacia la cresta de la morrena, desde donde descubrimos un lago glaciar de alta montaña, directamente alimentado por un suntuoso glaciar que desciende desde un vasto anfiteatro con crestas empenachadas. Se trata del lago Torre que regula el río Fitz Roy. [...] Los tonos cálidos, desde el púrpura al anaranjado, colorean las dioritas que bajan del Fitz Roy, y luego, en el quiebre, revelan, un blanco puro piqueteado de negro. Ahogadas en las arenas glaciares, encontramos extrañas flores de cristal de yeso quebradizas como azúcar».

Pero durante la noche se desata el mal tiempo.

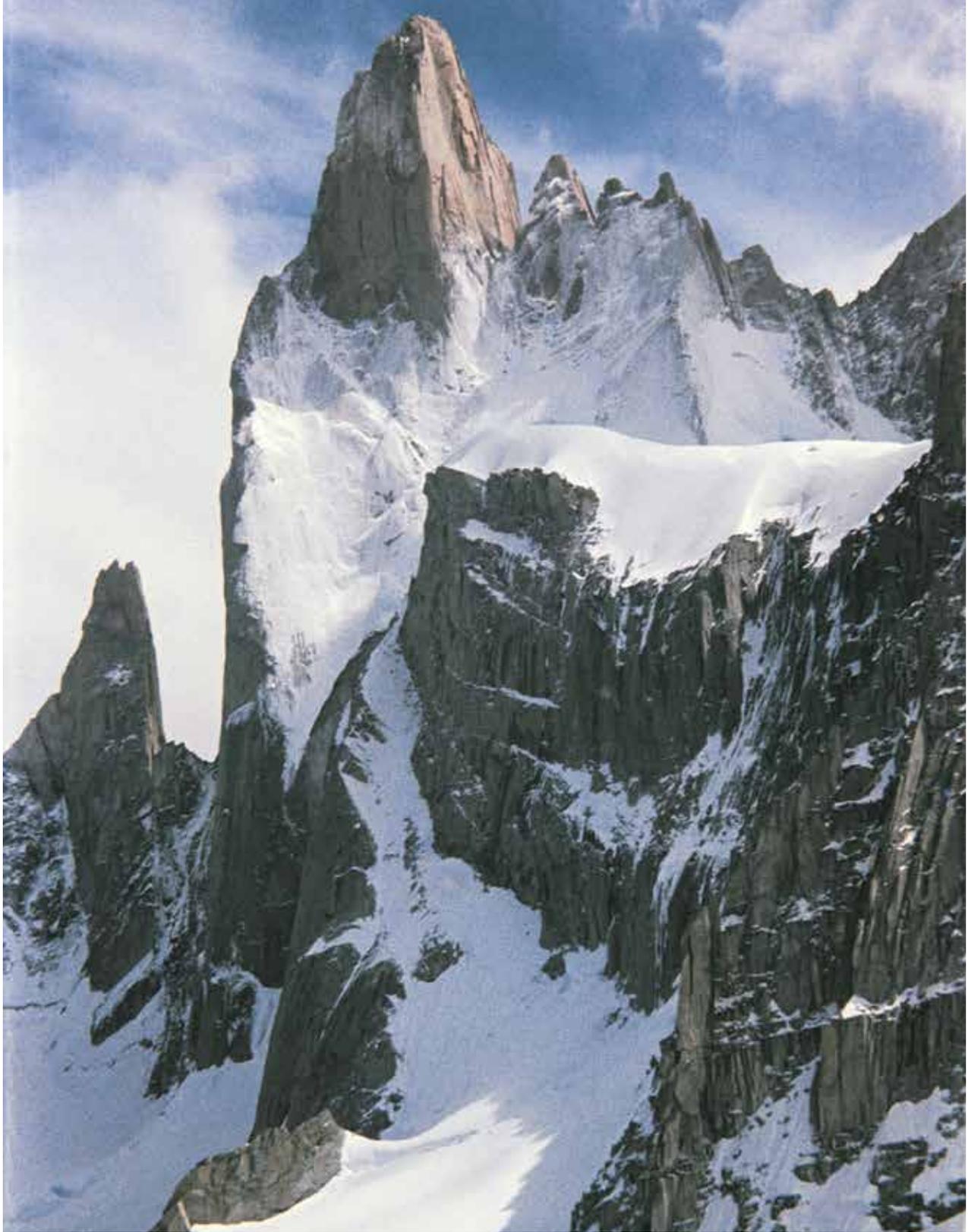
«A ratos, el viento parece calmarse, y luego se reanuda con más violencia, sin cesar. Con baches de aire,



▲ Campamento cerca del río de las Vueltas. Lago Argentino, provincia de Santa Cruz.

▼ René Ferlet, en el lago y glaciar Viedma.



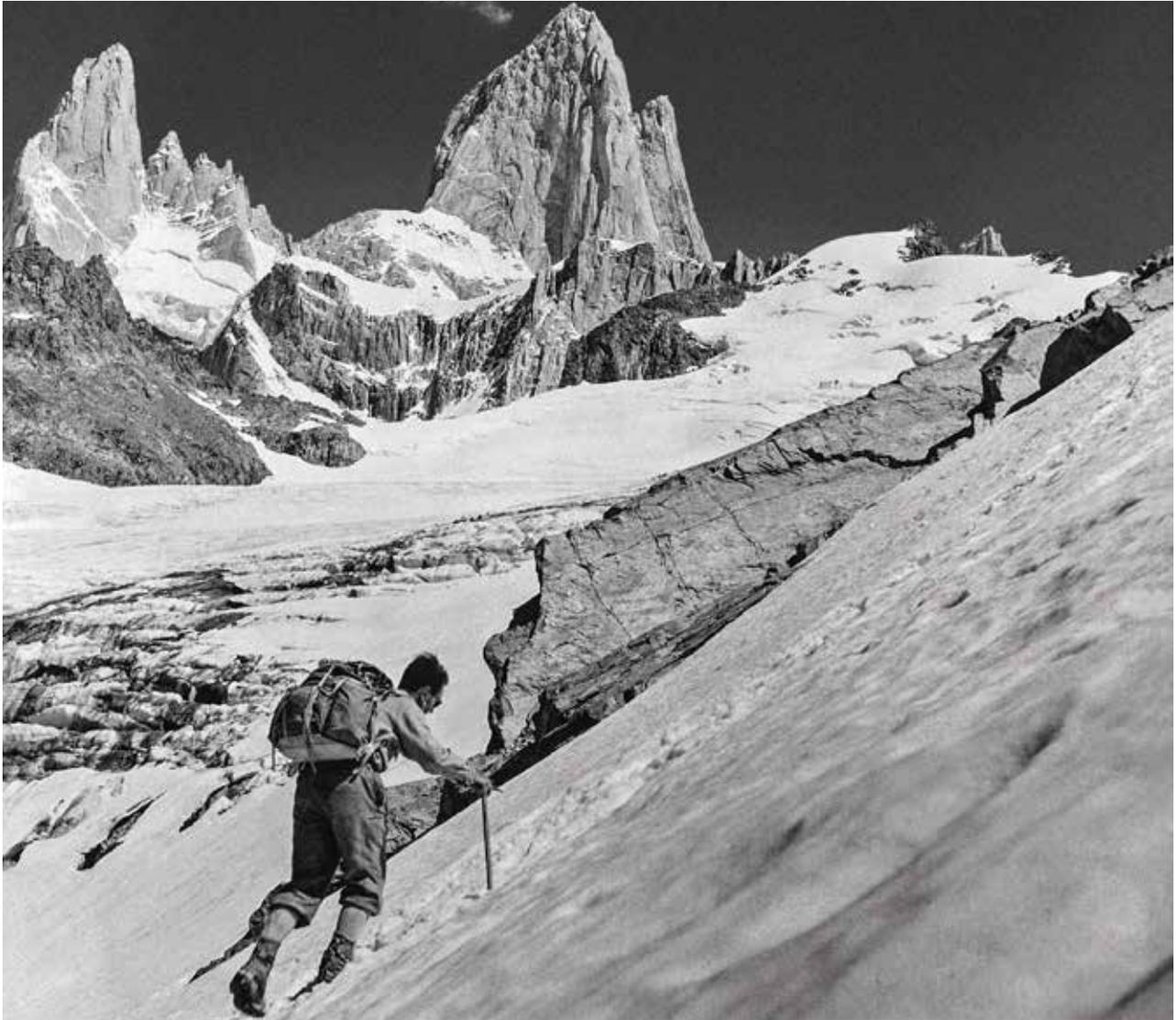


Aguja Poincenot (3.002 m) fue nombrada en memoria de Jacques Poincenot, uno de los integrantes de la expedición, que falleció durante el cruce del río Fitz Roy.

ráfagas y depresiones, la carpa respira de manera entrecortada e irregular. El ruido del viento es espantoso» (Azéma, 1954).

Renuncian finalmente a rodear el macizo y se unen al grupo.

«Esperando el inicio del ascenso, para ocupar las horas muertas de ese día sin sol, variar el menú e impresionar a los amigos, ambos deciden preparar un arroz a la española. Jamón de pecaí en cubos, tajadas de mortadela, restos de una pierna de cordero, una lata de sardinas en



«Tuvimos cuatro días sin viento en todo un mes. En el valle del río Eléctrico, abierto a los vientos de oeste, hubo días con un viento continuo de 100 km/hora, con ráfagas de 180 km/hora. En las cumbres era quizás peor; en la silla del Fitz Roy, un lugar donde en general no se podía permanecer de pie, resultó imposible vivir en una gruta con abertura al oeste, a causa de las bruscas compresiones de las ráfagas de viento. Dos carpas de altura experimentadas en los Himalaya fueron destruidas y los campamentos altos tuvieron que estar todos ubicados en grutas en el hielo».

Francisco «Paco» Ibáñez.

aceite, cinco latas de mejillones (de Uruguay), una lata de puré de tomates» (Azéma, 1954).

Del 7 al 10 de enero, los campamentos I y II han sido instalados a 1.970 y 2.335 m de altitud. El 11 de enero, Terray y Depasse excavan una cueva para el campamento III a 2.760 m, punto alcanzado por Aldo Bonacossa (el primero en haber intentado ascender la cumbre) en 1937. Luego Louis Lliboutry participa en el porteo hasta el campamento II. Sube dos veces, antes y después del asalto final.

«Con buen tiempo, este mirador ofrece una magnífica vista del suroeste, hacia las agujas que bordean





Louis Lliboutry, en la cumbre del cerro Polo (1.177 m).
«La expedición adoptó la propuesta del Dr. Azéma: Agujas Mermoz y Guillaumet al norte del Fitz Roy, Aguja Saint-Exupery al sur de la aguja Poincenot. Los primeros alpinistas que escalaron aquellas cimas no cuestionaron los nombres. Gracias a mi mapa, estos nombres son ahora oficiales. Reconozco que me siento orgulloso».

el campo de hielo, cubiertas de escarcha. Estas agujas permanecen la mayoría del tiempo en las nubes, a menudo formadas a partir de una superfusión de microgotas. Lo curioso es la presencia de enormes hongos de escarcha y de nieve alrededor del cerro Grande, más todavía que en el cercano cerro Torre: tienen entre diez y veinte metros de altura y sobresalen por todos lados».

El 24 de enero, Lliboutry parte hacia el cerro Polo, [...] con un enorme proyectil de 240 que cuelga de la silla de su caballo. Es la funda del pesado teodolito que le va a permitir realizar mediciones de las alturas de la región. Lliboutry, orgulloso de sus logros, nos revelará que la altura del Fitz Roy es de 3.440 m; es decir, 55 m

más de lo que habían indicado los levantamientos anteriores. Algo es algo (Azéma 1954).

La topografía del macizo devela sus primeros secretos a Lliboutry:

«Delimitando el Hielo Patagónico Sur, meseta nevada situada a 1.300-1.800 m de altitud, se encuentra una cadena secundaria de 25 km de largo, que culmina en su centro con el cerro Torre (3.102 m). El Fitz Roy (3.405 m) se encuentra a 5 km al oriente, en el centro de una pequeña cadena paralela, o más bien en semicírculo abierto hacia el oriente, de 6 km de diámetro».

Con Depasse y Paco, seguirá desde el campamento base, el progreso en la pared de la cordada Terray-Magnone, que había salido el 31 de enero para el ascenso

final de la cara sureste del Fitz Roy. Llegan a la cumbre el 2 de febrero a las 14:30 horas, luego de haber agotado todas sus clavijas y a costa de esfuerzos increíbles.

El 17 de febrero, los miembros de la expedición están de vuelta en Puerto Santa Cruz, donde visitan la tumba de Jacques Poincenot, y algunos días más tarde llegan a Buenos Aires, donde los esperaban cócteles y conferencias de prensa.

El ministro de Deportes, señor Valenzuela, puso un avión a disposición del equipo para regresar a Buenos Aires pasando por el Fitz Roy.

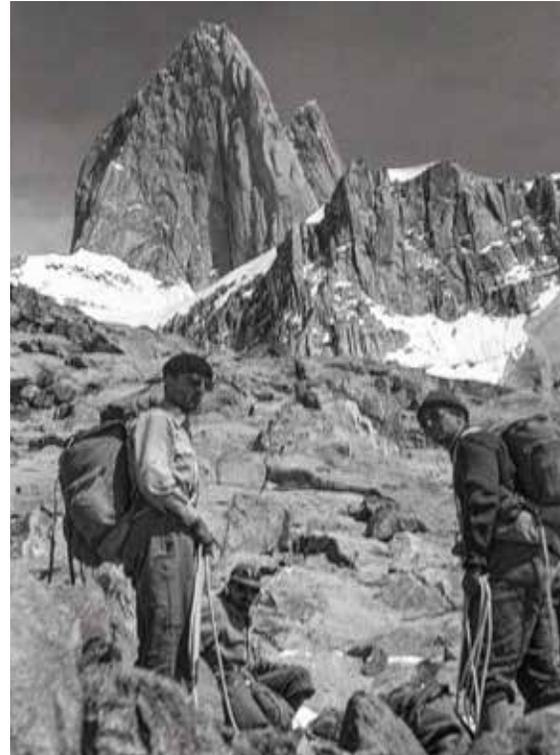
«Giramos dos veces por encima del Fitz Roy. La visibilidad era excepcional, incluso hacia el glaciar Continental. Una sensación extraordinaria e inolvidable. [...] Me impresionó una inmensa lámina de granito, el Pier Giorgio, que cae en el glaciar Marconi a través de un acantilado monolítico de 1.200 m de alto».

El 1 de marzo, el grupo parte a Mendoza, con la intención de escalar el Aconcagua. Freddy Marmillod se une a ellos, decidido a reconocer una nueva vía. Pero algunos atrasos en el programa obligan a Louis a dejar a sus compañeros para retomar los cursos en la universidad.

En una carta con fecha del 20 de abril, escribe al profesor Gignoux (Maurice Gignoux [1881-1955], director del Instituto de Geología de Grenoble, uno de los más grandes geólogos alpinos de su época, el primer especialista mundial de la geología relacionada con las represas):

«No se puede emprender nada sin un buen mapa, inexistente hasta ahora. Como no se sabe cuándo el IGN argentino hará un levantamiento fotogramétrico de este sector (si el viento lo permite), he elaborado y dibujado solo un mapa bicolor a escala 1/50000, que cubre cerca de 800 km², alrededor de la inclusión de granodiorita del Fitz Roy. Por otra parte, he recolectado unas cuarenta muestras de rocas, encontrado fósiles, anotado las antiguas morrenas y terrazas glaciofluviales, los bloques erráticos, los frentes actuales de los glaciares, y he podido hacer curiosas observaciones sobre el estado de la nieve y del hielo».

Portada de la revista *Paris Match*. Número 164 del 3 al 10 de mayo de 1952. «Lionel Terray, el compañero de Herzog en el Annapurna, encabezó la cordada de asalto francesa que ha derrotado la cumbre más temible del “Nuevo Mundo”».



«El 2 de febrero de 1952, en la niebla y las primeras ráfagas de escarchas, dos alpinistas franceses, Guido Magnone y Lionel Terray, pisaron finalmente la cumbre más temible de los Andes de la Patagonia, el Fitz Roy, después de una lucha ininterrumpida de tres días, al límite de las posibilidades humanas» (*Paris Match*).





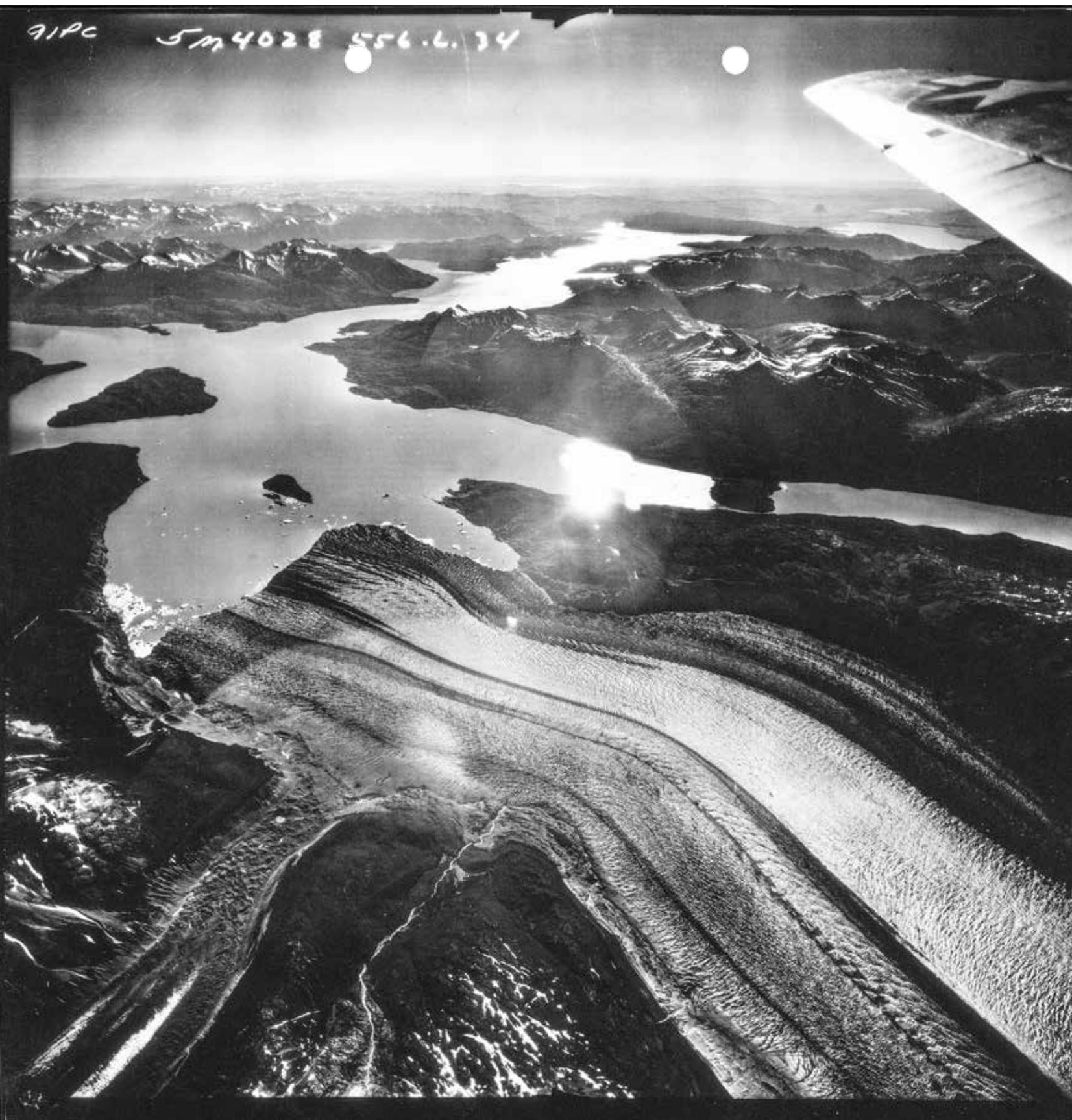


«No hay necesidad de presentar a Lionel Terray al lector. Siempre el primero en despertarse, eligiendo las cargas más pesadas, de una moral inquebrantable, fue la mejor locomotora posible para una gran expedición».

◀
Vista sobre el Fitz Roy, el cerro Torre, el cordón Adela
y el glaciar Grande.



Glaciar Pío XI. Foto AAF 1945.



Glaciar O'Higgins. Foto AAF 1945.



Cordillera de Darwin, fiordo Garibaldi, al oeste de Tierra del Fuego, la más austral del espinazo andino.



Altiplano Italia. En primer plano, el fiordo Falcón.

91PC 5M.4028 410-R-219



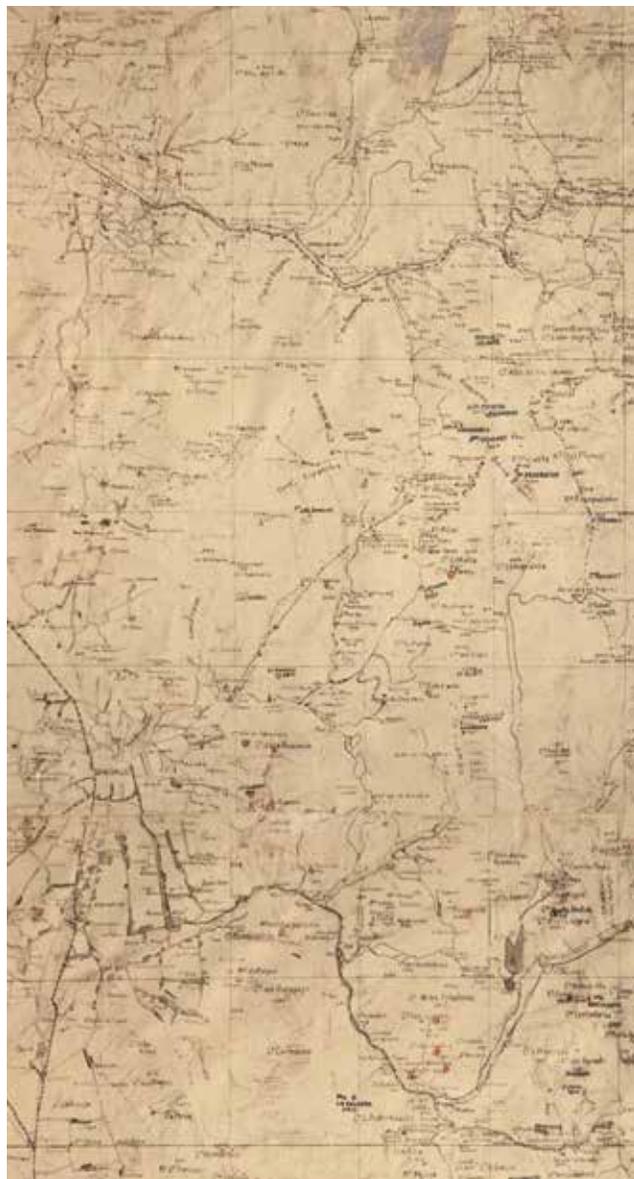
91PC 5M 4028 H10-R-206



4-
Fig. 12

Glaciar Viedma, Campo de Hielo Sur.

La cartografía de los glaciares andinos



Carta de excursionismo de la cordillera central. W.Klatt & F.Fickensher 1929. Escala 1:250.000. «La carta nacional chilena al 1:500.000 no fue prácticamente modificada desde los tiempos de Risopatrón. Prácticamente ningún glaciar figura en este mapa, aun cuando hay unos 1.200 km² de glaciares entre 33° y 35° lat.S. Este mapa fue ampliado al 1:250.000 y notablemente mejorado por Klatt y Fickensher con abundantes cotas y toponimia, y por primera vez indicación de los glaciares».

El 24 de junio de 1952, Lliboutry escribe al director de Educación Superior francés, sin duda orgulloso del trabajo de cartografía que ha realizado y feliz de poder pensar en un futuro como glaciólogo.

«Me permito enviarle un mapa que realicé de la región, como miembro de la expedición francesa al Fitz Roy. Determiné las posiciones y altitudes de las cumbres (visibles durante unos pocos días en el año), la naturaleza de las rocas, los frentes actuales de los glaciares, los diferentes microclimas y las zonas de vegetación, etc., en una región muy interesante acerca de la cual sólo existían hasta ahora informaciones extremadamente vagas e imprecisas.

Los geógrafos de Buenos Aires y de Santiago quedaron favorablemente impresionados por este trabajo, que ningún instituto de geografía civil ni militar había podido realizar hasta ahora, y el decano de la Facultad de Letras de la Universidad de Buenos Aires, Federico Daus, me ofreció publicar una importante monografía que estoy redactando actualmente».

El mapa de la Patagonia meridional, establecido por Louis Lliboutry gracias a su trabajo de topógrafo principiante, no es perfecto, pero es el primero de la región, y será utilizado por los alpinistas durante cuarenta años. Fue publicado en el libro de Louis Depasse que narra la expedición, y permitió establecer la toponimia del macizo.

«Recogí todos los nombres ya utilizados por los estancieros, bauticé los glaciares y un lago a partir del nombre de las cumbres vecinas, y atribuí nombres descriptivos a cumbres secundarias. Dimos el nombre de nuestro camarada Poincenot, quien se había ahogado al principio de la expedición, a la alta y bella aguja que se encuentra al sur del Fitz Roy.

En cuanto al nombre de las otras tres cimas graníticas de esta pequeña cadena, los expedicionarios optaron por la propuesta del doctor Azéma: Aguja Mermoz y Aguja Guillaumet al norte del Fitz Roy, Aguja Saint-Exupéry al sur de la Aguja Poincenot. Los primeros alpinistas que escalaron aquellas cimas no cuestionaron los nombres. Gracias a mi mapa, estos nombres son ahora oficiales. Reconozco que me siento orgulloso».

Efectivamente no hubiera podido estar más orgulloso. En aquel año 1952, Lliboutry cumplía treinta años.



Amador Acevedo, el fiel arriero de las expediciones de Lliboutry. «Los valles secundarios y las altas cumbres han permanecido inexplorados, a pesar de la vecindad de grandes ciudades».

Este joven físico, quien se había transformado en geólogo y cartógrafo un poco por casualidad, ¿acaso medía la importancia de aquella experiencia para el gran glaciólogo en el cual se estaba convirtiendo?

En diciembre llegó por fin el espectrógrafo que había pedido al profesor Kastler el año anterior, e iba a permitir que Lliboutry llevara a cabo fructuosas investigaciones. Escribe a Kastler:

«Su espectrógrafo llegó por fin, y sólo desde antea-
yer está en mi mesa en el laboratorio. Se encuentra en perfecto estado. Le escribiré más largamente cuando haya tomado los primeros espectros, cuando esté menos ocupado (exámenes, viaje a Buenos Aires para la presentación del filme sobre el Fitz Roy, preparación de una pequeña expedición en los glaciares que están cerca de Santiago para elaborar estudios glaciológicos).

El espectrógrafo llegó a tiempo para que yo pudiera realizar observaciones durante un año, antes de mi re-

greso a Francia, en diciembre de 1953 (¿será temporario o definitivo? Depende del departamento de Educación Superior, que, al parecer, me ha completamente olvidado). Espero que todo esté bien en los laboratorios de la Escuela Normal. Mis mejores recuerdos para Soutif, Fruhling y todos».

En diciembre, Lliboutry entregará al profesor Néel un informe sobre el trabajo realizado gracias al viaje a la Patagonia, sin olvidar referirse a los reproches de su profesor en la época en que multiplicaba las escapadas a la montaña mientras preparaba su tesis.

«Quizás un día pensó en mí a propósito de esta expedición al Fitz Roy, que ya pertenece al pasado, creyendo sin duda que estas aventuras alpinas me hacían olvidar su enseñanza, el magnetismo y la física.

En realidad, mi entusiasmo alpino ha disminuido bastante desde Grenoble. Pero no me arrepiento de los días pasados en el liceo de Les Praz de Chamonix, ya que además de una buena salud, he adquirido de aquella

época una técnica muy útil para mis actuales preocupaciones científicas.

[...] Fueron 6 meses de trabajo para revisar los resultados científicos que yo había recogido solo (mis camaradas solían llamar paseos a mis salidas de reconocimiento y levantamientos con el teodolito).

Resultado: un mapa orográfico a escala 1:50.000, el primero de la región, un mapa geológico, una monografía de 70 páginas en español, con fotografías, dos artículos para la revista británica *Journal of Glaciology*, y otro artículo que estoy preparando, para la *Revue de Géographie Alpine*.

También elaboré un mapa de las zonas de la cordillera de los Andes cercanas a Santiago, a una latitud de 2°, a escala 1:100.000, a partir de un mapa trimetrogon a escala 1:250.000 bastante falso e incompleto, de fotografías de andinistas y otras que yo saqué, de encuestas, etc. Es el primer mapa donde figuran los glaciares (algunos tienen 15 km de largo), y servirá de base para estudiarlos, lo que haré este verano, y pienso encontrar teorías bastante revolucionarias al respecto. Creo que seré el primero en explicar la formación de los famosos penitentes de nieve, de 1 a 4 m de altura, de los cuales se erizan estos glaciares, para el deleite de los fotógrafos y la pesadilla de los andinistas [...] Para que usted vea que no abandono la física [...].

El montañismo de alto nivel deja rápidamente de interesar a Louis Lliboutry. Para él, la geología y la glaciología representan desafíos también apasionantes y menos peligrosos.

Gracias a la recolección de muestras de rocas, la expedición al Fitz Roy le ha permitido iniciarse en la formación geológica de la cordillera de los Andes. «Aprendí geología a través de la práctica, en montañas muy distintas a los Alpes, donde la estratigrafía es más simple, pero donde los estratos con fósiles que pueden ser fechados son muy pocos. No tuve la oportunidad de realizar excursiones en terreno guiadas por un geólogo experimentado, pero por otro lado no me llenaron la cabeza con teorías sobre la formación de las montañas, en gran parte falsas, que se enseñaban en aquella época».

Siempre fascinado por la glaciología, no sabe exactamente lo que le conviene estudiar. Gracias a un camarada de cordada, entra en contacto con la Sociedad Británica de Glaciología y se suscribe a su revista *Journal of Glaciology*.

En esta revista se habla de nieve —puesto que los ingleses estudian el hielo natural bajo todas sus

formas— y de las diversas formas observadas en la superficie de los glaciares: «conos arenosos», «ojivas», o «franjas de Forbes». En cuanto al estudio del hielo como material, éste se resume en los cristales que lo componen.

En marzo de 1952, la revista británica publica finalmente un artículo que Louis Lliboutry considera importante. Patrick D. Baird observó que «la calota glacial de Barnes, en la isla de Baffin, puede mantenerse en un estado estacionario aunque al final del verano prácticamente toda la superficie esté cubierta de hielo vivo, sin nieve». El hielo que encontramos en la superficie al final del verano es un rehielo reciente, que se ha formado en la primavera sobre el hielo anterior, lo que ha sido llamado más tarde «hielo sobreimpuesto». En el mismo mes de marzo, visita por primera vez los glaciares Olivares, cerca de Santiago, con pendientes de 4.500-4.900 m de altitud.

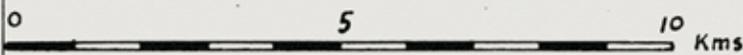
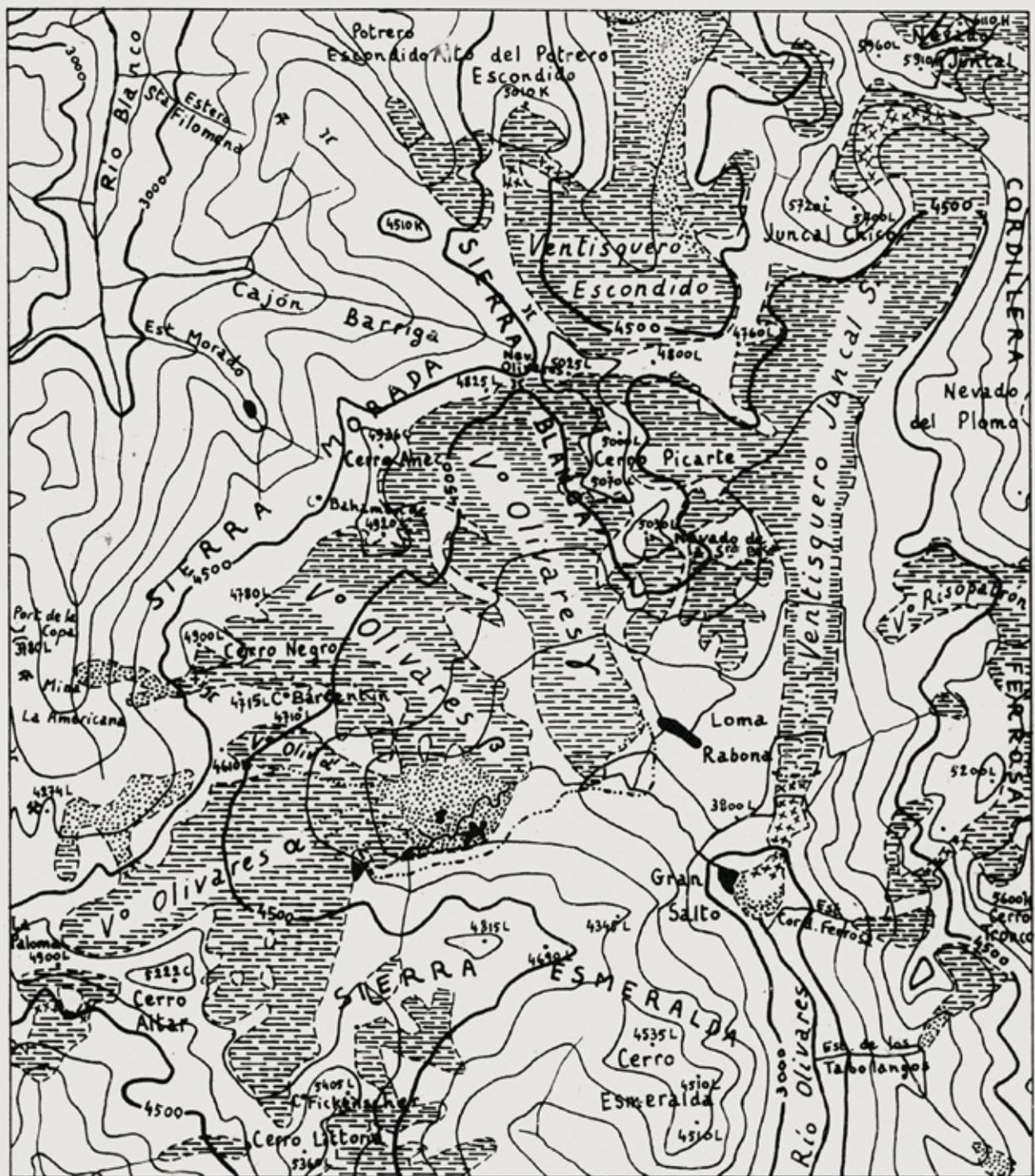
«A final de un verano normal, casi no quedaba nieve: los glaciares de la cordillera de los Andes que están cerca de Santiago se alimentan también de hielo sobreimpuesto. Tiempo después se reconoció la importancia de este proceso en Groenlandia. Varios científicos habían ido antes sin darse cuenta de este fenómeno».

A propósito del desagüe de los glaciares, Lliboutry sólo encuentra en el *Journal of Glaciology* una referencia a mediciones inclinométricas realizadas en el Jungfrau-firn, cuenca de alimentación del gran glaciar Aletsch.

«En 1950-1952, la principal preocupación de los glaciólogos parece ser la actualización de la crónica ligada a los avances y retrocesos de los frentes glaciares, y convencer a los geógrafos sin conocimiento de mecánica que sus ideas sobre el desagüe de un glaciar eran absurdas. No representaba ninguna problemática seria, afortunadamente para mí, puesto que si hubiera existido, habríamos requerido ciertos equipamientos de terreno y laboratorio. Ya que no tenía ninguno a mi disposición, no me hubiera atrevido a embarcarme en la glaciología».

►
Louis Lliboutry realiza por primera vez el levantamiento y el estudio científico de los glaciares de los Andes chileno-argentinos centrales. *Mapa de los glaciares Olivares Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur*. Lliboutry, *Nieves y glaciares de Chile*, 1956.

«Hay más de 1.300 km² de glaciares, la mitad de los cuales están en cada país. Los más extensos se encuentran en el macizo de Juncal (6.110 m) y al sur del volcán Tupungato. Aunque distantes de Santiago de 40 a 100 km, no aparecen en ningún mapa y sólo se conocen por algunas decenas de andinistas».



..... Limite des glaciers en 1935

Equidistance des courbes de niveau: 300 m

Dressé par l'auteur

-  Glacier à penitents
-  Séracs
-  Glacier recouvert ou glacier de pierres

Exploración de los altos Andes cerca de Santiago

Con el dinero ahorrado durante la estadía en Argentina, Louis compra un auto de ocasión, con el cual se propone visitar Chile en compañía de su colega Jean Borde y de su mujer. Primero aprende que manejar un vehículo en Chile requiere familiarizarse con algunas reglas de tránsito locales.

«Al borde de las veredas de Santiago, una ciudad donde las calles no tienen pendientes, uno se estacionaba parachoques con parachoques, sin ninguna velocidad puesta, ni usar el freno de mano. Para estacionarse en paralelo, uno empezaba por empujar con el parachoques todos los autos que se encontraban adelante y todos aquellos que estaban atrás. Este método destinado a ahorrar espacio debió ser abandonado en los años 60, cuando se instaló en Chile una cadena de montaje del Citroën 2CV, la «citroneta», como la llamaban allá, que casi no tenía parachoques. Los ingenieros de Citroën, que no habían vivido nunca en América del Sur, durante mucho tiempo consideraron los parachoques como simples adornos. [...] En los vertiginosos caminos de tierra en la montaña, sin barandas, [...] uno maneja por el lado de la montaña, tocando enérgicamente la bocina en las curvas sin visibilidad, y para cruzarse con otro vehículo hay que ir muy despacio».

Gracias a su viejo Chevrolet, Louis Lliboutry toma el fin de semana una de las dos únicas rutas montañosas que suben hasta las laderas nevadas de los Andes. La primera sigue el hermoso y alto valle del río Maipo hasta el río Yeso, a 2.700 m de altitud, cerca de la frontera con Argentina. Y desde ese lugar, una pista conduce a través del valle a la laguna Negra, un lago que abastece de agua potable a la cuenca de Santiago. El acceso está reglamentado. «Pero igual fui una vez diciendo que iba a estudiar el glaciar que alimenta la laguna. Era la primera vez que yo declaraba ser glaciólogo».

La otra ruta que él conoce bien va hacia el norte siguiendo el río Mapocho y los cerros agrestes de Apoquindo y de Las Condes, y luego hacia el río San Francisco, para ir más allá de Pérez Caldera (a 2.713 m de altitud) hasta la mina La Disputada de Las Condes que pertenece a una compañía francesa, M'Zaita, del grupo Penaroya. En 1952 la explotación era subterránea.

«Se accedía a unas inmensas salas a través de galerías. A lo largo de las paredes, a través de senderos de cornisa, los mineros iban a perforar la roca, a colocar cargas de dinamita, y prendían fuego a las mechas con un encendedor». El ingeniero italiano encargado de la explotación, Marcos Gambino, se convierte rápidamente en amigo y Louis subirá dieciséis veces a La Disputada entre marzo de 1952 y abril de 1956, unas diez veces entre noviembre y abril con largas estadías, durante las cuales estudia formas nivales y periglaciares totalmente nuevas para él.

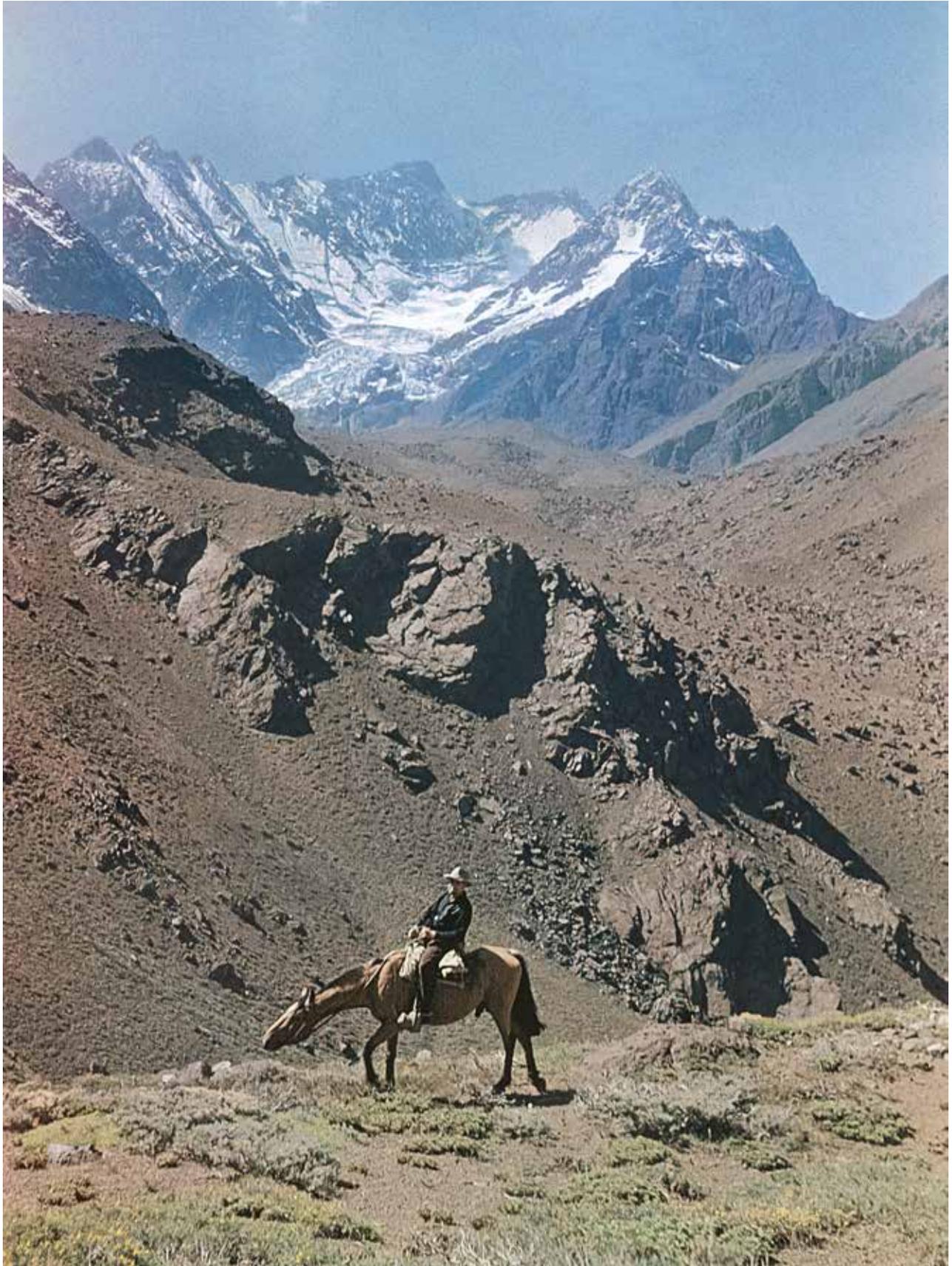
El tema del observatorio del cerro Colorado toma un nuevo giro. Alviai pidió a Lliboutry que realizara un reconocimiento para la implantación de un refugio destinado al estudio de los rayos cósmicos, y éste le indica un cerro de 4.360 m al sureste de la mina que los mineros llaman Infiernillo, a causa del calor que deben soportar en verano. Decide descender esquiando desde este cerro hasta Pérez Caldera (1.700 m de desnivel), «el descenso más bello que se pueda hacer en los Andes cerca de Santiago». Pero nadie en Chile tiene experiencia para construir una estructura tan aérea.

«Alviai vino a verme con Pirazzoli, el constructor a quien había encontrado para construir su observatorio del Infiernillo. Ningún otro constructor quería comprometerse a poner cemento a esa altitud, por temor a heladas. Ya que el observatorio era concebido como un blockhaus, con una puerta de hierro. Pirazzoli no había podido subir al cerro con mulas y estaba a punto de abandonar. Le mostré el camino, con la ayuda de un croquis, y le levanté el ánimo. El observatorio se construyó en tres veranos».

En Santiago, Jean Honoré Luce, ex instructor paracaidista del ejército e historiador del arte, le presenta a Jacques Lanzmann, totalmente desconocido en aquel entonces, quien había llegado a Chile con la ilusión

► «La exploración de la alta cordillera ha sido una empresa privada y desinteresada que ha quedado muchas veces ignorada por las autoridades y entidades oficiales. Sólo en los últimos años, la Corfo (Corporación de Fomento de la Producción Chilena) ha enviado geólogos a la alta cordillera».





de hacer fortuna, y ya no tenía cómo pagar el pasaje de regreso a Francia. Lanzmann trabaja en La Disputada, donde permanecerá sólo algunos meses, sin lograr ahorrar suficiente dinero. Años más tarde, en *Le rat d'Amérique* dará una versión muy novelada de su estadía en Santiago. Su relato está lleno de peripecias muy alejadas de la realidad.

«Pero, como lo explicó el propio Lanzmann a mi hijo, “relatar fielmente los hechos, está bien para tu padre, porque es funcionario. Por mi parte, no tengo más que mi pluma para vivir”. La ley del mercado pide que un autor diga lo que el lector quiere oír, y que haga soñar al lector más que instruirlo».

Louis Lliboutry conservó relaciones de amistad duraderas con algunos miembros del equipo del Fitz Roy, como Lionel Terray, a quien escribe el 3 de octubre de 1952:

«Supe a través de mis padres, y con mucho atraso, que te habían dado la Legión de Honor. Felicidades por esta merecida condecoración.

No he tenido ninguna noticia alpina: ninguna carta de René, ni de Strouvé ni de Paco. Espero que hayan tenido una bella temporada, sin problemas. Sólo me enteraré a través de *Paris Match* de las aventuras y hazañas de Magnone en los Drus.

[...] Una temporada de esquí bastante buena: 15 días en Portillo, 8 días en el Llaima (con 4 días de tormenta que luego dio paso a un paisaje realmente hermoso) y una excursión hasta el cráter del volcán Llaima, dos recorridos que hice por primera vez esquiando.

También estoy elaborando un mapa a escala 1:100.000 de los Andes cercanos a Santiago, que cubre 220 km, amplificando y corrigiendo el mapa aéreo a escala 1:250.000, que los militares habían por fin entregado a los andinistas (Luego de que los andinistas hayan salvado la vida de un grupo de militares geodesianos que habían quedado bloqueados en la cima en otoño, debido a la primera caída de nieve).

Durante el próximo verano iré seguramente tres semanas al norte de Chile, en el desierto, en la región del Ojos del Salado (una cumbre fronteriza que mide sólo 90 m menos que el Aconcagua). ¡Sin agua, ni pasto, ni camellos, ni llamas, ni sherpas, ni glaciares, ni dificultades técnicas, no parece muy divertido!».



«La antorcha del andinismo es nuevamente encendida después de la Primera Guerra Mundial por el Club Alemán de Excursionismo, con sedes en Valparaíso y Santiago, bajo el impulso de Sebastián Kruckel, A. Maas, Otto Pfenniger (en la foto), y muchos otros».

Carta a la cual Lionel Terray responderá el 22 de febrero de 1953:

«Gracias por tu carta del 3 de octubre de 1952. Gracias por las informaciones y felicitaciones. En un próximo correo te haré llegar los 14.500 francos que corresponden más o menos a los 1.000 pesos que yo te debía. Desde la expedición al Fitz Roy, he tenido una vida muy agitada. Apenas regresé, partí a Perú, donde hice una expedición muy interesante; podrás leer próximamente mi relato al respecto en *Alpinisme*. Apenas regresé de Perú, empecé las carreras en Chamonix. Desde el principio de octubre hago conferencias casi sin interrupción. En general, todo bien. Espero que así sea también en América del Sur. [...] No tengo proyecto de expedición para 1953, pero tengo mucha esperanza para el Everest para 1954.

¿Cuándo te veremos de nuevo en Francia?».

◀
Un arriero en los Andes centrales de Chile.

El misterio de los penitentes de nieve y de hielo



Escalada de penitentes en el cerro Negro, Andes centrales. 1953.

Antes de comprar el Chevrolet, Louis Lliboutry subió por primera vez a La Disputada con dos chilenos, con la intención de ascender el cerro Negro, de 4.940 m de altitud, con poca dificultad, y de donde la vista era excepcional. Después de atravesar el paso de la Copa (3.800 m), bajaron hasta el nacimiento del río Blanco, en un gran circo desolado donde escurren una docena de «glaciares rocosos». Luego de escalar una pendiente de tierra empinada, al lado de la lengua de hielo del cerro Negro, llegaron a la meseta de los glaciares Olivares, a 4.700 m, aproximadamente.

«Allí encontramos nieve endurecida, del invierno anterior; pero no un campo de nieve, sino una suerte de cuchillas de nieve endurecida de dos metros de alto, y cuya base mide menos de cincuenta centímetros de espesor, alineadas en filas apretadas en el suelo de tierra y piedras: son penitentes. [...] Se trata de láminas

ubicadas en sentido este-oeste más o menos continuas, apuntando hacia el sol (e inclinándose hacia el norte, ya que nos encontramos en el hemisferio sur) y coronadas por una cresta caprichosamente dentada. Se parecen a una procesión de penitentes blancos encapuchados como se ven en Andalucía durante la Semana Santa».

Darwin fue el primero en señalar la existencia de los penitentes y la atribuyó al viento. Sin embargo, como lo indica Louis Lliboutry, «se ven estratos de rehielo, correspondientes a los períodos de buen tiempo entre las precipitaciones o al primer deshielo, que se prolongan entre una fila y otra de penitentes, y demuestran que no hubo transporte de nieve por el viento».

En una carta al profesor de geología Gerhardt Christian Amstutz, Louis señala:

«Los penitentes de nieve eran conocidos por los arrieros mucho antes de que Darwin hablara de ellos



«Penitentes de neviza del año, a 4.600 m, a fines de enero de 1953, en el Portezuelo del cerro Negro, al borde del glaciar Olivares Beta».



Lliboutry, en un campo de penitentes de hielo a 4.600 m, cerca del cerro Negro.
«Se les llama penitentes a las láminas paralelas de nieve vieja, de neviza o de hielo alineadas en el sentido este-oeste e inclinadas hacia el sol. El penitente resulta de una ablación desigual de la nieve y crece hacia abajo».



«No hay que confundir los penitentes con los seracs, en los cuales las grietas despedazan un glaciar».

al mundo científico en 1835. Efectivamente existen algunos alrededor de los pasos entre Chile y Argentina que los arrieros atraviesan con el ganado; además, ¿quiénes sino descendientes de españoles hubieran tenido la idea de compararlos con los penitentes que participan en la procesión de Semana Santa?».

Lo que caracteriza a los glaciares Olivares, como todos los de la región de Santiago, es que se encuentran enteramente cubiertos por penitentes, lo que significa que la travesía sea extremadamente difícil. Louis y sus compañeros tardan más de cuatro horas en atravesar el campo de penitentes y llegar a la cima del cerro Negro. Pero los glaciares no cubren todas las laderas, lo que los diferencia de los glaciares alpinos. Otra diferencia es la ausencia casi total de nieve endurecida al final del verano. Louis deduce que estos glaciares se alimentan de hielo sobrepuesto.

«Seligman, presidente de la British Glaciological Society, de la que soy miembro, y Gignoux me señalan en sus cartas el gran interés de los glaciólogos por los glaciares de los Andes, sobre los cuales existen solamente algunas observaciones muy superficiales e incompletas realizadas por alemanes. La característica más relevante de estos glaciares es la existencia de penitentes, cuchillas que se encuentran en sentido este-oeste muy cerca unas de otras, muchas veces de varios metros de alto, que se forman sobre todos los campos de nieve o los glaciares.

Encontré la explicación y descubrí un nuevo tipo de glaciar, lo que motivó dos notas dirigidas a la Academia de Ciencias. Varios estudiantes del Instituto Pedagógico me acompañan en estas excursiones, y espero formar un pequeño grupo de glaciólogos. Debo presentar un informe detallado al decano para el desarrollo de estos



«Cuando el campo de nieve se halla sobre un glaciar, los penitentes en vez de caer y desaparecer al final del verano, siguen esculpiéndose en el hielo del glaciar. Foto de penitentes a principios del siglo XX, en los Andes centrales».

estudios. La ventaja es que, como nadie lo ha hecho en Chile, no voy a herir ninguna susceptibilidad».

Lliboutry escribe a Jean Touchard, del Ministerio de Asuntos Exteriores: «No sólo debemos realizar una cartografía previa, sino también las observaciones meteorológicas pertinentes.

Nadie había pensado hasta entonces en examinar los boletines meteorológicos de la estación dirigida por PANAGRA en el paso de la Cumbre (3.847 m). Pero esta estación se encuentra bastante abajo y los boletines están incompletos; por lo que me interesa el proyecto de Alvia de construir una cabaña a más de 4.000 m para estudiar los rayos cósmicos. El proyecto de observatorio en el cerro Colorado, dejado a la iniciativa de los astrónomos, se ha convertido en uno de los grandes proyectos sudamericanos, un pretexto para banquetes y

declaraciones en la prensa, y todo el mundo piensa que está en marcha (¡Physics Today lo daba por hecho!); en realidad, el financiamiento todavía no ha sido votado y falta mucho para que la primera piedra sea colocada.

Un pequeño refugio a 2 horas de la carretera a lomo de mula (que conduce a una mina de cobre a 3.500 m) es mucho más razonable. ¡Descubrí el lugar, donde llevé a los “cósmicos”, quienes nunca se habían aventurado en la nieve ni a esta altura!».

En junio de 1953, Lliboutry envía al *Journal of Glaciology* su primer artículo importante que explica la formación de los penitentes. «Yo había observado que, en un día soleado, los penitentes de nieve endurecida permanecían duros y coherentes, a una temperatura negativa, mientras que en los pasillos situados entre ellos, la nieve endurecida estaba a 0°C, saturada con agua

proveniente de los deshielos». Más tarde, realizará mediciones a través de la calorimetría y concluirá que los penitentes se mantienen a una temperatura por debajo de 0°C, siendo nulo el balance de energía (radiación solar absorbida, menos radiación infrarroja emitida, más calor «sensible» aportado por el aire, menos calor latente sustraído por evaporación).

«En cambio, las franjas entre los penitentes reciben, además del calor directo, el calor difundido por los penitentes. Con una superficie más débil, reflejan menos infrarrojo. Al fondo de estas franjas, el equilibrio a una temperatura negativa no es posible. La nieve endurecida está a 0°C, así que los flujos de radiaciones y los flujos de calor están establecidos. El balance es positivo, y esta energía excedentaria hace que se derrita la nieve endurecida. [...] Sin penitentes, y con un aire frío y seco, el balance energético sería negativo y no habría ningún deshielo».

De todas formas, a más de 4.000 m de altitud, el suelo está permanentemente congelado, lo que explica que se hayan encontrado, en ciertas cumbres de la cordillera de los Andes que dominan una región habitada, los cuerpos congelados y perfectamente conservados de niños indígenas que datan de la época precolonial.

«Quizás se trataba de sacrificios humanos, y uno piensa inmediatamente en ofrendas realizadas a un dios. ¿Pero por qué en estas cumbres, de tan difícil acceso? Según los arqueólogos, sería porque la divinidad era la montaña, ya que suministraba el agua proveniente de la nieve. No estoy seguro de ello. Para mí estaría más bien relacionado con un rito antiguo que proviene de una antigua costumbre que todavía existía en el campo chileno en 1952, la del angelito. Cuando muere un niño, se cree que su inocencia lo llevará directamente al paraíso, y que podrá interceder con la divinidad. Lo visten bien, lo maquillan, y lo exponen ante el público que viene a adorarlo y confiarle sus súplicas. Pienso que estas víctimas indias inocentes eran los ancestros de los angelitos, que intercedían ante las divinidades y habían sido colocados allá arriba para proteger a los seres vivos, de la misma manera que se colocaron estatuas de la Virgen en la cima del Grépon, de la Meije o de la Dent du Géant en Francia».

Cada vez que sube a La Disputada, Louis Lliboutry observa incansablemente la estructura de los glaciares rocosos, la formación de los penitentes y de los suelos estriados, características propias de esta región.

«Hoy en día, aquellos que estudian la meteorología, los balances de energía aire-suelo, la nieve, los glaciares,

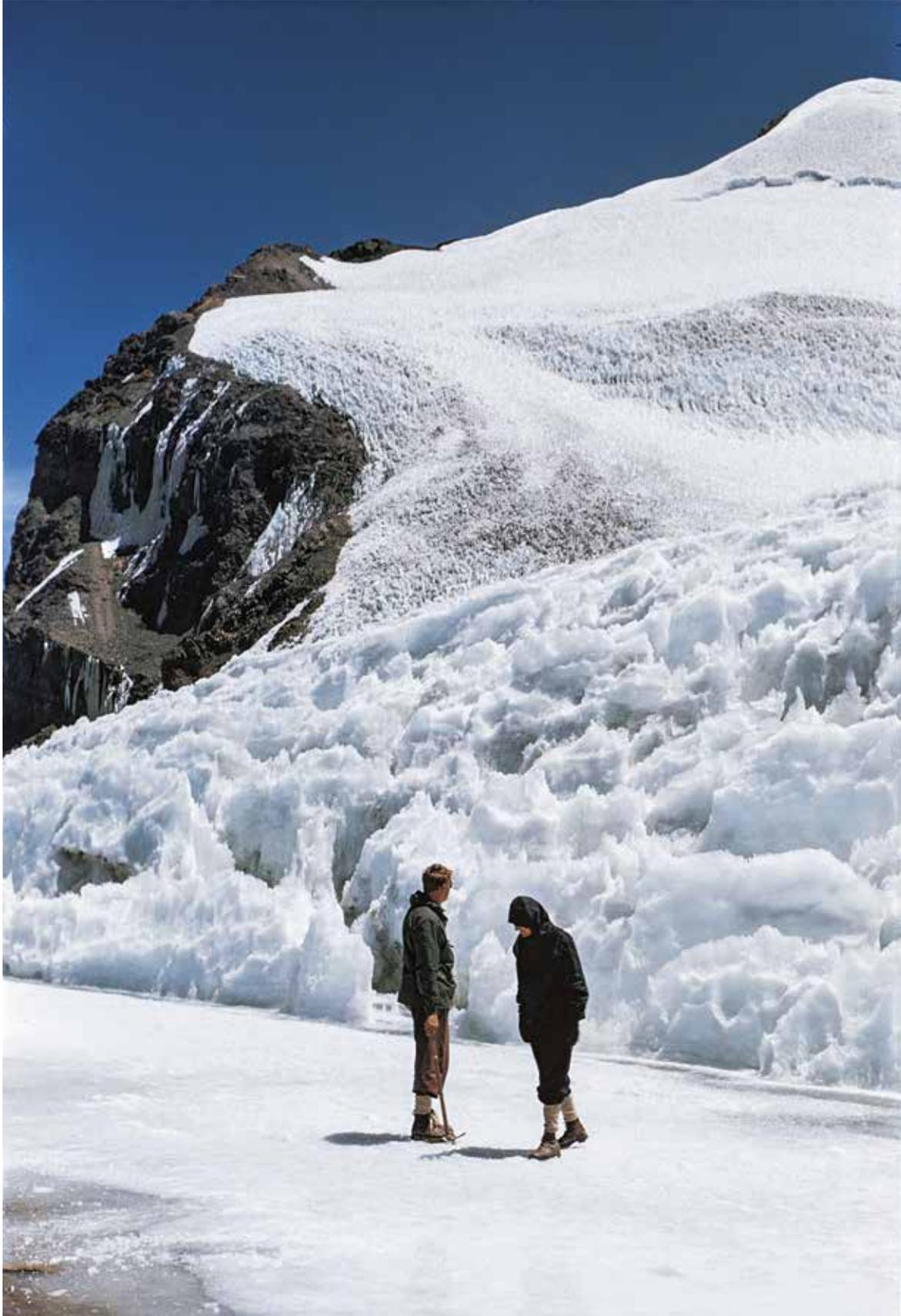
los glaciares rocosos, los suelos estriados, la geología estructural, forman clanes distintos que se ignoran mutuamente. Es una consecuencia ineludible del aumento explosivo del número de investigadores y publicaciones científicas. Uno sólo se puede informar de lo que se hace y de lo que se escribe dentro de un círculo cada vez más estrecho, pero en esos tiempos felices yo podía tener la mentalidad de los geógrafos del siglo XIX, que se interesaban por todo, descubriendo que existían en las ciencias de la Tierra ámbitos de investigación prácticamente vírgenes».

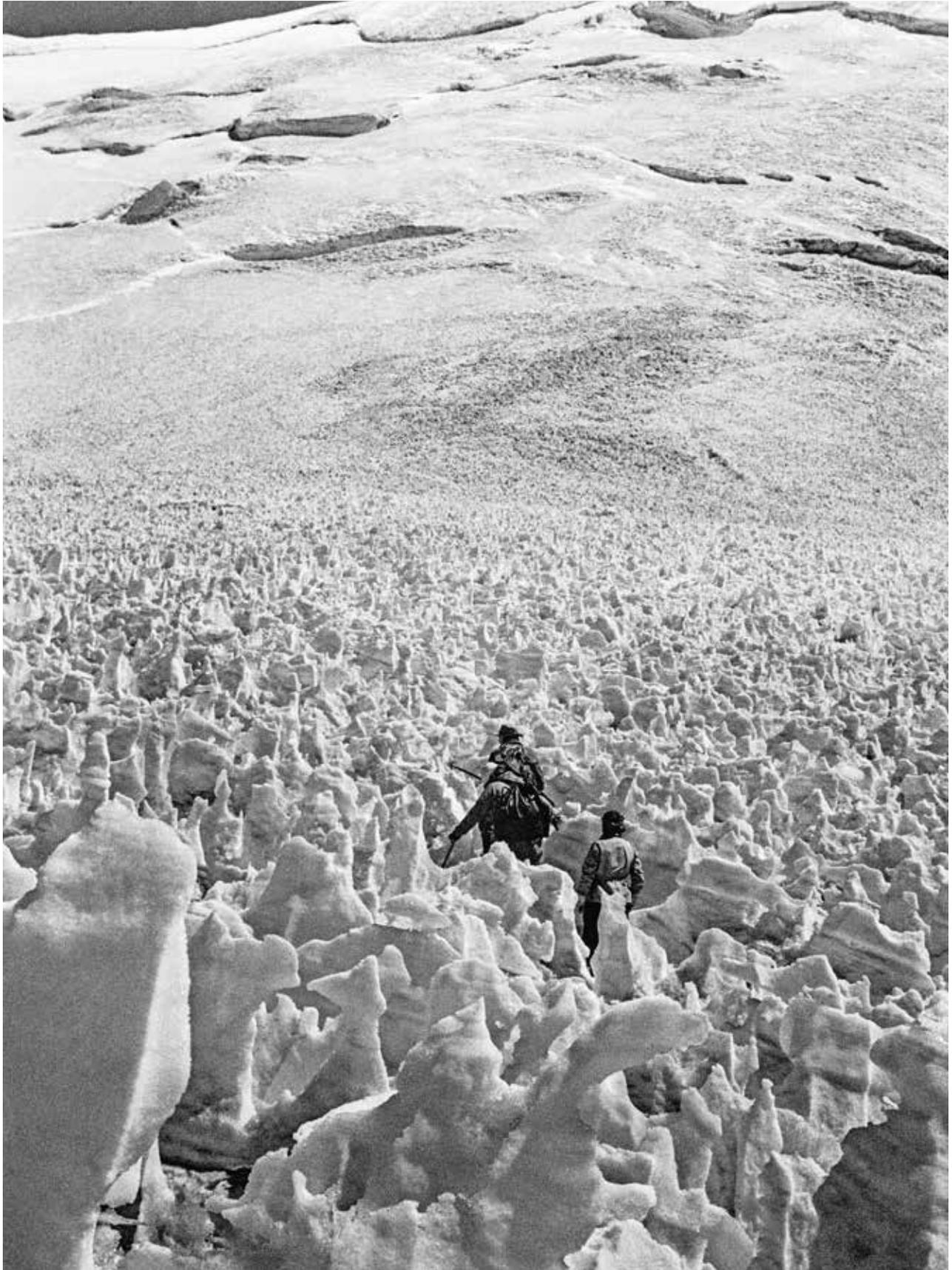
Desde el primer ascenso al cerro Negro, en 1938, realizado por Humberto Barrera, el retroceso de los glaciares puso al descubierto un acantilado que el río Olivares atraviesa en una cascada. Louis lo bautizará en su mapa como «salto Piderit», por el nombre del andinista Carlos Piderit, quien en 1939, con el matrimonio Marmillod, logró ascender por primera vez el Alto de los Leones, una hermosa cumbre de 5.400 m de altura al norte del macizo. A finales de marzo de 1953, Lliboutry va a visitar la gran cascada, el Gran Salto del río Olivares, emisario de los tres glaciares Olivares, a 2 km abajo del Salto Piderit.

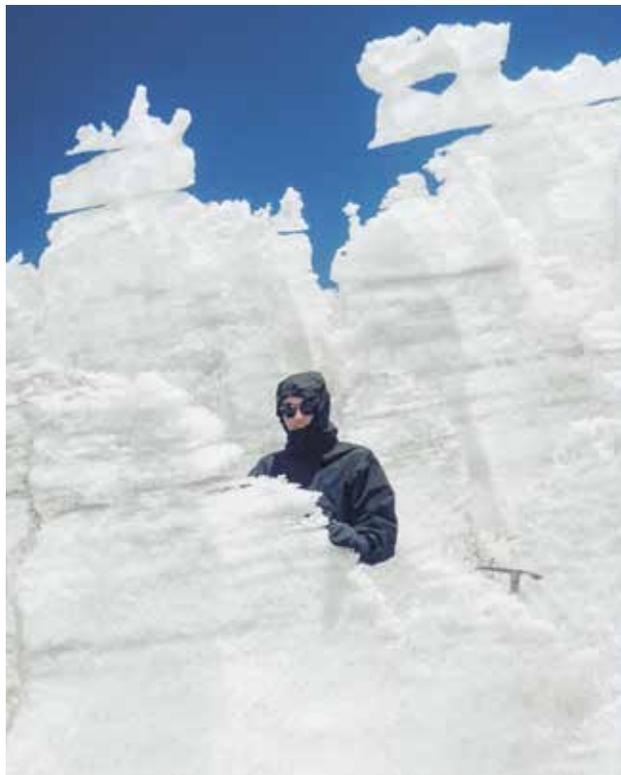
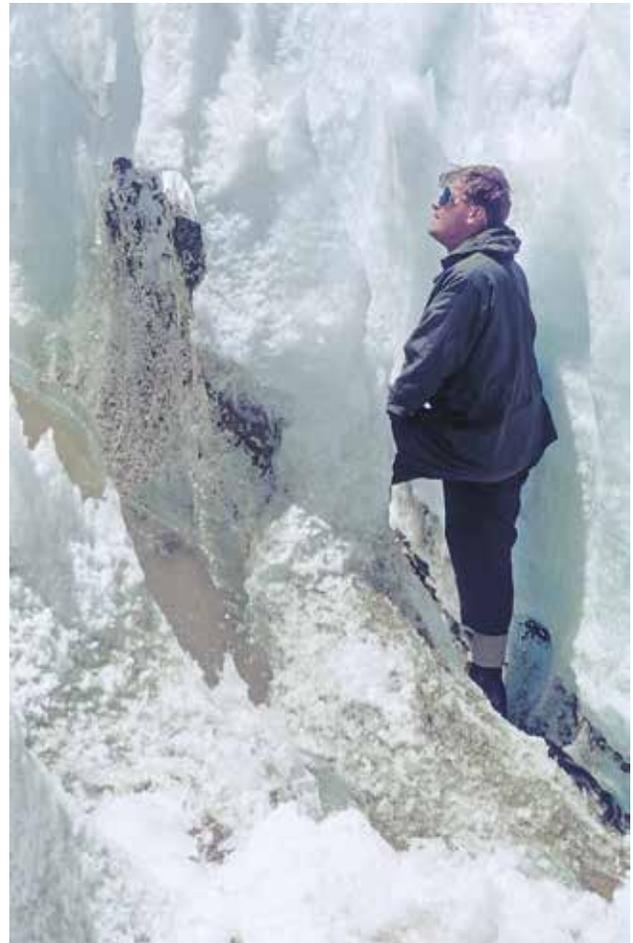
Pero la exploración de los grandes glaciares de Chile, en particular de aquellos que se encuentran en la Patagonia, requiere de medios materiales. Apoyándose en su experiencia de cartógrafo y de glaciólogo, Louis Lliboutry se dirige a Paul-Émile Victor a principios de abril de 1953. Luego de presentarse (ENS, agregación, participación en la expedición al Fitz Roy, estudio de los glaciares de los Andes...), le recuerda la colaboración prevista con el Instituto Argentino del Hielo Continental para la exploración de las calotas glaciares de Patagonia.

«El tema me interesa mucho, ya que empecé estudios de glaciología en Chile, una región que posee las cuatro quintas partes de las calotas glaciares.[...] Una expedición al “Hielo Continental” patagónico realizada por un pequeño equipo mecanizado (no creo que las pulkas sean suficientes) sería muy fructífera, con la exploración de cadenas montañosas de las cuales sólo tenemos vistas aéreas lejanas, sondeos sísmicos, perforaciones (¿alimentación de tipo alpino, groenlandés o de Baffin?), estudio geológico gracias a numerosos

▶
Cerro Negro 1956.
Foto de Louis Lliboutry.







Lliboutry, (arriba a la izquierda) fue el primero en explicar de manera científica el origen y la formación de los penitentes, que pueden adquirir verdaderas formas de esculturas de hielo.

Página 124: Glaciar Horcones, cerca del Aconcagua.
«Franquear un campo de penitentes es una pesadilla para los andinistas».

nunataks y al valle transversal inexplorado —fiordo Peel (Pacífico), fiordo Mayo (lago argentino)—, estudio de cráteres volcánicos en la calota.

Paul-Émile Victor contesta inmediatamente: «Recibí su candidatura con mucho interés y si podemos hacer una expedición al Hielo Continental, creo estar en condiciones de decirle desde ahora que usted será uno de los participantes. [...] Ya que se encuentra en el lugar ¿le puedo pedir, si está de acuerdo, que sea mi representante y que estudie las posibilidades materiales de organizar este proyecto?».

Por diferentes razones, el proyecto no verá la luz, pero Louis Lliboutry está seguro de que podrá participar, como científico, en futuras expediciones organizadas por Paul-Émile Victor.

Las fotografías aéreas de la American Air Force (AAF 1945)

En 1953, Louis Lliboutry escucha hablar por primera vez de un fenómeno sorprendente: algunos andinistas han descubierto que el glaciar Juncal Sur ha avanzado bruscamente y que ha descendido hacia el valle. Los chilenos también han mencionado el avance repentino de un glaciar en 1927 y de otro en 1935. Ciertos textos relatan un fenómeno análogo en 1934 a poca distancia de allí. Como la región está totalmente desierta, nadie se percató de la formación de un lago glaciar hasta el día en que se vació bruscamente, provocando cuantiosos daños. En su libro *Nieves y glaciares de Chile*, publicado en 1956, Louis Lliboutry señala que este tipo de crecida repentina se debe a un fuerte deslizamiento, relacionado con el calentamiento del glaciar. «Las investigaciones que siguieron sobre el tema mostraron que yo iba por buen camino, a pesar de tener unas ideas todavía muy vagas sobre el deslizamiento de los glaciares» (Lliboutry, 1956).

En 1953, Louis tiene finalmente acceso a las fotografías aéreas de los Andes tomadas en 1945 por la American Air Force en vuelos Trimetrogon. Los glaciares se encontraban muy mal representados y cartografiados «[...] los altos Andes sólo habían sido fotografiados desde el oeste, ya que los Estados Unidos no habían tenido la autorización para sobrevolar Argentina. Algunos glaciares, como los glaciares Olivares, ni siquiera figuran en los mapas, y ciertos bancos de nieve cerca de Bariloche han sido considerados como glaciares».

Decide entonces llevar adelante un trabajo a largo plazo, con la ayuda de sus amigos andinistas, quienes desde hace varios años exploran la alta cordillera de Santiago, en particular todas las cumbres de más de 6.000 m de la frontera chileno-argentina. Las fotografías que obtiene demuestran los errores de los mapas existentes. Opera según el método Laussedat-Vallot, las fotografías panorámicas tomadas con la Leica sirviendo de «levantamiento con plancheta»: 10 a 20 elevaciones se miden con un eclímetro improvisado. «Es un método primitivo, pero es el único que se puede aplicar luego de un rápido ascenso a más de 5.000 m

sin mulas». Completa la toponimia de los mapas, incluyendo todas las cumbres interesantes para los andinistas, con la altitud estimada, y trazando correctamente el límite de los glaciares, entre los cuales están los glaciares rocosos, como lo demuestra este informe de la reunión de la Sociedad Hidrotécnica de Francia del 17 de noviembre de 1953, que menciona las observaciones aportadas en agosto por Louis Lliboutry:

«Situados en una parte de la cordillera de los Andes todavía poco explorada, los glaciares que se encuentran cerca de Santiago son interesantes por ser de un tipo muy particular: muchas veces nacen por debajo del límite de las nieves eternas (la nieve se transforma parcialmente en hielo en el transcurso del verano), se encuentran cubiertos por penitentes, arrastran muchos escombros en sus capas inferiores, y están en claro proceso de regresión, generando la formación de numerosos “glaciares de rocas”.

Por otra parte, en Patagonia existe una verdadera calota glaciar de 20.000 km² (el Hielo Continental), que ha sido recorrida cinco o seis veces, pero nunca estudiada científicamente.

Finalmente, en la frontera boliviana se encuentran glaciares absolutamente desconocidos (con nieve de verano debido a la influencia oceánica).

Toda la irrigación de los cultivos de la región de Santiago, toda el agua potable de la cual se abastece esta ciudad de más de un millón de habitantes, toda la energía hidroeléctrica dependen de estos glaciares desconocidos por los geógrafos. [...] Al interés diplomático (reivindicación de la Tierra de Graham, fijación de las fronteras) se agregan el interés científico general (glaciología, geología, meteorología, física del globo) y el interés del turismo y de la aviación por conocer la alta cordillera».

►
Cordillera central de Chile. El cerro Mesón Alto, al oeste. Cobertura trimetrogon realizada en 1945. Por primera vez se fotografía de norte a sur la extensa y compleja geografía de Chile.

91M5 4M-91-4028 333-R-42 Confidential



AF 501



Glaciares Cortaderal y Universidad. Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Andes de San Fernando.

Como ejemplo de sus logros, Lliboutry menciona la altitud del Aconcagua.

«Mientras que los mapas indicaban como altitud del Aconcagua 6.953, 7.000, 7.021 o 7.035 m, publiqué la medición siguiente luego de una discusión acerca de estas cifras: 6.957 m \pm 4 m. Y una triangulación muy precisa argentina acaba de establecer una altitud de 6.959 m».

Los militares del Instituto Geográfico Militar (IGM), incrédulos y luego asombrados ante la envergadura de las correcciones, postergaron su publicación al respecto. Para que su trabajo fuera publicado sin alteración, Lliboutry debía mandar a imprimir su mapa en Europa. En 1954 tomará contacto con el IGM francés.

«Un precio demasiado elevado y la preocupación por difundir este mapa en Chile y en Argentina me llevaron a mandarlo a imprimir en una empresa privada chilena. Y tuve que poner manos a la obra: pocos días antes de mi partida definitiva de Chile, todavía pasaba mañanas enteras dibujando las sombras, puesto que no había encontrado a nadie, ni siquiera entre los dibujantes del IGM chileno, que pudiera satisfacer mis requerimientos. Este mapa, en el cual he trabajado por más de cuatro años, a escala 1:150.000, en cuatro colores, cubre en dos hojas los Andes que están frente a Santiago, con 220 km en latitud y 76 km en longitud».

En una carta con fecha del 20 de febrero de 1953, el profesor Néel, con quien Lliboutry permanece en contacto, lo felicita y lo alienta:

«Estoy contento de recibir estas buenas noticias y veo que sigue haciendo un excelente trabajo, tanto en el ámbito de la docencia como de la investigación científica: el Sr. Gignoux me había hablado de su trabajo sobre los penitentes de nieve. [...] Creo que una de las principales ventajas de su cargo y actividad es el hecho de verse enfrentado a los problemas más variados, y tener la total responsabilidad de encontrar la solución: debe ser sin duda apasionante y lleno de enseñanzas. Le deseo lo mejor para la futura construcción de su pabellón de física».

Entre dos párrafos relativos a su propio trabajo (la transformación de los locales del Instituto Fourier donde su laboratorio está instalado, los progresos de su equipo, los proyectos internacionales), señala Néel: «No crea que el departamento de Educación Superior lo ha olvidado. Se habló muy bien de usted en las dos últimas reuniones del comité consultivo».

Esta observación pretende seguramente ser alentadora. ¿Pero puede realmente tranquilizar a Lliboutry

sobre su futuro? Su situación de expatriado en Chile es cada vez más delicada.

«Las condiciones materiales de los profesionales franceses desplazados han empeorado y no justifican estar alejado de la familia, [...] de los amigos y de la vida cultural francesa. Recientemente se ha reducido nuestro coeficiente de indemnización por expatriación y creo que no se ha otorgado el reajuste del salario base que hubo en Francia, mientras que el costo de la vida aquí ha aumentado en un 50% desde la llegada de Ibáñez al poder. El peso chileno vale apenas 2,30 francos, y a nosotros lo facturan a 3,30. Sin embargo los pesos no pueden ser cambiados a francos a la misma tasa: ¡es un verdadero tráfico de divisas de parte del Estado, a nuestras expensas!»

No hay que olvidar que aquí nosotros no nos beneficiamos de la Seguridad Social que nos cobran (podríamos afiliarnos al sistema chileno, pero éste retiene el 15% del sueldo para una jubilación que nunca cobraremos fuera de Chile), y los médicos designados son los menos competentes. Además aquí los medios de transporte colectivo son tan deplorables [...] que es imprescindible comprar un auto. Pero un viejo auto de ocasión (tengo un modelo del 39) es extremadamente caro, y fuera de Santiago las carreteras chilenas son pésimas y deterioran los autos muy rápidamente. Sin ese auto no hubiera podido llevar a cabo ni la cuarta parte del trabajo que he realizado».

Más adelante, en la carta que dirige a Jean Touchar, agrega, a modo de consuelo:

«Como seguramente lo sabes, *La loca de Chaillot* ha obtenido un éxito rotundo aquí. Actualmente se estrenan *El Águila de dos cabezas*, *El don de Adela*, y en el cine *La Marie du Port*. *La Petite Hutte* fue prohibida por la censura.

[...] Realicé mi primera conferencia abierta en el Instituto Chileno-Francés sobre un tema ligado a la montaña: proyecté más de 100 diapositivas sobre el esquí de primavera en los Alpes. Después de autocongratularme, me permito insistir y pedirle que apoye si es posible la solicitud que presenté la semana pasada para ser profesor titular: ¡si los chilenos supieran que yo soy sólo profesor ayudante! ¡Sin hablar del tema de los gastos de representación!»

Para quienes tienen medios económicos, la vida es agradable, pero existe cierta incertidumbre en cuanto al futuro [...]. Tenemos temor que la derecha, asustada por los progresos de los comunistas, lleve al poder al fascista Ibáñez, lo que provocaría disturbios. ¿Pero en qué país del mundo no existe preocupación por el futuro?».

1953-1956



Cerro Alto de los Arrieros (4.990 m), glaciar Universidad y volcán Palomo (4.860 m).



**Una conquista en el silencio
de las cumbres:** El Centro de
Investigaciones de Glaciología,
el glaciar Universidad, Nieves y
glaciares de Chile

Claude Lliboutry: pianista en la cordillera

El trabajo que tiene en perspectiva y las observaciones que está realizando en los alrededores de la minera Disputada de Las Condes llevan a Louis Lliboutry a solicitar la renovación de su contrato de expatriación de tres años en Chile.

Por otro lado, sigue preocupado por su futuro, como lo cuenta al director de Educación Superior en Francia en febrero de 1953:

«Cuando salí de París, estaba inscrito en la lista de los candidatos que debían obtener el título de profesor titular universitario; ahora creo que hasta han olvidado incluirme entre los profesores asistentes de segundo rango, lo que me correspondería por antigüedad. [...]

Me enteré de que los profesores universitarios franceses enviados al extranjero quedarían adscritos a una universidad francesa. Si es así, me gustaría que eligieran en mi caso la Universidad de Grenoble, donde hice mi tesis, con la cual mantengo contacto, donde hace falta un glaciólogo, y donde podría seguir mis investigaciones a mi regreso».

Una carta del decano Moret con fecha del 20 de junio de 1953 muestra el entusiasmo con el cual el joven Lliboutry progresa en su trabajo de investigación.

«Veo que se lanzó en la exploración cartográfica y la glaciología, y que está realizando numerosas notas [...] sobre la formación de los penitentes de nieve y de hielo. [...] Es muy interesante para el futuro que se especialice en estos temas y me pregunto si no podría también abocarse a cuestiones de geofísica, lo que nos permitiría, a su regreso a Francia (en tres o cuatro años), solicitar que le otorguen una cátedra de geofísica; es más fácil de obtener que una cátedra de glaciología. Habría muchas cosas que estudiar al respecto en nuestra región alpina, y me acuerdo haber escuchado decir a Donzelot que estaba en sus planes desarrollar la enseñanza de la geofísica en las universidades francesas. Néel también está de acuerdo y piensa que sería posible pedir a la Facultad, en su momento, la creación de una cátedra de geofísica en Grenoble».

En esa misma época, Pierre Mendès France, a punto de ser elegido presidente del Consejo, hace un balance abrumador del estado de la investigación científica en Francia. Critica los laboratorios mal equipados, la falta

de cátedras científicas en las universidades: «La República necesita sabios: sus descubrimientos, su proyección y sus aplicaciones contribuyen a la grandeza de un país. Sin embargo, el presupuesto asignado a la investigación es irrisorio...».

En septiembre de 1953, Louis escribe a Claude, la joven pianista a quien conoció en Grenoble antes de su partida, para pedir su mano. Se conocieron en 1949 en el baile de la Universidad de Grenoble. Claude es la menor de las tres hijas de Edgar Micanel y Marie-Louise Auclert. El padre de *Pomme* (el sobrenombre de Claude) era un científico y un jurista eminente. Secretario del Colegio de Abogados, presidente del *Groupement dauphinois de la Houille Blanche*, miembro del consejo de administración de la Asociación de Amigos de la Universidad de Grenoble, Edgar Micanel ocupó numerosas funciones en el mundo político, cultural y social de la región. «Abordó todos los sectores donde se ejerce la inteligencia humana, un hombre excepcional que dedicó su vida al servicio de los demás», dijo Lliboutry.

Marie-Louise Auclert nació en la Argelia francesa, donde su padre ejercía la profesión de médico militar. Era deportista, melómana y culta, y la escritura era para ella una verdadera pasión, como también el esquí y la montaña. Su hermano, Pierre Auclert, alumno de Paul Dukas, llegó a ser un famoso compositor y pianista. Obtuvo el Gran Premio de Roma, y fue también inspector de la enseñanza musical en el Ministerio de Asuntos Culturales de André Malraux. Bach, Mozart, Beethoven, Liszt, Schumann, Chopin... pero sobre todo la escuela francesa, Dukas, Saint-Saëns, Franck, Chausson, Fauré, Debussy, Ravel, formaban naturalmente parte de la cultura musical de Claude, quien, luego de estudiar con Alfred Cortot en la Escuela Normal de Música de París, se convirtió en profesora de piano.

La relación sentimental es tan breve como fulminante. Claude acepta que Louis viaje a Chile a condición de una promesa de amor, en un camino de confianza y esperanza. El científico catalán es seducido no sólo por el encanto de la joven originaria de Grenoble, sino también por su sensibilidad e inteligencia. Se embarca hacia el hemisferio sur con el corazón conquistado.



Claude y Louis Lliboutry viajan en avión hacia Santiago (1954). Es el primer viaje de Claude a Chile.



Los recién casados se instalan en una casona con jardín y patio situada en Providencia.

Después de tres años distantes, pero manteniendo una larga e intensa relación epistolar, finalmente ella es feliz de verlo de nuevo en Marsella y luego en Perpiñán, y también está muy determinada a terminar y aprobar sus estudios de música:

«¿Crees que tu madre sabe dónde yo podría encontrar un piano para poder trabajar? Estoy un poco preocupada ya que mis compañeros de clase trabajan todos los días, y varias horas. Me gustaría incluso instalarme en París a finales de abril para el regreso a clases [...].

Ya no me gusta la soledad y tengo la sensación constante de que me falta algo. Espero con impaciencia que llegue el sábado para poder desarreglar de nuevo el pelo de mi amado y pedirle que me abrace fuerte».

Luego de haber estado hospitalizado durante varios meses a causa de una hepatitis A, Louis toma finalmente un avión a Francia en enero de 1954 y, en el mismo mes, escribe a Jean Coulomb para informarle sobre el avance de su trabajo en Chile.

«[...] Esto fue posible porque obtuve brillantes resultados en el ámbito de la glaciología (modestia aparte). Formulé una teoría más razonable y completa sobre el origen de los penitentes de nieve, y ahora estoy explotando sus numerosos alcances».

«Por otra parte, con la colaboración de los mejores montañistas chilenos, elaboré un mapa de los Andes centrales de Chile, mucho mejor que los del Instituto Geográfico Militar[...]».

Creo ser actualmente el que mejor conoce los Andes de Santiago y de la Patagonia. Facilito mapas a los montañistas y ellos me entregan fotografías y llenan mis cuestionarios.

El hecho de que no exista ningún glaciólogo en Chile y ningún geólogo que haya puesto un pie sobre un glaciar o incluso sobre la nieve desde Reichert (1920) facilitó las cosas. Además, cuento con el preciado apoyo de un colega chileno, formado en Italia, quien estudia los rayos cósmicos.

Encontré para él un lugar para la construcción de un refugio-observatorio a 4.300 m (será el más alto de Chile y Argentina); realicé los levantamientos y mapas, y elaboré los planes respectivos».

Claude y Louis se comprometieron a finales de febrero y se casaron el 5 de abril de 1954. Luego de una corta luna de miel, los recién casados viajan a Cambridge donde Louis debe dar una conferencia sobre los penitentes ante la *British Glaciological Society*.

El 10 de julio se embarcan en el *Provence* hacia Buenos Aires, donde permanecen dos días. Allí Louis



Jean y Rithé Borde, con la Sra. Lliboutry, en el valle del río Yeso. 1954.

Lliboutry vuelve a ver a Louis Depasse, de paso en la capital argentina:

«[...] Louis Depasse tenía un sentido del humor muy británico. Había dirigido una cadena de montaje de autos Simca en Brasil, y lo único que nos contó al respecto es que un día, un capataz —refiriéndose a un auto que salía de la cadena— había dicho: “éste nos salió bastante bienzz”».

Pretende crear una empresa de turismo en Patagonia, para pescadores de salmones y cazadores norteamericanos, con camionetas, botes neumáticos y carpas de camping. Los Marmillos los invitan a cenar a su casa, en el barrio de los Olivos: «Había una fuerte tormenta, pero en su casona confortable, pudimos conversar tranquilamente hasta la una de la madrugada». Hablaron seguramente de la trágica desaparición de Paco Ibáñez en el Dhaulagiri, y del heroico ascenso al Aconcagua, por la cara sur, de René Ferlet, Guy Poulet y Robert Paragot en febrero de 1954. Frédy había intentado ascender al «Techo de América» con el equipo de Lionel Terray, pero un dolor de muelas le había impedido llegar a la cumbre. En cuanto a su mujer, Dorly, ella había sido la

primera mujer alpinista en descender el Coloso y llegar viva en 1948.

Claude y Louis viajan hacia Santiago en avión. Es el primer viaje de Claude a América del Sur. El tiempo es maravilloso para cruzar la cordillera. Pasan por la aduana sin problema y una docena de personas los acogen en el aeropuerto: «Inmediatamente les llueven las invitaciones con la llegada de la bella francesa que viene a instalarse en Chile: donde los Borde, los Loiseau, los Joel, los Creach, los Parelón, etc». Los recién casados deberían instalarse en una casona con jardín y patio, situada en la avenida Luis Thayer Ojeda, pero «[...] por el momento, mientras esperan que lleguen los muebles, se alojan en el hotel».

Claude, embarazada, dará luz a su hijo Emmanuel el 17 de abril de 1955. En una carta dirigida a sus padres el 22 de abril de 1955, Louis expresa lo feliz que se siente al ser padre:

«Claude me pidió que enviara esta misiva, ya que prefiere descansar y contemplar a Emmanuel, que es un bebé muy bonito. Tiene apenas 5 días, y ya mira a toda la gente que entra y sacude la cabeza. Claude guardará seguramente un buen recuerdo de su estadía en la Clínica

Alemana, la mejor de Santiago, con una habitación que daba a un parque, y una atención impecable. Regresó a la casa en ambulancia, con el bebé y una enfermera que permanecerá aquí día y noche durante 10 o 15 días, y luego sólo durante el día. Llegaron regalos de todos lados.

Instalamos una cama abajo para la enfermera; ella come en el «trastero», yo en el comedor, Claude en su habitación y la empleada en la cocina. Toda la casa está ocupada. El “guagüito” (lo que significa “recién nacido” en Chile) duerme abajo con la enfermera en el coche, y toma pecho cada cuatro horas. La señora Creach nos prestó el coche, la cuna y las sábanas. Todos los de la misión universitaria están locos por este niño y desfilan en la casa para verlo. Lo que me entretiene también, ya que Claude quiere que yo esté a su lado todo el tiempo y “controla” mis salidas si voy de compras. Afortunadamente no tengo cursos este año y tengo todo el tiempo libre para redactar un libro.

En la mañana inscribí a “guagüito” en el Consulado: Emmanuel Jacques Edgar. Gesticulaba mucho con los brazos, como un abogado. Se parece mucho al tío Pierre, como todos los bebés, según lo que dice Claude. Los visitantes dicen que se parece a mí para agradarme. [...] Pediremos a Jean Borde que sea el padrino y a Rithé Borde que sea la madrina por procuración. [...] Claude está más bella que nunca, aunque un poco más pálida. Ahora vamos a tener que pensar en su ropa, pero tendremos que ahorrar si queremos ir a Bolivia: con un dólar que está actualmente a 425 pesos y sigue subiendo, nos va a salir muy caro. Afortunadamente los chilenos son disciplinados y conformistas: en Francia, esta inflación provocaría una revolución y mucha locura. El Presidente pretende arreglar la situación modificando la Constitución. Primera medida: él será nombrado por ocho años y no seis (sic).

A partir de noviembre, Claude acompaña a su marido a la minera La Disputada cada vez que sube con el jeep de la universidad, mientras que el pequeño Emmanuel queda al cuidado de una joven niñera. Por otra parte, Louis decide visitar las altas cuencas de los ríos Cachapoal y Tinguiririca. En diciembre, empieza por el valle del río Pangal con la intención de ascender al nevado Flores (4.907 m).

«Habríamos subido a la cumbre si yo no me hubiese percatado de una extraña formación, trescientos metros más abajo. Una meseta horizontal de hielo muy grande, con estratos horizontales de burbujas.



Claude Lliboutry, originaria de Grenoble, Francia, es pianista y música. «Encontrar un piano en Santiago fue toda una aventura».

Pueden pensar que esto no tenía mayor interés, pero se equivocan: todas estas burbujas tenían “colas” verticales, como unos minúsculos renacuajos. En ciertos estratos, todas las colas estaban dirigidas hacia arriba y, en otros, hacia abajo. También había estratos de burbujas con dos cabezas, como unas pesas minúsculas. Perdí mucho tiempo examinando estos fenómenos y haciendo croquis. El cielo se cubrió de nubes, con amenaza de tormenta, y tuvimos que darnos la vuelta. Me interesaba más examinar mis «burbujas con cola» que lograr ascender a la cumbre. Sólo entendí más tarde el origen de estas formas (a 4.600 m, las facultades intelectuales disminuyen...). Estas burbujas con cola aparecen cuando el agua se congela, y se ven también en las barras o cubos de hielo artificial. El aire disuelto en el agua no puede colocarse en la red cristalina del hielo y forma burbujas entre los cristales, cuyo diámetro aumenta a medida que va creciendo el hielo. Lo que significa que allí existió un lago temporal y la presencia de heladas repetidas, pero contrariamente a lo que sucede habitualmente, en este caso, el frío venía tanto de la atmósfera como del glaciar que estaba abajo.

El hallazgo de un mar de hielo en los Andes: el glaciar Universidad

En el sur de Santiago, Lliboutry descubrió en los mapas de la US Army Air Force varios glaciares muy grandes y casi desconocidos, en los Andes, cerca de San Fernando.

Esta nueva expedición, financiada por la Universidad de Chile, consiste en reconocer la fuente del río Cachapoal que sale de un inmenso glaciar de 12 kilómetros de largo totalmente recubierto de piedras, donde quizás podría descubrir penitentes. Las expectativas son grandes, ya que este glaciar sin nombre es un mar de hielo en medio de la cordillera de los Andes.

Decide seguir el río Tinguiririca y luego subir el volcán del mismo nombre, para visitar el gran glaciar.

«El cuarto día, dejando mulas y arrieros, atravesamos una garganta y recorrimos una arista, siempre en dirección al norte, y subimos de paso varias pequeñas cimas, todas vírgenes. Desde la última cumbre, teníamos una vista maravillosa, al norte, hacia el glaciar y el nacimiento del río San José. [...]. Para llegar hasta el gran glaciar, había que bajar hasta el río San José y seguir río arriba. Después de una última subida muy empinada y difícil —las mulas no habían podido seguir—, llegamos a una inmensa meseta a cerca de 2.300 m de altitud, donde se extendía la lengua del glaciar, precedida por un cúmulo de hielo muerto, cubierto por morrenas. Una comparación con las fotografías aéreas de 1947 mostraba que, en aquella época, el glaciar había registrado un avance brusco (surge). Sin embargo, contrariamente al glaciar Juncal Sur, debía ser un glaciar temperado. En la lengua encontramos medieros y molinos. Más arriba, no aparece ningún penitente sobre los neves. Era claramente un glaciar de tipo alpino desde el punto de vista climático.

El glaciar está compuesto por dos ramas. La rama oeste desciende desde una cadena montañosa secundaria en sentido norte sur, y la cumbre más alta (4.986 m) había sido ascendida una sola vez, en 1950, por la ladera opuesta, por los Marmillod y otro matrimonio suizo. La habían bautizado Alto de los Arrieros, en homenaje a ellos, cuya participación era primordial. La rama norte del glaciar proviene de un cono de 4.850 m, que yo había reconocido en las fotografías aéreas como un

volcán apagado, El Palomo. Las dos únicas ascensiones a esta cumbre (por N. Baeza y Shucan en 1926, y luego por W. Bachman, L. Covarrubias y E. Echavarría en diciembre de 1949) habían sido realizadas por la ladera opuesta a la que habíamos escogido para subir. Nuestro gran glaciar era realmente virgen. Lo bautizamos glaciar Universidad.

La lengua del glaciar es atravesada en el centro por una morrena que emerge del hielo. Inclínada a 40°, ésta presenta una ladera ascendente extrañamente plana y está compuesta no por fragmentos angulosos como las morrenas, sino por piedras redondas y arena. Era un *esker*, un tipo de depósitos fluviales, muchas veces estratificados, que se forman cuando un torrente pasa sobre un glaciar. Seguramente el río San José había pasado sobre el glaciar antes de abrirse camino abajo. Encontramos en el alto valle del río Yeso algunas de estas altas pirámides inclinadas, compuestas por piedrecitas redondas».

Louis deduce que estos *eskers* se formaron sobre el último glaciar cuaternario que había ocupado el lugar.

El 9 de abril de 1956, algunas semanas antes del regreso a Francia de Louis Lliboutry, el rector de la Universidad de Chile, Juan Gómez Millas, pedirá oficialmente al IGM bautizar al glaciar más grande de los Andes centrales como glaciar Universidad.

En diciembre de 1954, Louis Lliboutry se convierte en miembro de la sección de Hidrología de la *American Geophysical Union*. Recibe durante la misma semana una carta del profesor Néel, quien le anunciaba que, a su regreso a Francia, el director de Educación Superior, el filósofo Gaston Berger, podría estar a favor de la creación de una cátedra de Glaciología en Grenoble.

«Mientras tanto, creo que debe seguir aprovechando las oportunidades que presenta un país nuevo, y acumular documentos y conocimientos valiosos para su futuro, que le permitirán ser el especialista francés indiscutible de la glaciología: sólo debe terminar lo que empezó tan bien» (Carta del 7 de diciembre de 1954).



El glaciar Universidad (Andes de San Fernando) tiene dos brazos, uno que proviene del volcán Palomo y el otro del Alto de la Arrieros. El glaciar estaba ubicado en las haciendas Chacayes y Sierra Nevada. «Encontramos una barrera que cerraba la entrada de una hacienda. Su dueño la custodiaba con un fusil y un gran revólver en el cinturón. Prohibía la entrada a su estancia. Le expliqué que yo era profesor de la Universidad de Chile y que había visto en fotografías aéreas la existencia en su estancia (se extendía hasta la frontera) de los glaciares más grandes de la región. Estuvo muy asombrado, ignoraba poseer glaciares en sus tierras, y nos permitió la visita».

Lliboutry envía también algunos comentarios al secretario general de la Federación Argentina de Ski y Andinismo, José Federico Finó, sobre su obra *Pequeño glosario andino*, publicada en 1947. «Luego de ponernos de acuerdo, sería interesante publicar y divulgar estos términos en los países hispanohablantes». Hasta junio de 1955 intercambiarán observaciones y sugerencias que Louis piensa utilizar para la redacción de su libro.

«Pensando en este trabajo, me gustaría conocer lo antes posible las conclusiones respecto del vocabulario. [...]

En mi carta del 1 de febrero le decía que estaba totalmente de acuerdo en cuanto a las tres acepciones de la palabra “escarcha” (blanca, negra, de sobrefusión).

Lo mismo para “glaciarismo”, “glaciología” “nieve escamosa”, “micropenitentes”.

En cuanto al resto, consulté a varios colegas: Aquí no estamos de acuerdo con el empleo de “loza”; preferimos “laja”. Ej.: Cerro de las Lajas, Filo de las Lajas (región de Bariloche). Loza se emplea únicamente para referirse a la cerámica.

Las palabras “nevero” y “neviza” pueden ser aceptadas como equivalentes de “név”. [...]

Luego de haber hablado con Barrera, estoy de acuerdo para abandonar “ventisquero” (y también “helero” en beneficio de “glaciar”. [...]

También abandonamos “laja-loza”.

En cuanto a “rodado”, Barrera me indicó un segundo sentido: cono de avalancha, resultado de un alud.

Para la palabra francesa “grésil”, la palabra utilizada es “escarchilla”, y no “neviza”.

Finalmente, en vez de “glaciar de piedras”, propongo “glaciar de escombros”. [...]

Para “grésil”, yo también había propuesto “escarchilla” en el glosario. Creo que se utiliza en el lenguaje corriente. En el campo y en la ciudad, se dice “está escarchillando”.

A partir de entonces, Louis Lliboutry es considerado como un experto, consultado por los más grandes exploradores, por su conocimiento de los glaciares de América del Sur y sus competencias en cartografía, como lo muestra una carta de Harold William Tilman de noviembre de 1953. En esa época, éste preparaba con el geólogo chileno Jorge Quinteros la primera travesía del Hielo Continental, el campo de hielo situado en el sur de la Patagonia: «Hubiera tenido que hacer una lista de preguntas. Le agradecería si pudiera responderme cuando pueda». Sigue una serie de preguntas de geografía, topografía y meteorología, de las cuales depende el éxito de su expedición. Con su compañero realizarán finalmente la travesía entre el 18 de diciembre de 1955 y el 28 de enero de 1956.



Óscar González Ferrán y Louis Lliboutry en el macizo del Palomo donde nacen los cuatro mayores glaciares de la zona, de 10 a 12 km de largo.

Al Señor Director del
Instituto Geográfico Militar
Frustrile

Juan Gomez Millas, Rector de la Universidad de Chile, tiene el honor de saludar al Sr. Director, y le ruega despte el bautizo de un glaciar innominado de los Andes de San Fernando, descrito en la nota adjunta, con el nombre de Glaciar Universidad.

Agradeciéndole de antemano, lo saluda atentamente.

Santiago, 9 de Abril de 1956

DESCRIPCION DEL "GLACIAR UNIVERSIDAD"
(Andes de San Fernando)

Este glaciar (o ventisquero) de nacimiento al Rio Elgueta de zona Rio San Andrés en las napas del I.C.O., pero que tanto los lugareños como Mino Fuchs en sus libros llaman Rio San José. Sus coordenadas aproximadas son 34°37' a 34°43' lat.S. y 70° 21' long.O.

Mina San Andrés, el uno que baja del Cerro El Palero, otro, el otro, de mayor altura, que baja del Cerro El Portillo o Alto de las Arrias 4500. (El nombre Alto de las Arrias, impuesto por el primer y único asociacionista, Sr. Sarrillón, debe atribuirse al antiguo Cerro El Portillo, según resulta de fotos tomadas por el Sr. Sarrillón y en el punto. La cota de 5000 es una cota aproximada dada por este Mino indiano, y que no merece ser tomada en cuenta, pues la cota 4500 fue determinada con exactitud por Mino Fuchs.)

El "Glaciar Universidad" fue sin duda recorrido por primera vez por E. Sauer y Schumm en 1944, luego por E. Schumm, I. Cerverrias y E. Schervaris en Diciembre 1949. Lo recorri por 1a. o 2a. vez en Febrero 1956 con dos estudiantes de la Universidad de Chile, Oscar Gonzalez y Erik Aloha, y lo estudio detenidamente. Los resultados de este estudio aparecen en el libro "Nieves y Glaciares de Chile", y serán publicados mas detalladamente en el "Journal of Glaciology".

El frente de este glaciar, que alcanza aproximadamente 1200 m de altura, ha retrocedido de mas de 1 km desde 1945, fecha en que se levantó la Carta Preliminar.

Luis Lliboutry
Profesor de Geofísica en
la Universidad de Chile

Carta del rector de la Universidad de Chile al IGM para bautizar un glaciar innominado con el nombre de glaciar Universidad. 9 de abril de 1956. La carta fue enviada poco antes del regreso de Lliboutry a Europa.

Primera expedición científica al glaciar Universidad

Por Erik Klohn / Geólogo.

Mi primer encuentro con el Prof. Lliboutry fue en 1953, con ocasión de una conferencia que dio en el Salón de Honor de la Universidad de Chile sobre la primera ascensión, en febrero de 1952, al monte Fitz Roy, 3.405 m, en la Patagonia, por una expedición francesa que él integró.

Relató con maestría y sin superlativos, acompañado por impresionantes vistas, los detalles de esta expedición a uno de los objetivos a escalar más difíciles del mundo. Ahí supe que Lliboutry era físico, doctorado en la Universidad de Grenoble, y que trabajaba como docente e investigador en glaciología en la Facultad de Filosofía y Educación de la U. de Chile. Esta facultad se convirtió por un tiempo en un verdadero campus universitario donde a los estudiantes de pedagogía se les brindaba la oportunidad de atender a clases de eminentes investigadores de las diversas disciplinas de las ciencias.

Fue una sorpresa cuando en 2017 recibí un llamado de Marc Turrel, periodista e historiador francés, para entrevistarme específicamente sobre mis recuerdos

como estudiante sobre una expedición con el profesor Louis Lliboutry en 1956. Todo un desafío para mi memoria, a 61 años de lo acontecido.

Estábamos formados en la plaza frente a La Moneda todos los integrantes de la primera expedición militar-civil al nevado Ojos del Salado —la montaña más alta de la cordillera de los Andes después del monte Aconcagua— cuando se me acercó el profesor Louis Lliboutry, a quien conocía de la Universidad de Chile.

Me invitó para que lo acompañara a un reconocimiento del mayor glaciar de la parte central de la cordillera frente a San Fernando. Nos acababa de recibir el Presidente de la República, General Carlos Ibáñez, por la exitosa primera ascensión chilena al Ojos del Salado, con amplia difusión en los medios. Yo participé invitado como «geólogo» aun cuando recién había completado el tercer año de estudios universitarios. Con satisfacción pude justificar —por primera vez— que el nevado Ojos del Salado es un volcán y que, con 6.934 m sobre el nivel del mar, es el volcán más alto del mundo.



Erik Klohn y Óscar González Ferrán, dos estudiantes de Geología, acompañan a Louis Lliboutry. Foto de la primera ascensión de la Punta Rosita (4.050 m), cordillera de San Andrés.

Me llamó la atención la sorpresiva invitación de Lliboutry. Me impresionó la perseverancia para lograr sus objetivos. Planificó una expedición para febrero. Sería la última de 10 expediciones a la cordillera, pues debía volver a Grenoble. Febrero es el mes tradicional en que los santiaguinos salen de vacaciones y Santiago queda desierto. Pero Lliboutry necesitaba enganchar un tercer participante con experiencia en montaña.

Decidió esperar el regreso de la expedición al Ojos del Salado, donde, por la prensa, sabía que participaba yo.

«—Tengo todo preparado, me dijo, y contratado el arriero que nos acercará al objetivo. Saldremos mañana por seis días.

—Por favor, señor Lliboutry, completamos recién esta expedición de 20 días, necesito lavar mi ropa y llevar mis bototos al zapatero. Si me da dos días, lo acompaño.

—Viajamos entonces pasado mañana». Fue su lacónica respuesta.

Rumbo a un glaciar sin nombre

Para mí era una oportunidad única para compartir en terreno con un integrante de la expedición francesa que conquistó el monte Fitz Roy, además de ver su aproximación para el estudio científico de un glaciar.

Luego de cuatro horas de viaje en vehículo nos encontramos con el arriero que, con sus caballos y mulares, nos transportó desde la confluencia del río Tinguiririca con el río Azufre hasta los Baños del Azufre, donde establecimos el primer campamento. Teníamos a la vista el volcán Tinguiririca, nuestro objetivo del día siguiente. Mientras Lliboutry revisaba los mapas y fotos aéreas yo encendí un fuego, puse una olla con agua del río y agregué un paquete de tallarines, acorde con el hambre que sentía. El Prof. Lliboutry se espantó:

«—Los tallarines se agregan de a poco al agua hirviendo con algo de aceite y sal».

La lección me sirvió para toda la vida.

Bien repuestos, a la mañana siguiente subimos al volcán Tinguiririca, con vistas soberbias a los cordones montañosos hacia el noroeste y los mayores campos de hielo y glaciares de la cordillera central de Chile.

Desde la cumbre el profesor Lliboutry hacía levantamientos que le permitían corregir la cartografía disponible. La altura del Tinguiririca es de 4.130 m y la del volcán Palomo, hacia el norte, es de 4.930 m. Me dijo que en cada una de sus expediciones a la cordillera para estudiar los glaciares revisaba la cartografía, toponimia

y alturas, y si encontraba diferencias con los mapas disponibles, lo comunicaba como colaboración al Instituto Geográfico Militar, que incluye las correcciones en las nuevas ediciones de sus cartas topográficas.

Al noreste destacaba un cerro desde el cual podría verse una buena panorámica del río San José y acceso a la lengua terminal del mayor glaciar de la zona, lo cual fue argumento suficiente para realizar su ascensión, que se veía fácil. Hicimos cumbre el 26 de febrero de 1956, en primera ascensión a este cerro innominado de 4.050 m.

«—Que Erik proponga un nombre», sugirió Lliboutry.

Dije «Punta Rosita. En homenaje a mi novia». Lliboutry me miró algo dubitativo y sentenció:

«—¡Bien, siempre y cuando al llegar abajo no cambies de opinión!

—¡No, de ninguna manera!». Contesté.

Por tradición debemos dejar un testimonio escrito guardado en un recipiente a prueba de humedad y protegido por una pequeña pirca. Redacté un emotivo testimonio en forma de carta dirigida a mi novia. Siete años después, Jozsef Ambrus, también estudiante de geología, en segunda ascensión, rescató la misiva y, previo a cerciorarse del nombre de mi esposa, se lo hizo llegar.

Trasladamos ahora el campamento desde los Baños del Azufre a las nacientes del río San José, cerca de la lengua terminal del gran glaciar sin nombre en los mapas oficiales. Los paisajes de fondo de todos los valles cordilleranos que he conocido a esa fecha, que no son pocos, en los cuales desemboca un glaciar, son parecidos. Se transita por morrenas terminales dispuestas en forma desordenada por el retroceso del glaciar. Es la vivencia de lo que aprendimos en el primer libro de geología básica. Todos los glaciares están en retroceso por menor acumulación de nieve. Cada año generan menos agua y el caudal de los ríos disminuye. En tanto, el consumo de agua aumenta inexorablemente, una ecuación sin solución. Hoy este fenómeno se explica por el calentamiento global, y va en aumento.

El reconocimiento de la lengua terminal del glaciar tuvo un interés especial para Lliboutry. Vimos, entre otros, bloques de hielo estratificado, alineados en forma perpendicular al glaciar, de unos 5 m de alto, con capas inclinadas en dirección contraria al avance del glaciar. Este fenómeno, de emergencia de capas de hielo desde el fondo del glaciar con rocas de tamaño variable, no visto antes por Lliboutry, sería sometido a análisis para buscar una explicación.

Durante la conversación en el campamento, a la luz del fuego y las estrellas, Lliboutry nos comunicó que ésta era su décima y última expedición a la cordillera, ya que en unos meses más completaba su quinto año en Chile y volvería a Grenoble. Nos contó que fue traído a la Facultad de Filosofía y Educación de la Universidad de Chile por su decano don Juan Gómez Millas, en 1951, para desarrollar su propuesta en extremo novedosa en el país para estudiar glaciares y transmitir sus conocimientos al estudiantado. Dijo Lliboutry que supo siempre del interés personal y apoyo irrestricto del decano y, más aun, cuando éste fue elegido rector de la Universidad en 1953 (*). Dijo que estaba con el tiempo muy ajustado para terminar y dejar impresa su obra *Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología*. Será un libro de más de 400 páginas ilustrado con fotos, mapas y tablas, más dos mapas en colores fuera de texto. Es la primera vez que se publicará un libro con los fundamentos científicos de la investigación glaciológica. En los mapas incluye notables mejoras topográficas y toponímicas propuestas por él y aceptadas por el Instituto Geográfico Militar de Chile.

El glaciar investigado en esta oportunidad no tenía nombre, por lo cual Lliboutry propuso llamarlo glaciar Universidad, en homenaje y agradecimiento a la Universidad de Chile y su rector, Juan Gómez Millas, que lo acogió durante estos casi 5 años.

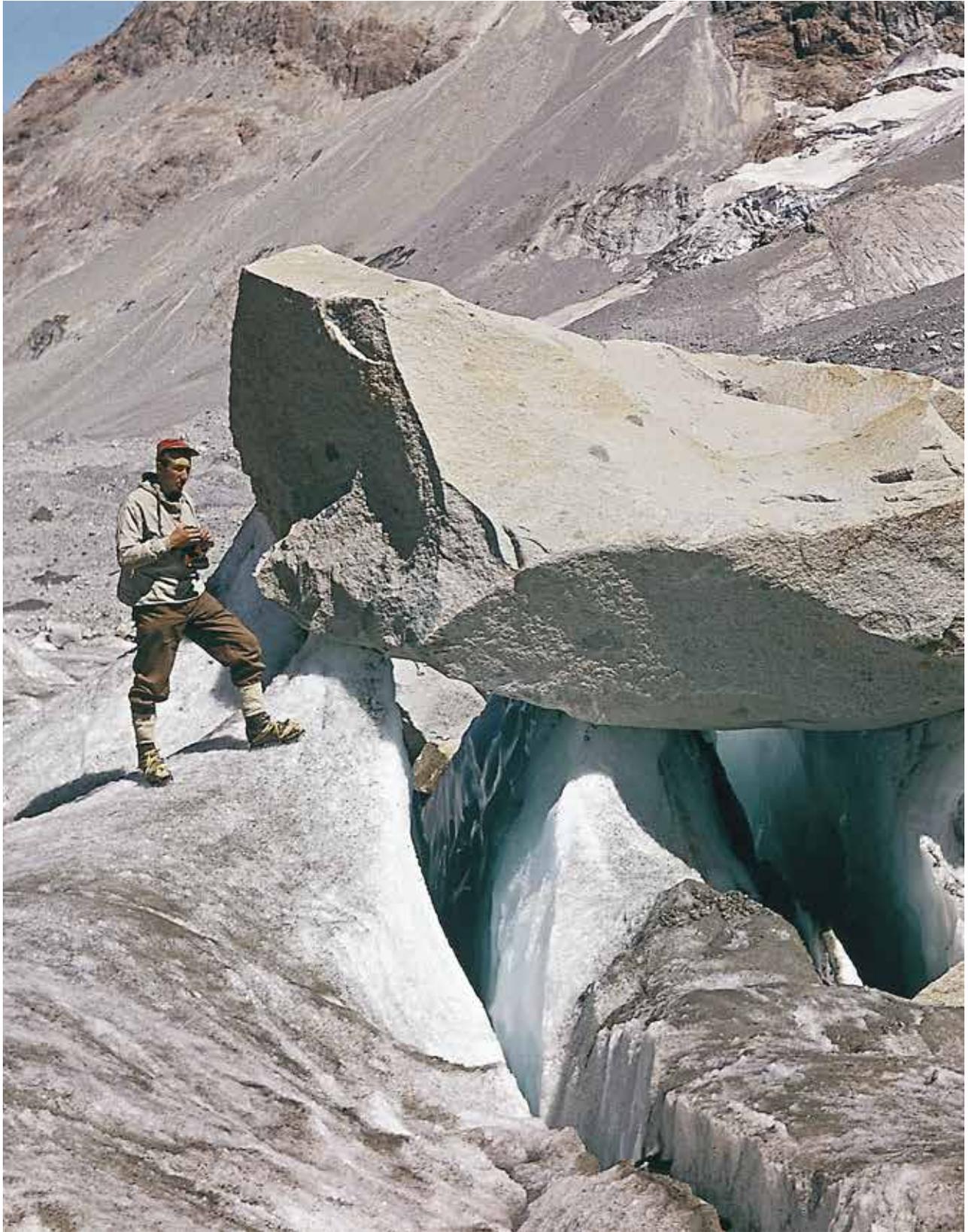
Le dio todo el apoyo y plena libertad académica para sus investigaciones y desarrollo de los fundamentos científicos de la glaciología.

Guardo un recuerdo imperecedero del Prof. Louis Lliboutry como persona de fácil contacto con quienes vibren con sus intereses, con una clara determinación en la consecución de sus objetivos y que daba la impresión de que el tiempo de que disponía se le hacía corto para alcanzar sus metas.

(*) El Prof. Juan Gómez Millas fue reelegido rector en 1958. Durante su decanato primero y su rectorado de 10 años fortaleció el estudio de las ciencias que aplicó exitosamente en toda la Universidad.



«Se ven grietas de desgarramiento llenas de tierra y de piedras redondeadas. Deben ser antiguas grietas transversales, cerradas e inclinadas hacia delante por el movimiento del glaciar».



Erik Klohn tenía 21 años cuando, de regreso de una expedición al volcán Ojos del Salado, participa en la exploración de Lliboutry en toda la orografía glaciar del macizo El Palomo.

Nieves y glaciares de Chile: El libro fundador de la glaciología física



En su casa de la calle Luis Thayer Ojeda 1671, Louis Lliboutry escribió su famoso tratado de glaciología *Nieves y glaciares de Chile*. Esta casa aún existe, una de las pocas que se salvaron de la transformación urbana de Santiago.

En su último año en la Universidad de Chile, el rector Juan Gómez Millas ofrece una licencia sabática a Louis Lliboutry, siempre y cuando escriba un libro de glaciología en español, que será publicado por la universidad. El título es *Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología*. Esta obra monumental de 400 páginas es el primer tratado moderno de glaciología jamás publicado.

La obra aporta aclaraciones inéditas sobre la glaciología en general, sobre los grandes glaciares de los Andes y sobre la exploración y la cartografía de la alta cordillera y de la Patagonia. Expone los resultados de sus propias investigaciones glaciológicas y geomorfológicas en un solo libro: origen de los penitentes, glaciares con

penitentes y sin nieves que constituyen un nuevo tipo de glaciar, rehielo y recristalización, morfología glaciar, origen de los suelos estriados y glaciares rocosos, franjas oscuras anuales y movimiento sobre los glaciares, etc.

Numerosas fotografías terrestres y aéreas, muchos mapas monocromos y su famoso mapa policromo de los Andes de Santiago a escala 1:1.500.000 en dos hojas completan la edición. La obra tiene un gran éxito, sobre todo a causa de los mapas, y se agota rápidamente.

Pero Lliboutry dejó pasar un error en su libro, el cual será descubierto más tarde.

«Yo había escrito que la zona deshelada situada en la parte alta del glaciar Viedma, que yo había visto desde la Silla del Fitz Roy, debía ser un cráter volcánico sin cono, un maar. Se sabía que existía un volcán activo al oeste del Fitz Roy. El sacerdote De Agostini había recopilado testimonios de estancieros, en particular sobre caídas de cenizas en la extremidad oeste del lago Viedma.

En las fotografías de la US Air Force, aparte del hipotético cráter, que había sido sobrevolado en vertical, se veía sobre los grandes glaciares Viedma y más al norte, Chico y O'Higgins, en la parte baja del nevé, tres aureolas oscuras y anchas que sólo podían ser las cenizas de antiguas erupciones explosivas. Considerando el hecho de que los vientos soplan siempre desde el oeste y la dirección del flujo de hielo, yo había correctamente afirmado que estas aureolas de cenizas no venían del "volcán Viedma", sino de un volcán situado en la cadena montañosa Pío XI (que prolonga hacia el norte el cordón Mariano Moreno), que una espesa cobertura glaciar impedía reconocer. En realidad, Federico Reichert había visto este volcán, en erupción, desde el glaciar O'Higgins en 1933. Pero no lo había mencionado en sus memorias, y yo no las había leído tampoco».

Este problema del volcán misterioso cautivará al explorador y alpinista inglés Eric Shipton. Lliboutry relata esta aventura:

«En diciembre de 1958 intentó sin éxito atravesar el Hielo Patagónico Sur. [...] A él también le proporcioné mapas e informaciones. Luego, en enero, Shipton fue a

reconocer mi “volcán Viedma”. [...] Encontró piedra pómez sobre la morrena mediana del glaciar; sin embargo, ni la morrena ni el supuesto volcán del cual emergía eran de naturaleza volcánica [...].

Shipton regresó a la Patagonia en el verano siguiente (1959-1960) con cinco otros ingleses en busca del misterioso volcán, [...] pero uno de ellos, Jack Ewer, docente enviado a la Universidad de Chile como yo, había descubierto una fotografía de la AAF que se nos había escapado. [...] Se veía un cráter activo en la cumbre más alta del cordón Pío XI (3.380 m), una cima bautizada cerro Lautaro, nombre que viene de un héroe araucano.

La expedición subió siguiendo la ladera sur del glaciar O’Higgins; luego, tres de ellos recorrieron esquiando 25 km hasta el pie del volcán Lautaro, donde permanecieron diez días bloqueados a causa del mal tiempo, y tuvieron que devolverse, ya que sus víveres se habían agotado, sin haber podido intentar ascender a la cumbre.

A su regreso a Europa, Shipton vino a verme en Grenoble y me contó sus hallazgos. Me propuso acompañarlo para atravesar la parte más larga del Hielo Patagónico Sur. Yo estaba demasiado ocupado para acompañarlo. [...] Entonces tomó como compañeros de expedición a Jack Ewer y a dos chilenos [...]: Eduardo García Soto y Cedomir Marangunic. [...] Aquí resumo su expedición: [...]

La marina chilena les dejó al lado del glaciar Jorge Montt, el emisario norte del campo de hielo. Les tomó dieciocho días para llegar con los trineos a la meseta nevada, aunque sólo debían atravesar 15 km en línea directa y 1.300 m de desnivel. Luego les tomó once días para recorrer 65 km arrastrando los trineos, con tormentas de nieve o lluvia. [...] Aunque debían orientarse con la brújula, llegaron el 8 de enero exactamente al punto fijado: su antiguo campamento al pie del Lautaro.

Después de esperar siete días, siempre con mal tiempo, debieron renunciar al ascenso una vez más».

El primer instituto de glaciología de América del Sur

En abril de 1955, Louis Lliboutry recibe del profesor Kastler la siguiente carta:

«Entre los proyectos franceses inscritos en el marco del Año Geofísico Internacional (A.G.I.) 1957-58 figura un programa de estudios sistemáticos de la variación estacional de la intensidad de las rayas y franjas

monocromáticas del cielo nocturno y del cielo crepuscular en los dos hemisferios, en el cual va a participar la misión polar antártica francesa. Sería interesante que, en el marco de este plan y con la ayuda del espectrógrafo con el que usted cuenta ahora, la estación de Santiago pudiera participar en la red de estudios, en particular sobre el tema de la variación estacional correspondiente a la raya D crepuscular. ¿Usted ha realizado pruebas en este sentido? ¿Cree que sería posible realizar un estudio sistemático en 1957-1958 preparándolo previamente a partir de 1956?».

Lliboutry le responde en los siguientes términos:

«Gracias por su amable carta. Reconozco que, al abrirla, pensaba encontrarme con algunos reproches, merecidos por lo demás. Mi instalación en Santiago, los estudios que realicé en terreno durante este verano y la redacción de un curso de glaciología (Física de la nieve y del hielo) que tengo que crear a partir de cero no me dejaron mucho tiempo para estudiar el cielo crepuscular.

[...] Afortunadamente me liberé de impartir clases para el año 1955, mi último año en Chile: pretendo regresar definitivamente a Francia en abril de 1956. Y Joel está muy entusiasmado con la idea de colaborar con los investigadores de allá. Entonces iniciaremos juntos este trabajo a partir de ahora, y en 1957-1958, Joel se encargará de ello, sea personalmente, o supervisando a otra persona (él tiene asistentes y ayudantes de laboratorio serios, que yo no tengo)».

Sin darse cuenta, Louis Lliboutry acaba de internarse para siempre en la vía de la investigación en glaciología, una ciencia todavía incipiente en aquella época.

En 1955 toma la iniciativa de crear en la Facultad de Filosofía y Educación de la Universidad de Chile el Centro de Investigación en Glaciología, el primer instituto de glaciología de América del Sur, pocos meses después de haber explorado y cartografiado un glaciar sin nombre, que luego será llamado glaciar Universidad. ¡Simbólico para este universitario consciente de participar en el nacimiento de una nueva ciencia en estas lejanas tierras australes, cuatro años antes de la creación del laboratorio de Grenoble!

Este joven profesor asistente de treinta y dos años está claramente muy adelantado para la época.

La física experimental va viento en popa. John Glen y John Nye, físicos de Cambridge, expertos en física del estado físico, crean la ley de deformación del hielo en 1952-1953. Como lo indica Lliboutry:

«En 1952 no se conocía todavía la ley de comportamiento mecánico del hielo, ni la relación exacta entre las tensiones desviadoras en un punto, ni las tasas de deformación alrededor de este punto. Por ello, John Nye, retomando la idea de Orowan, propuso tratar el problema del desagüe comparando el hielo con un plástico perfecto. [...] Un sólido cristalizado que no se rompe, como la mayoría de los metales, que no se deforma hasta que la escisión alcance cierto valor, el límite de plasticidad. [...] Antes de 1952, Orowan ya había considerado el caso particular de una calota polar que descansaba sobre un zócalo horizontal, con una fricción en la base igual a una constante k . [...] Las primeras mediciones de altitud y de espesor de una calota polar a lo largo de un perfil que va desde la costa hacia el interior fueron realizadas por las expediciones polares francesas en el inlandsis (hielo interior/casquete glaciar/ campo de hielo de dimensiones continentales y que persiste durante siglos) de Groenlandia, en 1949-1951. (Comparando el hielo con un plástico perfecto) Nye había predicho que, en el norte de Groenlandia, el inlandsis, mucho más ancho, debía alcanzar 5.000 m de espesor en el centro.

Sin embargo, sólo encontraron 2.000 m de hielo. Si insistimos en adoptar el esquema del plástico perfecto, debemos considerar esta región central como un glaciar reservorio que no se deforma, porque el límite de plasticidad no ha sido alcanzado, y por consiguiente se vuelve lentamente más espeso a lo largo del tiempo».

Lliboutry concluye sus notas sobre los inicios de la glaciología moderna con la siguiente observación:

«Siempre consideramos que una ciencia progresa porque se acumulan nuevos datos [...] y porque se plantean teorías cada vez más completas. Olvidamos que progresa en primer lugar porque los investigadores tienen una formación cada vez más adaptada a los problemas que enfrentan. Y luego, en una segunda etapa, gracias al desarrollo tecnológico, y a instrumentos de medición o aparatos cada vez más adecuados y con alto nivel de rendimiento. La glaciología en los años 50 y 60 se encontraba en su primera etapa».

En un informe enviado al Ministerio de Asuntos Exteriores de Francia, agregado a su solicitud de reintegración en su país, habla de esta «nueva ciencia» y de su experiencia de pionero:

«Significaba realizar algo que anhelaba desde mucho tiempo pero que era imposible hacer en Francia, donde la glaciología no existía en la enseñanza universitaria.

En esta nueva ciencia ya no tenía que enfrentar obstáculos creados por personas que ocupaban ciertos cargos. [...] Yo era el único universitario con experiencia en alta montaña: más que diplomas en ciencia, fueron más bien los conocimientos que yo había adquirido en las prácticas realizadas en el *Collège d'Alpinisme et de Ski des Praz*, casi escondidas de la Universidad de Grenoble, que me ayudaron en ese momento de difícil recuperación [...].

Los resultados obtenidos superaron todas mis expectativas. Hice por primera vez el inventario de los glaciares de la región central de Chile (tan extensos como los de Suiza) y estudié sus características, que los asemejan a los glaciares prácticamente desconocidos del Turkestán. Encontré una explicación a varios fenómenos que intrigaban desde mucho tiempo a los glaciólogos y geólogos: penitentes de nieve y de hielo, glaciares rocosos, suelos poligonales y estriados, pendientes de acarreo estratificado, vigas sobre los glaciares.

Gracias a las fotografías aéreas mencionadas, a una estadía de dos meses en la región del Fitz Roy y a otra de dos semanas en la región de la cordillera del Paine, pude hacer un trabajo de desbroce análogo, aunque menos original, en Patagonia (24.000 km² de glaciares)».

Lliboutry precisa que optó por «declinar invitaciones reiteradas para ir a la Antártica, donde toda investigación hubiera tenido fines políticos».

En una nueva carta al profesor Néel, el 17 de marzo de 1955, presenta su teoría de recristalización por compresión (y no por cizalla), que explica según él las franjas azules de los glaciares, análogas a la esquistosidad de las rocas sedimentarias.

«[...] Esto explica todo, pero cambia por completo lo que estaba admitido anteriormente. Es lo que pretendo publicar antes de regresar a Francia, junto a un mapa policromo sobre los Andes que se encuentran cerca de Santiago. Será mi regalo de despedida a los chilenos, y me temo que este regalo me va a tomar mucho tiempo».

Antes de dejar Santiago, Lliboutry cede los derechos de autor de sus publicaciones a la Universidad de Chile. Sin embargo, en Francia no se mide todavía el alcance y la importancia de sus investigaciones.

Y los científicos que reconocen su valor y sus capacidades no saben muy bien cómo van a acoger a este joven sabio-explorador atípico.

En una carta con fecha del 20 de abril de 1955, el profesor Néel deja entrever la situación complicada en la cual lo pone Lliboutry:

ROYAL GEOGRAPHICAL SOCIETY
KINGDOM CHURCH, LONDON, E.W.1
21, BEDFORD SQUARE, LONDON, W.1
Tel. 4775

Dear Mr. Lliboutry:

Please forgive a stronger writing to you, not in English.

I am contemplating a visit to the Patagonian Andes on or south of the San Rafael Glacier with a view to climbing and exploration, accompanied probably by a geologist, and am anxious to know what has already been done. One of the editors of the Journal of Glaciology gave me your name and thought you might be able to give some information.

I am not a glaciologist but I have done a good deal of mountain travel and exploration in the Himalaya. What I particularly want to know is to what extent the snow-line has been crossed. I believe a German called Schickel crossed from the east to the west of the San Rafael glacier. Also whether San Valentin or any of the peaks south of it have been climbed; whether there is any glaciation on the Pacific side that you know of for a time; whether the weather from November to March is too wet and misty for using a photometer; and whether in the winter the visibility is better.

Here we know very little of what has been done in these interesting regions, and I myself cannot read Spanish so that a study of the relative Journals published in Chile is no help.

I apologise for bothering you with these personal matters and assure you I shall be most grateful for information of any kind relative to these parts or for the name of anyone who might be able to supply it.

Yours sincerely,
Harold Tilman
(H.T. Tilman)

EXPÉDITIONS POLAIRES FRANÇAISES
Missions Paul-Émile VICTOR
22, Avenue de la Grande-Armée
Tel. : FRO 44 21
Avenue 749 - 75000 Paris

Transmis
AT. 47 DU MARÉCHAL LEBELLE
PARIS-XVI
Tel. 740 17 31 (ligne postale)

PAR AVION
Prof. Albert BAUER
9, Rue d'Alsace
STRASBOURG - 67000
No. 016 71002

Strasbourg, le 11 janvier 1956

Mr Prof. L. LLIBOUTRY
Centre de Investigations de Glaciologie
I. Thayer Ojeda 1671
SANTIAGO - Chile

Cher Ami,

Je réponds à votre lettre du 27 novembre 1955 à P.-E. VICTOR, actuellement en Terre Adélie.

Je vous ai déjà fait savoir que nous avons pris bonne note de votre candidature comme glaciologue pour une future expédition.

Vous voudrez bien me préciser si vous désirez éventuellement participer à la Campagne 1957-58 ou la suivante en Terre Adélie, où c'est l'expédition Glaciologique Internationale projetée au Groenland qui vous intéresse.

De toute façon il serait utile que vous me fassiez parvenir en triple exemplaire un curriculum vitae détaillé. De plus, pour l'I.G.I.G., veuillez aussi répondre au questionnaire Annexe 4 des documents que vous avez dû recevoir.

Je vous prie bien cordialement à vous

Pour P.-E. VICTOR et p.p.

Bauer

Cartas de los exploradores Harold Tilman y Paul-Émile Victor, dirigidas a Louis Lliboutry, que se refieren a las exploraciones glaciológicas en el Campo de hielo y en Groenlandia.

«En cuanto a la presentación de las notas a la Academia, hablé con el Sr. Moret. Le señalé que a lo mejor no era conveniente que un físico presente notas que tengan que ver más con la física del globo que con la geología, no porque yo tenga dudas acerca del valor de su trabajo, muy al contrario. Pero conscientemente, no me parece oportuno dar la impresión de interferir en el campo de actividad de mis colegas. [...] Por mi parte, es primordial que yo esté al tanto de todas sus publicaciones. [...] Pienso hablar de su trabajo con conocimiento de causa y con argumentos precisos y positivos.

Por lo demás, la coyuntura actual es favorable para la creación de nuevos puestos, en particular en los programas de posgrado; por lo que su nombramiento en Grenoble, a su regreso, como nuestro glaciólogo nacional, no debería presentar dificultades. Por el momento, debe aprovechar la oportunidad de tener a su disposición un material virgen.

La construcción del Instituto Fourier está bien encaminada. [...] Será realmente útil y nos permitirá dar

trabajo a nuevos investigadores. Recibimos del CNRS un aporte significativo que servirá para financiar la fabricación de dos generadores de neutrones».

En noviembre de 1955 Louis Lliboutry envía un correo al profesor Néel, en el cual se percibe la impaciencia del joven investigador por compartir su trabajo con sus pares, pero al mismo tiempo cierta molestia.

«Aquí está llegando el buen tiempo, y me da rabia no haber terminado aún el tratado de glaciología en español, seguido por un estudio de los glaciares chilenos. A pesar de ser tan conciso como en las notas destinadas a la Academia, ya tengo 300 páginas dactilografiadas, 48 figuras, cerca de 100 fotografías, 5 grandes mapas entre los cuales 2 policromos, varios mapas pequeños, perfiles... [...] Y sin secretaria, ni dibujante digno de este nombre (yo dibujé casi todo).

Después del Año Geofísico, en el cual pretendo participar sin salir de los Alpes, y algunas investigaciones en laboratorio y en los glaciares (con asistentes capacitados y herramientas que aquí me faltan), espero reescribirlo

en francés, una vez revisado, corregido y completado. No existe ningún tratado de este tipo en ningún idioma; mientras hay varios, modernos y excelentes, en geología glaciaria, paleoclimatología y otras disciplinas menos asentadas científicamente.

En seis meses estaremos de regreso en Francia. Regreso definitivo, ya que el Ministerio de Asuntos Exteriores quiere enviar al extranjero sólo maestros de escuela y asistentes “de nivel modesto”.

[...] Espero tener a mi regreso el grado de Profesor Titular de Universidad que ustedes, con el decano Moret, me prometieron, y que por lo demás todos mis compañeros de promoción que han ingresado en la Educación Superior tienen desde mucho tiempo.

[...] Les agradecería que pensaran seriamente en mi regreso inminente, que me dijeran si la facultad acepta recibirme en Grenoble, si pueden ofrecerme facilidades laborales, si la dirección de Educación Superior está de acuerdo. Además, es inútil decir que, en Francia, la glaciología y muchos otros estudios de geofísica sólo son posibles en Grenoble».

En una misiva al decano Moret, Lliboutry agrega:

«Modestia aparte, sería lógico que yo tuviera la oportunidad de enseñar a los futuros glaciólogos franceses para el Año Geofísico Internacional, puesto que no hay

nadie capacitado en Francia para hacerlo (Cailleux tiene vastos conocimientos, pero que no están bien asimilados aparte de la morfología glaciaria, y Bauer, promovido como vicepresidente de la Comisión de Glaciares, es el único representante de Francia)».

El 24 de agosto de 1955 responde al profesor Marcel Cau, del laboratorio de física experimental de la Facultad de Ciencias de Burdeos, quien le propone una cátedra de física electrónica («La facultad busca a un colega residente, y no a una estrella fugaz»).

«Le agradezco por haberme propuesto una cátedra, pero desafortunadamente no la puedo aceptar actualmente, a pesar de todo el interés que representa. [...] En realidad, después de haber terminado mi tesis, me especialicé y publiqué muchos artículos en glaciología.

A la víspera del Año Geofísico Internacional, no puedo abandonar esta especialidad. Me prometieron una cátedra de geofísica en Grenoble, y tengo la inocencia de creer aún en ello [...]».

La partida a Francia se acerca. Louis escribe a sus padres en octubre y noviembre de 1955:

«No se enojen conmigo si mis cartas se hacen más escasas. Debo hacer serios esfuerzos para terminar este libro antes que llegue el buen tiempo. Es terriblemente largo. Voy en la página 210, y faltan cerca de cien, más



Claude Lliboutry en el glaciar Grey. «Lo más maravilloso que he visto en mis ya numerosos viajes».

de 40 figuras, 3 mapas y tengo que supervisar al dibujante. Y luego vendrá el trabajo con la editorial. Desgraciadamente, Claude tiene una familia numerosa y no es muy proclive a la literatura para poder reemplazarme.

La situación económica es cada día peor en Chile. Los precios suben todos los días y el valor del dólar en el mercado libre es exorbitante. [...]

Tuvimos una semana bastante movida, con muchas huelgas y protestas, y miles de detenidos. El Presidente, debido a su incapacidad (el cobre se vende más caro que nunca y Chile está perdiendo todas sus oportunidades), pidió poderes extraordinarios y le fueron otorgados por tres meses.

La huelga general fue cancelada. Hicieron venir una misión de expertos en economía norteamericanos, quienes cobraron 400.000 dólares —una suma enorme— por sus servicios, todo esto para repetir lo que habían expuesto magistralmente varios chilenos, en particular el presidente de la cámara de diputados y el decano de la Facultad de Derecho, un jurista de fama internacional.

El otro día, de nuevo un ladrón trató de entrar a la casa, por la ventana que da al techo de la pieza de la empleada. La empleada golpeó la puerta con un inmenso palo que guardaba en la habitación, logrando que el ladrón huyera. El ruido me despertó y disparé al aire. El vecino, quien pensó que el ladrón había tratado de echar la puerta abajo, que yo lo había visto y que le había disparado, llegó en bata con una enorme pistola y me propuso salir a buscarlo.

Pero preferí esperar tranquilamente a los carabineros, que me dijeron: «¿Por qué disparó al aire? Hay que disparar directamente al ladrón». Por supuesto no lo haré nunca. Son pequeños ladrones ocasionales, que andan sólo con un cuchillo y un bastón, y más bien miedosos».

El 7 de octubre de 1955, escribe:

«Soy un papá feliz, un marido feliz, y un autor feliz (la universidad no me molesta para nada, sobre todo desde que Alvia partió a Italia). En la casa, la vida fluye lenta y tranquilamente. Claude logra persuadirme de vez en cuando de que vayamos al cine. Vimos una buena película americana: *Carmen Jones* (que estaba prohibida en Francia porque no se habían pagado los derechos de autor a Bizet), muy bien actuada; una película francesa mala, *La Fête à Henriette*, y otra película americana excelente: *Lilly*.

Las películas americanas son en color y en formato panorámico, lo que es mucho más agradable. *Carmen*

Jones tenía incluso un sonido estéreo, pero afortunadamente usado con mesura. (La historia de Carmen es interpretada por negros americanos y el torero ha sido reemplazado por un boxeador)».

Antes de su regreso definitivo a Francia, Claude y Louis Lliboutry viajan del 2 al 21 de enero de 1956 a Punta Arenas y a la región de Torres del Paine en Patagonia y Tierra del Fuego. Louis propuso realizar conferencias a cambio de medios de transporte, en particular un barco a motor para visitar los fiordos. Redobló los esfuerzos para terminar de escribir su libro antes de viajar. Y durante ese período de trabajo intenso, recibió la noticia de su nombramiento como Profesor Universitario Titular en la Universidad de Grenoble (¡con efecto retroactivo a partir del 1 de octubre de 1954!).

El viaje es tan reconstituyente como interesante. En Punta Arenas se encuentran con una expedición italiana, con el padre De Agostini, el viejo y entusiasta explorador de los Andes Patagónicos, glaciólogo de la Universidad de Padua, y Lliboutry aprovecha la ocasión para dar una conferencia de glaciología. Luego parten a acampar en el macizo Paine, «[...] extraordinario pero demasiado difícil para poder pensar en ascenderlo, con torres verticales que se alzan a 2.000 y 3.000 m sobre el nivel de la pampa y de los lagos cercanos». Acampan, hacen largas caminatas que tienen como destino, entre otros, el glaciar Grey. Luego de una semana al pie del macizo, bordean el río Paine hacia el sur. «En el río Serrano, en unas horas, pesqué [...] trece salmones, entre los cuales cuatro que pesaban 1,5 kg [...]. Una semana más nos hubiera permitido ir a ver otros glaciares y lugares magníficos, pero Claude no quería dejar a “guaguüito” por tanto tiempo».

Al regreso, pasan por el lado oriente del macizo, enclavado en la pampa. «Presenciamos una esquila en la Estancia Castillo, la cual dura más de un mes, con 5.000 o 6.000 ovejas al día». Luego tomaron el avión de vuelta para Santiago, donde los esperaba el pequeño Emmanuel; le acababa de salir el segundo diente.

Hasta el último momento, Louis deberá hacer correcciones en su manuscrito y redactar varios artículos. Ahora que va a partir, comprende que mucha gente a su alrededor quisiera que se quedara en Santiago. «Durante la última salida, con dos estudiantes de geología, por fin conocí a unas personas que eran andinistas y que a la vez mostraban un interés por la investigación. [...] Espero regresar en algún momento, por un tiempo, ya que queda mucho por hacer...».



Mapas de los Campos de Hielo Norte y Sur. Lliboutry, IGM, 1956, revisados en 1994.



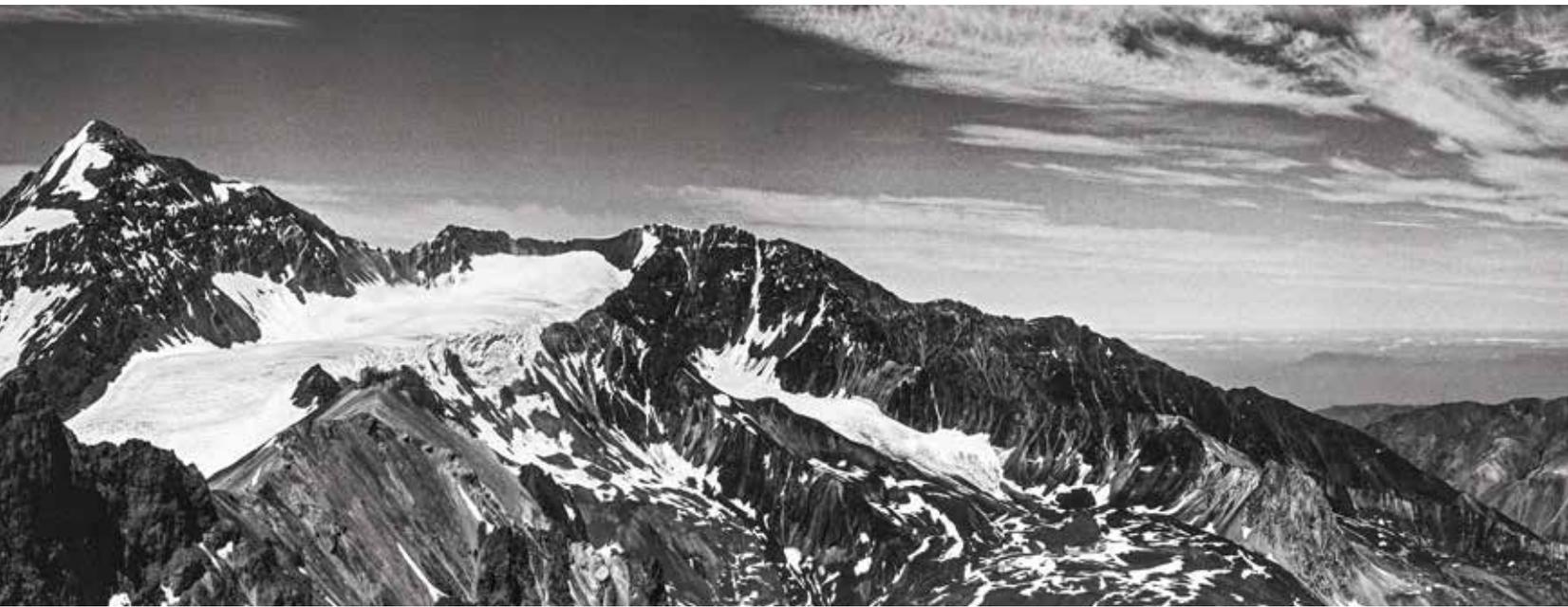
Prof. Louis Liboutry Dr. Sc.
 Laboratoire de Glaciologie du CNRS, Grenoble

**HIELO
 PATAGÓNICO
 SUR**
 (Parte Sur)

5 km 0 50 100 200

Según Carta Preliminar del I.G.N. de Chile, basada en una
 cobertura aérea Triométrica de enero-feb. 1947 (20257)
 Toponimia puesta al día en 1954





Arriba: Primera expedición de Louis Lliboutry: «Portillo del cerro Negro (4.600 m). 26-31 de enero de 1953. Región de mayor glaciación de la zona central. Ventisqueros más vecinos de Santiago. El 27 de enero partimos con mulas por el portezuelo de la Copa hasta el pie de la Canaleta oeste del Portillo del cerro Negro. La subida, con pesado equipo al hombro, sumamente penosa, duró más de 4 horas. Estudiamos algunos de los penitentes de nieve, de más de 2 m de altura, que cubrían toda la falda sur del cerro Iver. El 29 ascendimos los cerros Iver (4.750 m) y Barrentín (4.750 m), por terreno fácil.

En las cumbres tomamos fotografías panorámicas e hicimos levantamientos con eclímetros». Glaciar Olivares Alfa, cerros Fickenscher, Littoria y Altar. Glaciares Paloma Norte y Rinconada Oeste. Abajo, el mismo lugar, el 29 de enero de 2019.



Arriba, segunda expedición: Gran Salto del Olivares (3.000 m). 20-26 de marzo de 1953.

«El 21 pasamos el portezuelo del Cepo, con tiempo inseguro, subimos el valle del río Olivares y armamos carpa en el alojamiento de los Tabolangos (Estero Ferroso). Durante la noche tuvimos tormenta eléctrica y neviza. Nevó 5 a 20 cm desde 2.900 m. En los días siguientes el tiempo fue espléndido. El 22 llegamos al Gran Salto y recorrimos la parte del ventisquero Juncal Sur, al pie del Gran Salto, estudiando el grueso del grano del hielo y haciendo escuela de hielo con grampones».

Abajo, el Gran Salto del Olivares, noviembre de 2018. Estación meteorológica de la DGA (ver el artículo de Andrés Rivera, p250).



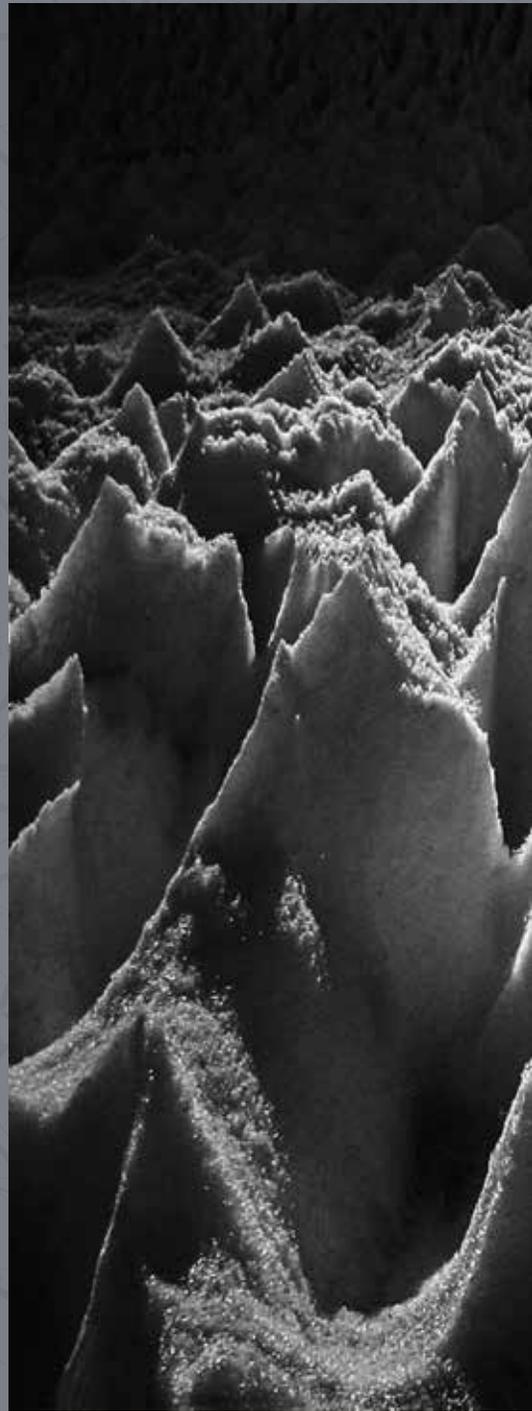
Arriba: «El 23 de marzo de 1953 subimos la parte baja del Salto del ventisquero Juncal Sur, ascensión con grampones y soga bastante difícil. Luego, al presentarse seracs peligrosos y grietas infranqueables, por rocas aborregadas cubiertas de tierra y una cornisa de tierra suelta, llegamos a la ruta normal, acampando arriba del Salto. El gran glaciar Juncal Sur (15 km de largo) tuvo una gran crecida en 1947. El 24 recorrimos la morena lateral este del ventisquero Juncal Sur hasta el pie del cerro Plomo (4.200 m), tomando fotos panorámicas y haciendo levantamientos con eclímetro en 3 puntos». Abajo, el mismo lugar en 2018.



Arriba, panorámica tomada por Louis Lliboutry el 29 de enero de 1953. En primer plano, el cerro Negro y el glaciar Olivares Beta.
A la derecha, los cerros Aconcagua, Alto de los Leones, Nevado Juncal.
Abajo, el mismo lugar, el 29 de enero de 2019.



1958-1990



Penitentes en la cordillera central.



Grenoble: Capital de la glaciología francesa de las montañas y de los polos

La misión de Lliboutry en Groenlandia

En mayo de 1956 se produce el regreso definitivo a Francia. Claude, Louis y su hijo Emmanuel embarcan en Valparaíso, con todo el mobiliario en catorce cajas de madera, en el «Reina del Pacífico», un paquebote inglés que los lleva hasta La Rochelle, con escala en Callao, Panama City, Kingston, La Habana y Santander. Poco antes de embarcar, Louis envía una última carta al profesor Néel:

«Ruego disculpe este largo silencio: dos expediciones en la cordillera de los Andes, la publicación de mi libro sobre la glaciología, la exploración de los Andes, y los preparativos del viaje de regreso no me han dejado ni

un minuto libre. Ni siquiera he podido agradecerle por su apoyo para que yo obtuviera una cátedra.

Le hablaré más adelante y con más tranquilidad de estas expediciones fructíferas en cuanto a los resultados obtenidos. El libro me costó un enorme trabajo, ya que además de la envergadura del tema, tuve que corregir las pruebas cuatro veces, mandar a hacer de nuevo todos los cuadros, dibujar yo mismo la mayoría de las figuras, puesto que mi dibujante se enfermó en ese momento crucial. [...] Los dos mapas a cuatro colores, que se imprimen aparte, estarán listos en un mes más. Una semana antes de partir, aún pasaba todas las

Durante el Año Geofísico Internacional, Lliboutry participa en una expedición de glaciología polar en Groenlandia. «Yo estaba a 14.000 km de los campos de hielo de la Patagonia, y a años luz desde el punto de vista tecnológico».



mañanas agregando a los dibujos sombras difuminadas con pastel.

Y ahora me encuentro embarcado con mi mujer, mi pequeño hijo, catorce cajas y ocho maletas en un barco inglés muy lujoso y que, para nuestro gusto, se parece demasiado a un buque de carga o a un souk ambulante. Bordeamos un desierto absoluto; el tiempo permanece obstinadamente nublado y fresco, lo que es sorprendente, ya que estamos cerca del Ecuador».

A su llegada, Louis Lliboutry escribe a Alphonse Creach:

«Nos instalamos en una pequeña vivienda campesina en Châtillon en Diois, esperando el inicio del año académico, con todo nuestro equipaje que había llegado en buen estado. Tuvimos una excelente impresión al llegar a Francia: 1° la gente está más relajada y más amable que hace dos años atrás, a pesar de la guerra de Argelia; 2° los precios se han mantenido más o menos estables; 3° la reconstrucción tomó fuerza, sobre todo en Grenoble, lo que es interesante para nosotros. ¡Claro que arrendar un departamento cuesta 5.000 francos por mes y por habitación! Acabamos de comprar un pequeño departamento en Grenoble. Así que estamos tan arruinados como antes de partir a Chile, y endeudados por mucho tiempo».

Por su parte, Jean Coulomb, director del CNRS, envió en abril una carta a Albert Bauer, secretario general de la subcomisión Expedición Glaciológica Internacional en Groenlandia (EGIG) y brazo derecho de Paul-Émile Victor, con la siguiente observación: «La creación del Centro de Investigaciones Glaciológicas de Grenoble, en el cual, por supuesto, debe participar el señor Lliboutry, me parece algo excelente».

A su regreso a Francia, Louis Lliboutry toma contacto en París con el organismo encargado de las Expediciones Polares Francesas (EPF), situado cerca de Bois de Boulogne. Desde Chile, ya había ofrecido sus servicios como glaciólogo a Paul-Émile Victor, a quien había conocido durante una de las EPF en el Campo de Hielo Continental en 1954. Le hizo llegar muestras de «chachacoma», una planta muy común en el norte de Chile y Bolivia, utilizada para aliviar el mal de altura («puna»)

y cuya eficacia había sido comprobada recientemente en una expedición al volcán Ojos del Salado.

«Me permito enviarle una copia de la carta que mandé a la SHF acerca de las investigaciones glaciológicas previstas en Groenlandia en 1957-1958. Sería una lástima que estas expediciones —excepcionales en cuanto a la organización, la geodesia, los fenómenos sísmicos, la gravimetría, la meteorología, etc.— siguieran teniendo resultados más bien pobres en materia de glaciología pura.

Como lo saben, ciertamente, la glaciología está relacionada con la física, y acaba de dar un paso gigantesco con las investigaciones de Nakaya, Nye, Rigsby, Robin, Steinemann, etc., quienes son todos físicos, y no naturalistas ni geólogos, ni tampoco ingenieros, como lo eran antes. Entonces, como creo que soy el único físico-glaciólogo francés, y retomando sus invitaciones anteriores, me permito presentar mi candidatura para las campañas de verano en Groenlandia de 1957 y 1958.

[...] Por otra parte, en cuanto regrese a Francia (junio de 1956) estaré a su disposición para colaborar en la elaboración del programa de investigaciones glaciológicas en Tierra Adélie».

Paul-Émile Victor y Albert Bauer deciden que Louis realizará la práctica de glaciología polar organizada por el Snow, Ice and Permafrost Research Establishment (SIPRE) para los futuros participantes del Año Geofísico Internacional, cuya misión es estudiar todos los problemas relacionados con la zona ártica, desde el efecto de los explosivos en el suelo helado hasta la construcción rápida de galerías-alojamientos en el név, la utilización de aviones equipados con esquís, o la detección de grietas bajo la nieve delante de un vehículo oruga. «En esa época, era en el SIPRE donde se realizaba el trabajo más serio en el mundo en el ámbito de la glaciología».

El 29 de julio de 1956, dos meses después de su regreso de Chile, Louis Lliboutry despega hacia la base americana de Thule en Groenlandia. «Yo estaba a 14.000 km de los Campos de Hielo de la Patagonia, y a años luz desde el punto de vista tecnológico».

Entre los participantes se encontraban Henri Bader, director científico del SIPRE; Roland Millecamps y Claude Lorius, que también realizaba una práctica y

quien había escrito a Lliboutry luego de haber recibido su libro: «Querido Louis: escribo para agradecerte por tu libro. La glaciología es una bella ciencia, pero yo preferiría broncearme al sol. La partida se acerca, crece el entusiasmo...».

De regreso a Francia, Louis debe hacer muchos esfuerzos para presentar un informe optimista a propósito de su práctica, ya que quedó desconcertado frente al derroche de equipamiento y material de última generación, y los pocos avances científicos que se obtuvieron. Además, se le reprocha que los proyectos que propone son poco «espectaculares». El 15 de octubre de 1956, escribe una larga carta a Jean Coulomb, en la cual aboga por la creación de una nueva carrera de geofísica en la Universidad de Grenoble:

«Usted conoce mejor que yo la triste situación de la glaciología en Francia, la cual se encuentra casi exclusivamente en manos de personas con formación literaria, y debe saber que es necesario darle las bases científicas sólidas que empieza a tener en otros países.

Regreso de una práctica de un mes en Groenlandia, realizada en el marco de un curso organizado por el Snow, Ice and Permafrost Research Establishment. ¡Este organismo norteamericano, compuesto por 80 investigadores en terreno, sin contar el personal no científico, está construyendo en Hanóver (NH) un nuevo laboratorio con 27 cámaras frigoríficas! (No obstante, no estudian los glaciares temperados y, a nivel teórico, se les escapan muchas cosas).

Mi director de tesis, el profesor Néel, y sobre todo el decano Moret, son muy favorables a mi instalación en la Facultad de Ciencias de Grenoble, para ocuparme de la nieve y el hielo, de los intercambios en las capas bajas de la atmósfera, más tarde de la imantación de las rocas y, en forma general, de geofísica. Lo que requiere la creación de una cátedra de geofísica en Grenoble. El problema es que mi expediente se extravió en el ministerio y las cosas están estancadas. Creo que usted ya está al tanto de estos proyectos que, lejos de interferir en sus actividades, buscan ampliar el campo de la investigación geofísica en Francia».

El 23 de septiembre de 1956, Albert Bauer realiza un balance muy contrastado de la glaciología en Francia. Envía una carta al decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Grenoble, el profesor Léon Moret (con copia, entre otros, a Paul-Émile Victor, Garavel y Péguy), en la cual señala la existencia en Grenoble del

Centro de Documentación e Investigaciones Nivelológicas y Glaciológicas (CEDONIGLA-Centre de documentation et de recherches nivologiques et glaciologiques).

«Algunos investigadores extranjeros (de Estados Unidos y Rusia) nos pidieron venir a trabajar en Francia, lo que desgraciadamente no es posible todavía. Las conversaciones aún no han llegado a materializar un proyecto concreto. Con mi breve informe, les quiero mostrar que la coyuntura es favorable y que la Universidad de Grenoble debe jugar un rol en esta materia. Nosotros creemos que si el señor Lliboutry fuera nombrado para trabajar en esta universidad, su colaboración con el CEDONIGLA podría ser decisiva».

Agrega en una nueva carta con fecha del 22 de octubre de 1956:

«Parece que el profesor Lliboutry ha sido definitivamente nombrado en la Universidad de Grenoble como profesor asistente en geofísica y glaciología. En septiembre del año pasado yo había señalado al señor Moret, decano, el interés que representaría la creación de un centro de investigaciones glaciológicas en Grenoble, pero no había recibido ninguna respuesta hasta el día de hoy».

El 17 de diciembre de 1956, Louis Lliboutry escribe al Dr. Bader, director científico de la expedición en Groenlandia. Avergonzado por su tardanza en agradecerle por «esta estadía en Groenlandia, tan cómoda e instructiva», le cuenta las dificultades que han atrasado su nombramiento en la universidad.

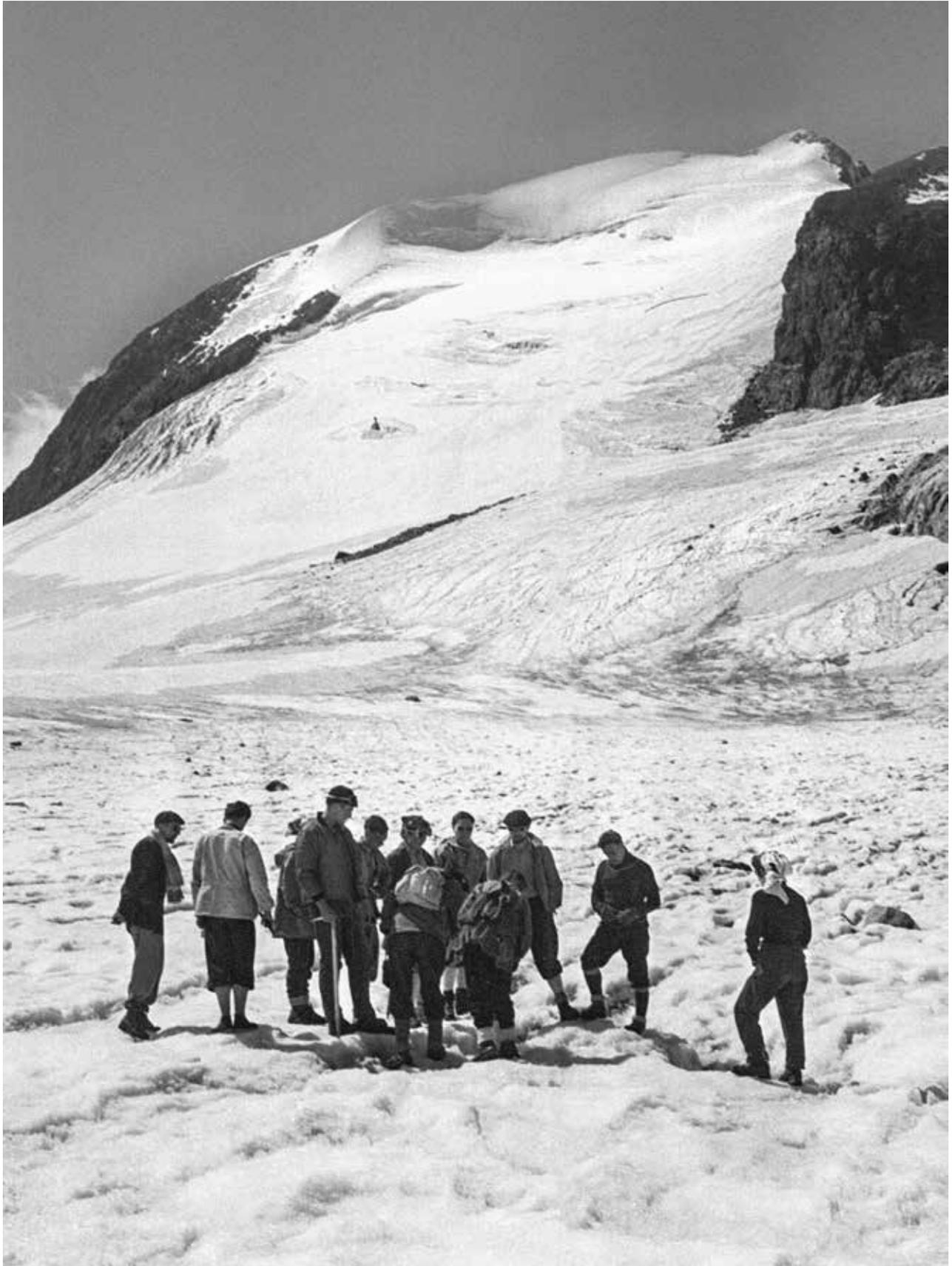
«Las universidades francesas no tienen ninguna autonomía, lo que explica que aunque la universidad de Grenoble quisiera contratarme, el nombramiento debe venir de París. A lo cual hay que agregar otras dificultades: un decano distraído, un subdirector de Educación Superior bastante incompetente, y muchas intrigas... Viajes y llamadas telefónicas a París, expedientes extraviados que deben ser reconstituidos, visitas y discusiones. [...].

Finalmente me instalo en Grenoble, por decisión especial del director de Educación Superior, como encargado de las clases de física, las cuales no me toman ni siquiera un día a la semana; el resto del tiempo lo dedico a la glaciología. Ahora empieza la lucha para obtener financiamiento y un lugar más amplio».

Ejercicios de rescate en una grieta a Blue Ice Valley Glaciar, Groenlandia. ▲

Tormenta de nieve en la base militar y científica norteamericana de Tuto (Thule Take Off). ►







Durante la primavera de 1966, Lliboutry estudia los glaciares alpinos. El Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile expresa la necesidad de contratar a un experto en glaciares, debido a su extensión considerable en la Patagonia.

◀
Estudiantes geógrafos se inician en la geomorfología glaciar. Glaciar de Saint Sorlin, 1957. El curso está dirigido por Péguy, Corbel, Lliboutry y Cailleux. «Un hombre que sabía compartir con sus estudiantes su entusiasmo por la investigación».

Evoca con entusiasmo las próximas actividades de su «centro de glaciología en fase de creación».

«La Universidad de Grenoble va a acoger al señor Garavel, ingeniero en Aguas y Bosques, quien fundó hace dos años un “Centro de documentación nivo-glaciológica” [...] Me encargaré de la docencia y de la investigación, y ya tengo varios estudiantes inscritos que van a preparar diplomas y tesis.

Tengo una excelente relación con Paul-Émile Victor y Bauer pero, entre nosotros, ya no es ningún misterio que la universidad y el Centro Nacional para la Investigación Científica no están satisfechos con los resultados científicos obtenidos por el organismo Expediciones Polares Francesas.

[...] Prefiero empezar de cero que estar vinculado a cualquier organismo, fuera de la universidad y del CNRS. Por lo que el centro de glaciología que crearemos en Grenoble será totalmente independiente de París».

Como Néel, Louis Lliboutry no quiere quedarse en Grenoble «únicamente con la idea de que sea un peldaño para luego desarrollar una carrera en París». Sobre este tema, tiene ciertamente la misma opinión que su profesor, quien señalará en sus memorias: «Las deficiencias de las universidades de provincia se debían a la atracción que ejercía La Sorbona sobre los mejores de sus profesores, y a la cual ellos tenían la debilidad de sucumbir».

El año 1957 empieza con un feliz acontecimiento, el nacimiento de Olivier, el segundo hijo de Louis y de Claude, el 19 de enero. «Acabo de recibir su amable tarjeta anunciando el nacimiento del pequeño Olivier. Felicidades. Veo que no pierde tiempo y que la productividad se manifiesta en todos los sentidos...», le escribe un amigo argentino desde Buenos Aires, para agradecerle por haberle enviado *Nieves y glaciares de Chile*.

El período «artesanal» de la glaciología en Grenoble

Louis lee toda la documentación que encuentra sobre la historia del estudio de los glaciares. Las primeras descripciones datan de fines del siglo XVIII (Bourrit, Saussure), y las primeras observaciones de los glaciares del mont Blanc son probablemente aquellas realizadas por Forbes y Agassiz a mediados del siglo XIX, seguidas por las de Tyndall y de Viollet-Leduc. En 1890, un parisino adinerado, Joseph Vallot, «el gentleman-ermitaño del mont Blanc», hizo construir por su cuenta un observatorio cerca de la cima más alta de los Alpes. Y en 1891 se enseñó la glaciología por primera vez en Grenoble, a iniciativa de Wilfrid Kilian (el padre de Conrad Kilian).

Pero regresemos al 14 de enero de 1957. Cuando Lliboutry anuncia a Jean Coulomb que encontró, «gracias a la gentileza del profesor Néel», un local en la universidad que puede albergar el centro de documentación de glaciología creado por Garavel, piensa pedir más tarde la creación de un instituto de glaciología independiente.

«Al parecer soy demasiado modesto. Mientras tanto, en la Sorbona, un profesor que nunca ha visto un glaciar puede crear de la nada un “Instituto de Glaciología” [...] Obviamente Paul-Émile Victor entra en el juego, ya que sabe que la palabra «Sorbona» goza de gran prestigio. ¡Cuando estaba en Chile, era mejor decir que yo tenía una licencia de La Sorbona que una agregación de la ENS! [...]»

Como no estoy directamente relacionado con ninguna cátedra, ni soy tampoco el portavoz de ningún organismo oficial o internacional vinculado con la glaciología, las autoridades del Departamento de Aguas y Bosques, de Meteorología, del SIPRE norteamericano, etc., dudan en apoyarme, incluso para enviarme sus bibliografías. Me molesta aún más esta situación, al ver que los investigadores me siguen felicitando por mi trabajo anterior y alentando para mi futuro trabajo.

Es por ello que decidí dirigirme al CNRS como única vía probable, solicitándoles —si fuera posible— crear en Grenoble un pequeño instituto de glaciología, con un financiamiento autónomo, y que me indicaran lo que yo tendría que hacer para ello».

El 18 de marzo de 1957, Louis Lliboutry relata al Dr. Bader el inicio de este proyecto en estos términos:

«Como podrá verlo en el encabezamiento, el Laboratorio de Glaciología de la Universidad de Grenoble por fin ha sido oficialmente constituido [...].

Existía en Grenoble un pequeño grupo que se ocupaba de Snow Hydrology y avalanchas, bajo el nombre de CEDONIGLA, fundado dos años antes por el ingeniero forestal L. Garavel, quien implementó una red de informantes voluntarios siguiendo el ejemplo suizo. [...] Los acogimos en este laboratorio de la universidad. A cambio, tengo una mecanógrafa y material de nivología.

Este año doy un curso de nivología y glaciología en la Escuela de Ingeniería Hidráulica de Grenoble, una escuela donde todos los profesores pertenecen a la Educación Superior, pero que es financiada y administrada también por empresarios industriales. A este curso también asisten alumnos de geografía. Para el próximo año, tengo que organizar una sección de suelos helados, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la escuela. Con ello pretendo introducir una glaciología basada en la física y las ciencias de la ingeniería, y no exclusivamente en la geología, como era el caso en Francia».

En junio se dirige al reverendo padre Pierre Lejay, presidente del comité nacional francés del Año Geofísico Internacional, para pedirle fondos que permitieron financiar varios años de investigación y una mejor utilización de sus capacidades.

«Espero que una mirada a mis publicaciones los pueda convencer de que no fueron únicamente mis pulmones que usé a 4.000 m de altitud, sino también mi materia gris.

Las teorías esparcidas en cerca de cuarenta publicaciones y en un voluminoso libro en español, me han incitado —de regreso a Francia— a querer seguir investigando en el ámbito muy desprestigiado de la glaciología.

No pretendo que sea necesario crear cualquier instituto de glaciología, [...] pero hay que señalar que esta ciencia, que abarca tanto la micrometeorología como la reología y la geología, se encuentra en pleno desarrollo desde la última guerra, en particular gracias a los trabajos realizados por los físicos de Bristol y los ingenieros



Galería de hielo en el glaciar del Chardon en los Alpes.

del SIPRE norteamericano; y podemos obtener brillantes resultados en la materia, lo que justificaría un aporte financiero inicial de parte del CNRS».

En una carta al andinista Humberto Barrera con fecha 8 de diciembre de 1957 insiste en el hecho de que la glaciología se ha convertido en su principal ocupación:

«Además de varias ocupaciones académicas, (hay pocos profesores de física), me ocupo principalmente de glaciología, y algunos reconocimientos en terreno

realizados aquí durante este verano me han mostrado que queda mucho por hacer [...].

Mi libro fue muy bien acogido en Europa y en Estados Unidos, y ya estoy pensando en una segunda edición mejorada.

Lamento mucho que Chile sea representado en Groenlandia por Lackington, y no por usted. Este militar es un experto en energía atómica y el hielo le interesa muy poco, excepto en un vaso de whisky».

El Laboratorio de los Cósmicos

En enero de 1958, Louis Leprince-Ringuet solicita una entrevista con Louis Lliboutry y le propone tomar la dirección del «Laboratorio de los Cósmicos», para desarrollar investigaciones en el ámbito de la glaciología. En 1943, el CNRS había creado este laboratorio en el Col du Midi, a más de 3.500 m de altitud, para estudiar la radiación cósmica y sus aplicaciones en física, pero éste se estaba volviendo inútil, puesto que muchas más partículas de alta energía serán pronto obtenidas con el Síncrotrón del CERN, cerca de Ginebra. El director del CNRS, el profesor Coulomb, no podría obtener de la comisión competente del comité nacional la creación de un laboratorio sólo para Louis Lliboutry, pero tiene la facultad de nombrarlo director de un laboratorio que ya existe.

En la época de Leprince Ringuet se subía a los Cósmicos utilizando un teleférico que incluía dos tramos que llegaban abajo de la Aiguille du Midi. El tercer tramo, cuyas obras fueron abandonadas en 1947, se utilizaba para transportar el material, y la «plataforma de carga» era una simple bandeja de madera, lo que hacía el trayecto bastante acrobático.

En 1947, un día en que Lionel Terray iba a utilizar una plataforma similar a aquella de los Cósmicos para

llevar a un cliente al Col du Midi (1.300 m de desnivel), el operador del teleférico les dio una pértiga y les dijo:

«Súbanse a la plataforma, pero al llegar arriba, la plataforma pasa muy cerca de la roca; y como puede haber un poco de viento, les paso una pértiga para que puedan alejarse de la roca y evitar problemas».

Para llegar hasta el laboratorio desde el paso, hay que descender una arista estrecha donde es necesario usar crampones, y luego bordear el glaciar del Col du Midi antes de subir hacia el chalet.

En realidad, no hay ningún material científico en los Cósmicos, excepto dos enormes bobinas de cobre.

«Una pieza grande era enteramente ocupada por un grupo electrógeno del tamaño de un motor de barco pesquero, destinado a salir del paso en caso de interrupción de la corriente eléctrica que fuera provocada por un rayo».

Louis Lliboutry sigue recibiendo felicitaciones de todos aquellos a quienes envió su libro *Nieves y glaciares de Chile*. El profesor Gordon Manley, de la Universidad de Londres, señala haber leído con gran placer esta obra, que es «[...] a la vez una enciclopedia de glaciología y una descripción precisa a nivel regional de la evolución de la climatología».



Preparación de un agujero en el hielo para colocar las cargas de dinamita.

La plataforma de servicio usada para subir al refugio de los Cósmicos. ▶







La Aiguille du Midi, en los Alpes,
a 3.842 m, cerca de Chamonix.

El equipo de Lliboutry se instala en un antiguo obispado

Se hace rápidamente evidente que la cabaña de los Cósicos puede ser ocupada sólo para misiones temporales. Louis Lliboutry piensa entonces en constituir un equipo permanente basado en Grenoble, que se ha ido transformando en una gran ciudad universitaria e industrial.



El laboratorio de glaciología se instaló en las dependencias de un antiguo obispado en el centro de Grenoble.

Además, necesita un lugar en el valle de Chamonix para almacenar material y alojar a Marcel Maître, quien está encargado de realizar medidas de rutina durante todo el año. Existe el chalet Vallot, pero el profesor Danjeon, director del observatorio de París —quien lo recibió como legado, siempre y cuando fuera utilizado para la investigación científica—, rechaza categóricamente la solicitud de Louis Lliboutry. En 1960 el CNRS compra un terreno en Les Favrands, en un lugar llamado el Clos de l'Ours, en el cual ha sido construido un chalet muy funcional, no muy lejos de la estación de salida del teleférico de la Aiguille du Midi.

En 1961, el decano Moret ofrece amplias dependencias a Louis Lliboutry, en la calle Très-Cloîtres, en el centro histórico de Grenoble. Se trata del antiguo palacio episcopal situado al lado de la histórica catedral Notre-Dame, y que se ha convertido desde más de un siglo en el templo de la razón científica. Químicos, geólogos y geógrafos llegaron hasta este lugar ancestral impregnado por los misterios de la fe, con sótanos insospechados, como un iceberg de mármol, de madera y caliza, viajando por los meandros de la historia, remontando entre otros a Champollion, quien estudió las antiquísimas inscripciones de la antigua torre del palacio, bajo la cual yace una muralla romana.

Lliboutry, al igual que el famoso egiptólogo, trabajará durante cerca de veintitrés años en las dependencias de la calle Très-Cloîtres, transformando este paisaje monástico con antesalas, alcobas y rincones secretos, altas chimeneas, cocinas, antiguas caballerizas, bodegas con piso de tierra y trasteros oscuros, en un laboratorio de glaciología con talleres de mecánica que conquistarán los polos.

Louis Lliboutry obtiene además la autorización para instalar una estación sísmica en una galería que había sido utilizada antes como depósito de municiones y que se encuentra en un terreno que pertenece a la universidad. Sin embargo, esta instalación resulta decepcionante. Las galerías son demasiado húmedas y los aparatos se ven afectados. Por otra parte, como se trata de una actividad universitaria, sin subvención del CNRS, los investigadores no se sienten motivados para mantener los registradores ni para realizar y recopilar los registros.

De todos modos, la estación sísmica sirve para promocionar la enseñanza de la geofísica general impartida por Louis Lliboutry. Y en vez de lamentarse por los escasos medios otorgados para sus proyectos, éste se embarca en una nueva versión (de 1.000 páginas) del *Tratado de Glaciología*, y propone su publicación a la editorial Éditions Masson. En esta edición, piensa desarrollar nuevas ideas sobre las paleotemperaturas y la historia del clima. Es el primero en sugerir que el número de glaciaciones en el hemisferio norte durante el período Cuaternario seguramente había sido de 15, mientras se admite generalmente que fueron cuatro.

En un artículo de la *Revue de Géographie Alpine* de 1962 titulado «El desarrollo actual de los estudios glaciológicos en el Mundo», Charles-Pierre Péguy recuerda la historia de la Asociación Internacional de Hidrología Científica, y más precisamente de la asamblea de los años geofísicos internacionales, que tuvo lugar en Helsinki en julio de 1960. «El solo tomo de Neige et Glace dedicado a las actas de Helsinki representa 588 páginas», precisa el autor antes de evocar las participaciones más importantes, entre las cuales la «[...] de nuestro compatriota Louis Lliboutry, quien describe unos curiosos fenómenos glaciares que se producen en la cordillera de los Andes en Chile, y que parecen resultar de la interstratificación de residuos de nieve acumulados durante el año y de desprendimientos ocurridos en el verano. Según Lliboutry, la mecánica de la masa glaciar en este caso es el resultado del hundimiento del suelo subyacente, causado por el agua de deshielo subglacial».

¿Si los proyectos de Louis Lliboutry no hubieran empezado a tomar forma, habría podido sentirse atraído por una carrera en Chile?

«El rector Gómez Millas me habla mucho de ti y estaría seguramente muy contento de verte de nuevo en la universidad», le escribe Jean Borde, del Instituto de Geografía de la Universidad de Chile, el 12 de mayo de 1960. «Incluso me pidió sugerirte que crearas una sección de glaciología al interior de este mismo Instituto de Geografía, el cual se ha convertido en una verdadera referencia. Creo que si pudieras tener algunos meses libres, mucha gente aquí estaría contenta de verte de nuevo, sea al interior o al exterior del Instituto».

Louis Lliboutry trabaja sin descanso, y dedica muy poco tiempo a actividades extraprofesionales y recreati-

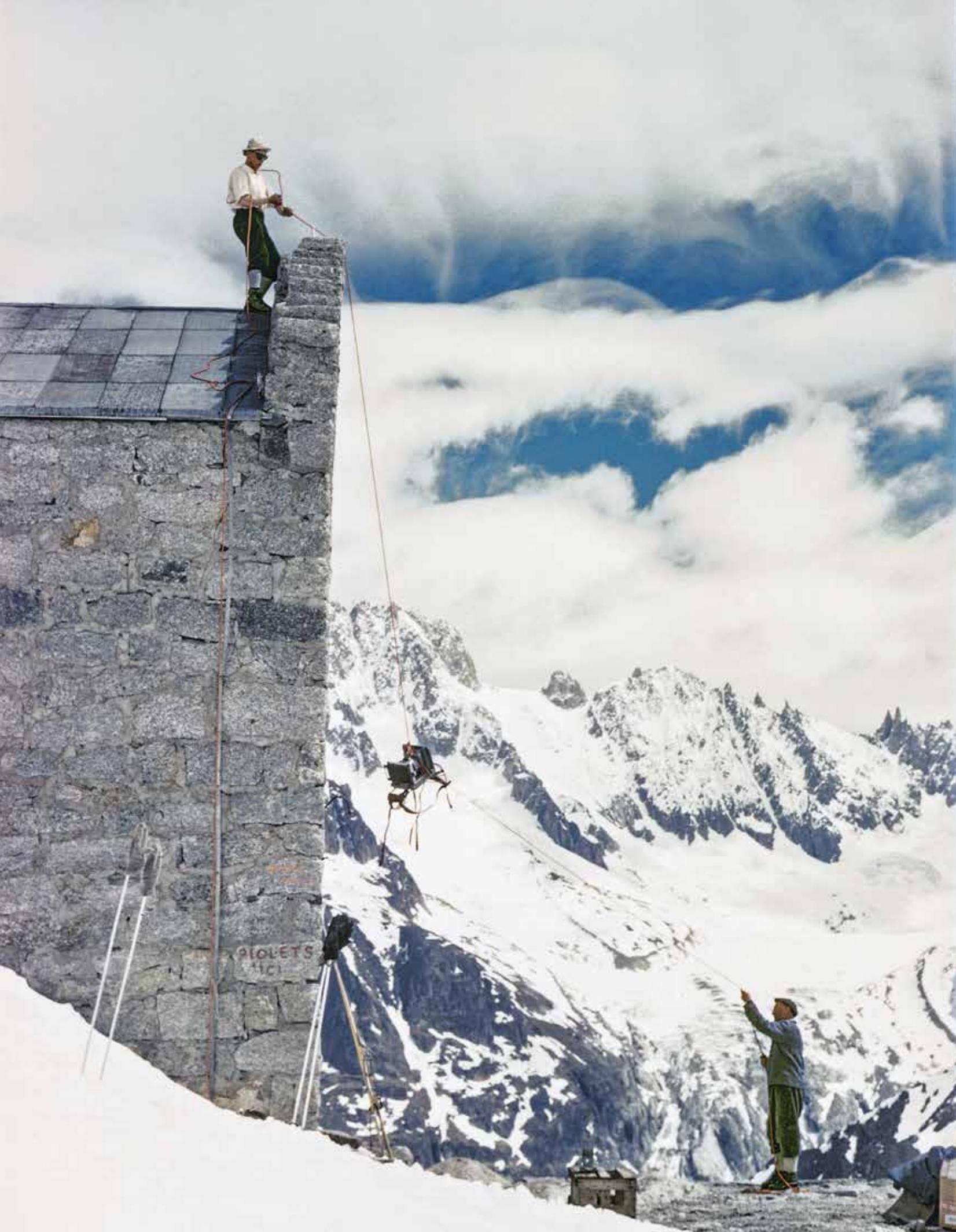
vas con sus amigos, quienes se quejan, como lo muestra esta carta de su madre, con fecha del 5 de mayo de 1963: «Lionel Terray lamentó no haber podido ver a Louis durante su estadía. Lo comentó a algunos amigos del Club alpino con los cuales fue a preparar una cargolada en Castelnou».

En 1964, luego de varios años de desavenencias con la directiva parisina del CNRS, el Laboratorio estrena por fin un Land Rover todo terreno, pero deberá esperar 1967 para contar con un vehículo oruga.

«Llegando de Chile, primero pensé naturalmente en utilizar mulas, como lo hacían antes nuestras tropas de montaña, pero tenía treinta años de atraso. Encontré a un campesino dispuesto a arrendarnos a un alto precio sus dos únicas mulas, dos bestias con un pelaje brillante, gordas y robustas como caballos criados para las carnicerías. ¡Siempre y cuando no cargaran más de 60 kg, se les diera todo el heno y la avena necesarios, y durmieran bajo techo!».

Mientras Louis Lliboutry desarrolla investigaciones glaciológicas en Grenoble, Bauer y Lorius han fundado en París un centro de estudios glaciológicos en las regiones árticas y antárticas, con sede [...] en una peniche anclada en el muelle Carnot en Boulogne-Billancourt. Lliboutry mantiene buenas relaciones con Lorius, pero no con «Bauer, rudo y autoritario». Por ello en 1964 los parisinos, por temor a que Lliboutry «explote», envían a Grenoble a un «señor que ofrece sus buenos oficios», el ingeniero Perroud, para tratar de reconciliarlos. Pero Lliboutry —a quien esta división geográfica de la misma ciencia recuerda la experiencia arrogante del profesor Glangeaud en La Sorbona— rechaza sus propuestas: «Hacer glaciología sólo en los Alpes, dejando la investigación glaciológica en el Ártico y la Antártica a Bauer y Lorius, me parece estéril».

En diciembre del mismo año, durante la reunión anual del comité directivo del Laboratorio de la Aiguille du Midi, Lliboutry pide que el nombre del laboratorio sea cambiado a Laboratorio de Glaciología. Pero, en virtud del espíritu jacobino, se llamará finalmente Laboratorio de Glaciología Alpina, puesto que no se debe quitar protagonismo al laboratorio parisino: ¡un académico de Grenoble podía ocuparse únicamente de su región, y sólo los parisinos estaban facultados para estudiar todos los glaciares del mundo!



PIOLETS
1911

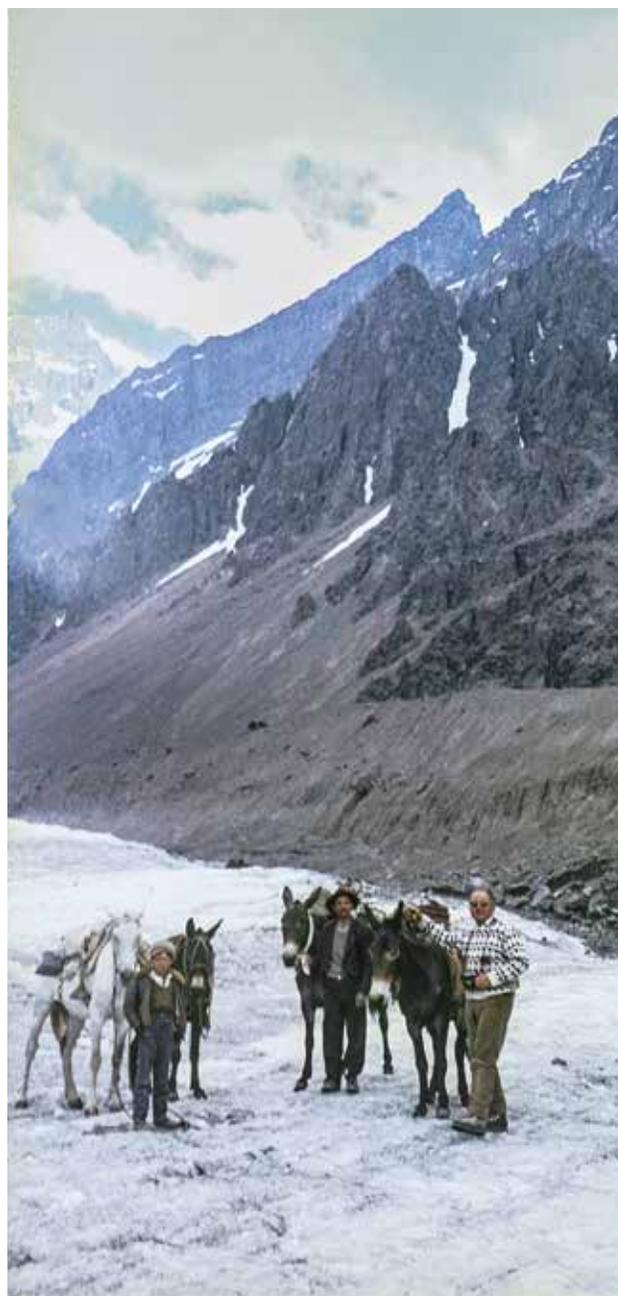
Misiones en Brasil y en Chile

En la primavera del 1966, Lliboutry desembarca en Bahía, encargado por el Servicio de Cooperación Técnica del Ministerio de Asuntos Exteriores de supervisar a un grupo de jóvenes físicos que venían de São Paulo, decididos a abandonar la física nuclear para volcarse hacia la geofísica. Lliboutry los disuade de lanzarse a estudiar la ionosfera, un sector muy de moda, pero que generaba pocas oportunidades laborales, y los orienta hacia el laboratorio de baja radiactividad de Gif-sur-Yvette, codirigido por Jacques Labeyrie, para poder establecer vínculos de hermanamiento. Les propone un programa de estudios conducente a varias especializaciones en geofísica e insiste en la necesidad de poder contar con buenos talleres de mecánica y electrónica, en vez de instrumentos científicos de alta tecnología.

Lliboutry pasa el otoño de 1966 en Santiago de Chile, esta vez con su mujer Claude y sus hijos (de 11 y 9 años). Decidieron viajar por barco; embarcaron en Cannes en el paquebote italiano «Donizetti», pasando por el canal de Panamá, con escala en Barcelona, Tenerife, Caracas, Lima, para luego llegar a Valparaíso. Regresarán por avión, con escalas en Pointe-a-Pitre y Nueva York.

Se le solicita a Lliboutry ir a examinar dónde se encuentra la línea divisoria de las aguas y del hielo al norte del Fitz Roy, ya que existe un litigio con Argentina en cuanto al trazado de la frontera en esta región. En vez de honorarios, se le pagan los gastos de viaje de su familia.

«Aparte de ese peritaje, mi principal objetivo era lanzar un programa de investigaciones sobre los glaciares que albergan penitentes en los Andes de Santiago, en colaboración con mi laboratorio, en el marco del Decenio Hidrológico Internacional 1966-1976. La Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile me había prestado un auto robusto y asignado un asistente titulado en electrónica, para que lo formara».



Lliboutry, junto a unos arrieros en el glaciar Juncal Norte, 1966.

◀ Refugio del Tiburón en el Macizo del monte Blanco. Instalación de una cámara fotográfica para determinar la velocidad del glaciar.

La creación del Laboratorio de Glaciología en 1969



Michel Vallon, en el glaciar Saint Sorlin, en 1969.

En 1968, el Laboratorio de Glaciología cuenta con ocho investigadores, entre los cuales está Paul Duval, el primero en obtener el estatuto de investigador del CNRS y que posee un doctorado en física. «Se hizo rápidamente querer por todos, ya que era la personificación de la bondad y de la generosidad». Un recluta de primera para el laboratorio, considerando su experiencia en la investigación experimental y sus conocimientos en física de los sólidos. Además, el equipo incluye a varios alumnos en práctica que preparan un diploma de posgrado, doce técnicos y dos asistentes administrativos. «Un equilibrio ideal para un laboratorio cuyas principales actividades se realizan en terreno y que debe fabricar por sí mismo la mayor parte del equipamiento que utiliza».

Tres de los investigadores son profesores asistentes en la facultad: Michel Vallon, quien posee un doctora-

do estatal; Alain de La Casinière, que prepara una tesis en micrometeorología, y Daniel Dupuy, cuyas investigaciones se basan en los núcleos de hielo extraídos del glaciar de Saint-Sorlin. Alain de La Casinière será Agregado Cultural y Científico de la Embajada de Francia en Madrid entre 1965 y 1974. Más tarde comentará que Lliboutry tenía una personalidad rica y compleja, «un solitario, con un pensamiento original, y un brillante intelectual».

La integración de nuevos estudiantes requiere la creación en Grenoble de un departamento de posgrado en geofísica. Lliboutry da un paso más en el desarrollo de la glaciología al abandonar la enseñanza de la física y la presidencia del jurado del examen para la obtención del certificado de estudios superiores en Ciencias Físicas, Químicas y Naturales (SPCN).

«Para ser aceptado como investigador en el CNRS, había que realizar una buena tesis de posgrado y defender un programa de investigación atractivo, llevando a una tesis estatal». Con este equipo reducido, Lliboutry «[...] lanza grandes campañas de terreno para entender los procesos del flujo de los glaciares y elaborar modelos. Todo o casi todo queda por descubrir acerca de su funcionamiento: ¿Cómo se deforma el hielo? ¿Cómo se desliza el glaciar sobre su base rocosa? ¿Cómo influye la estructura del hielo en la deformación del glaciar? ¿Cuál es el origen de la foliación visible en la superficie de los glaciares? ¿Cómo fluctúan los glaciares a lo largo del tiempo?».

Lliboutry está convencido de que, en primer lugar, hay que adquirir datos esenciales, como la topografía del zócalo rocoso (por método sísmico), la velocidad del flujo glaciar (utilizando un teodolito o por fotogrametría terrestre), la estructura de la neviza y del hielo (por extracción). La dinámica de los glaciares se revela poco a poco.

El cambio climático y el calentamiento global todavía no son temas de preocupación, ya que los glaciares de montaña están registrando crecidas. Desde Noruega hasta Nueva Zelanda, pasando por los Alpes y el Himalaya, casi todos los glaciares están avanzando y la principal preocupación de los climatólogos es el ingreso en la próxima gran glaciación. Sabemos que el motor esencial de las fluctuaciones glaciares es el clima.

No obstante, para el director del laboratorio, la tarea es inmensa. Apoyándose en su experiencia en América del Sur y en el Laboratorio de Glaciología Alpina, lucha en todos los frentes para obtener financiamiento, construir a lo largo de los años un taller de mecánica y electrónica cada vez más eficiente —la glaciología debe crear sus propias herramientas, en particular para la perforación y extracción—, redactar nuevas publicaciones, reunir a los glaciólogos franceses, desarrollar un departamento de geofísica en la universidad de Grenoble en pregrado y posgrado, y obtener dependencias adecuadas para el funcionamiento del nuevo equipo de ingenieros y técnicos «con manos de oro que hacían milagros para resolver problemas de perforación».

El Laboratorio de Glaciología Alpina se transforma por fin en Laboratorio de Glaciología por decreto del 5 de junio de 1969, diez años después de la aventura algo irreal del Laboratorio de los Cósmicos. Sin embargo, Louis Lliboutry y Claude Lorius, dos hombres fuera de lo común, con competencias muy diferentes, se verán confrontados a nuevos desafíos.

Lliboutry y Lorius: dos visiones diferentes de la investigación

El futuro y la orientación de la glaciología se juegan entre estos dos ilustres investigadores.

Lliboutry es un teórico, un inventor, un físico, un mecánico excepcional y un excelente cartógrafo. Nadie puede rivalizar con él en su área. Sacó la glaciología de la difícil situación en la cual se encontraba en Francia, creando una nueva ciencia ligada a la geofísica. En cierto modo, es un hombre de las «Luces», un heredero del sabio francés Charles de La Condamine.

Lliboutry inició los trabajos glaciológicos extralpinos en el laboratorio organizando expediciones a las Islas Kerguelen, como lo veremos más adelante



Claude Lorius (a la derecha), en la biblioteca del laboratorio, con Louis Lliboutry y Serge Martin.

(el casquete Cook que cubre parte de estas islas es un glaciar temperado). En la década de 1970, aunque no participó en ninguna misión en la Antártica, los responsables del Programa Nacional de Estudios Climáticos le encargan a Lliboutry modelar el flujo del casquete de hielo antártico, para datar las muestras de hielo analizadas y conocer mejor las leyes del comportamiento de los hielos polares.

Él solicita que se calculen las velocidades y temperaturas en una línea divisoria de los hielos a través de un método original, para explotar los resultados obtenidos por el laboratorio perforando el hielo hasta 900 m de profundidad en el famoso Domo C. El avance de la ciencia que Lliboutry contribuyó a crear a su regreso de Chile requiere otros conocimientos básicos, en particular en física, química, oceanografía, etc. Él es consciente de ello, pero sabe que su laboratorio de investigación fundamental se encuentra en una encrucijada.

Sabe también que la falta de dependencias adecuadas ha retrasado por diez años el rendimiento científico de la glaciología.

Claude Lorius es un brillante geoquímico en investigación asociada a exploraciones, pero sobre todo un geopolítico y un táctico de la glaciología francesa en la Antártica, lo que será difícil de entender para Lliboutry. Dotado de un carisma y de una capacidad de comunicación excepcionales, este hombre de terreno ya tiene más de diez años de experiencia en el continente blanco cuando ingresa al laboratorio de Grenoble. Es un explorador del clima y de la paleoclimatología, un descendiente de Charcot, de Amundsen o de Gerlache, un heredero de Paul-Émile Victor, capaz de mostrar la ascesis de un Charles de Foucauld. Hizo suya esta frase del comandante del *Pourquoi Pas*: «¿De dónde proviene el extraño atractivo de las regiones polares, tan poderoso, tan tenaz, que, una vez regresado, uno olvida el cansancio físico y moral, y sólo piensa en volver a ellas?».

La incorporación del equipo parisino «ensombrece» las relaciones entre los dos hombres. En *Mémoires sauvées des glaces*, Claude Lorius cuenta:

«Los hábitos observados en su laboratorio se vieron alterados con nuestra llegada. Ocupábamos cada vez más espacio, puesto que los programas de glaciología polar eran entonces prioritarios para las autoridades científicas. [...], en detrimento de la investigación sobre los glaciares alpinos que mantenía a duras penas un presupuesto suficiente para su funcionamiento» (Lorius, 2016).

En cuanto a Lliboutry, escribe en sus memorias: «No era una confrontación de ambiciones personales, sino que lo que estaba en juego era la orientación a largo plazo del laboratorio. [...] ¿Había que sacrificar la glaciología propiamente dicha, para desarrollar la paleoclimatología?». ¿Acaso Lliboutry pensaba que la investigación fundamental no debe ceder paso a una investigación aplicada, incluso si ésta parece «prometedora?» Unos años más tarde el dirá, no sin segundas intenciones: «La dinámica de los glaciares vuelve con fuerza para simular el cambio en el nivel de los mares».

La reorganización del laboratorio en equipos autónomos de tamaño muy desigual también provoca un sismo:

«Aparte del equipo principal que se dedicaba a extraer testigos de hielo, figuraban en el organigrama — bajo su supervisión directa— varios otros equipos pequeños, entre los cuales uno especializado en mecánica del hielo, dirigido por Duval y un equipo de “modelación” (en realidad, se ocupaba de mecánica numérica) con mis ex o actuales tesisas: Jacques Meyssonier, Jean-Michel Vanpé y Catherine Ritz. Él no me había consultado y pensaba seguramente que yo iba a tomar la dirección, pero me negué, protestando contra esta absurda fragmentación. Un teórico debe trabajar en un equipo experimental. Es lo que yo había hecho con Duval, y es lo que hubiera podido hacer con el equipo de Lorius: yo sabía más de glaciaciones cuaternarias, intercambios aire-suelo y dinámica de los sistemas, que cualquier otro miembro de su equipo. Debía haber un solo gran paleoclimatólogo en Francia», lamenta Lliboutry.

En el momento de la reunión de la SHF que se desarrolla el 4 y 5 de marzo de 1969, Lliboutry sigue siendo el jefe del laboratorio. Relata lo siguiente:

«En 1969, la ley de orientación de la educación superior afirma que la investigación fundamental es una vocación de las universidades. Hubiera sido mejor decir que es una vocación de los universitarios. Si bien las universidades otorgan algún financiamiento para la investigación, muchas veces sólo se trata de una baja contribución (7% en el caso de mi laboratorio), cuyo único interés es la flexibilidad de la gestión.

En el caso de la glaciología, la investigación presenta tres caracteres que establecen el marco en el cual podrá desarrollarse:

1) es una investigación fundamental, de la cual sólo se pueden hacer cargo los organismos de Estado;

2) es una investigación de larga duración, considerando la lentitud de los fenómenos glaciares y la necesidad de disponer de series estadísticas. No podemos pensar en un laboratorio de geología, de física o de geografía, donde se realicen de forma esporádica tesis sobre la glaciología; 3) es una investigación pluridisciplinaria, que requiere equipos que incluyan mecánicos, físicos, estadísticos, climatólogos, topógrafos, etc.

Todo ello, además de la necesidad de disponer de talleres de mecánica y electrónica para fabricar el material ad hoc, hacen que un centro de glaciología sólo pueda desarrollarse en una ciudad universitaria. Un Instituto para el estudio de la nieve o un centro de estudios de los glaciares aislado en la montaña puede ser únicamente un anexo, un punto de apoyo logístico.

Éstas son las ideas directrices que me han guiado desde diez años. Y han ido imponiéndose muy lenta-

mente a las autoridades superiores. En 1958, me confiaron el laboratorio de la Aiguille du Midi, que pertenecía al CNRS y que sólo existía en el papel, excepto el refugio de los Cósmicos y un puesto de guardia del refugio, para albergar a investigadores y glaciólogos aislados.

En 1962, la Facultad de Ciencias de Grenoble pres-
tó locales provisorios, en la calle Très-Cloîtres, donde pudieron desarrollarse talleres y una biblioteca.

En 1964, previa consulta con las secciones de astronomía y geofísica, de geología y geografía del Comité Nacional de Investigación Científica, el directorio del CNRS transforma el nombre del laboratorio en “Laboratorio de glaciología alpina”. El comité directivo incluye a representantes de estas tres secciones y de la sección mecánica.

En 1968, por fin, por recomendación de la sección de astronomía y geofísica, a la cual este laboratorio está

Sondeos eléctricos y sísmicos en la Vallée Blanche para determinar la profundidad de un glaciar.



vinculado, el directorio del CNRS decidió que Claude Lorius, profesor investigador en el CNRS y su pequeño equipo que trabajaban en un local (una peniche) prestado por las Expediciones Polares, y en el Centro de Estudios Nucleares de Saclay, se unirían a nosotros en Grenoble en cuanto tuviéramos los locales adecuados. Al mismo tiempo se elimina el adjetivo “alpina” del nombre del laboratorio, puesto que existe una vocación nacional para realizar investigaciones en glaciología tanto en el sector metropolitano como en el resto del territorio, según las circunstancias.

Por supuesto se mantendrá como en el pasado la cooperación con los laboratorios citados, de Gif sur Yvette y Saclay, materializada actualmente en una “investigación cooperativa basada en un programa” titu-

lada “Estudios físico-químicos e isotópicos de los casquetes polares”.

[...] Nuestros locales actuales se hacen entonces irrisoriamente insuficientes. Un edificio debe ser construido en el campus universitario de Saint-Martin-d’Hères, donde podremos por fin tener los laboratorios fríos con aire acondicionado que requiere la glaciología moderna, unos laboratorios sin polvo para analizar los testigos, una sala de restitución climatizada, un hall de montaje para el taller de mecánica, un garaje para los vehículos de servicio, y laboratorios móviles».

Correspondencia de las expediciones del Laboratorio de Glaciología en la Antártica.

Arriba, el glaciar del Rey (Kongsvegen) en la Bahía del Rey (Kongsfordjen) en el Sptizberg, una isla noruega ubicada en el océano Ártico.
Abajo, Michel Vallon, Roland Vivet, Louis Llibouty y Louis Philippe, en el Kongsvegen.





Catástrofes en la montaña: el glaciar de Allalin en Suiza y el lago Parón en Perú

Lliboutry publicó artículos sobre el deslizamiento de los glaciares mucho antes de 1965. Según él, la ley de la fricción de los glaciares con su lecho condiciona toda su dinámica. El deslizamiento sobre un lecho rocoso indeformable se debe en parte a un deslizamiento por derretimiento y rehielo simultáneos alrededor de las rugosidades del lecho y en parte a un deslizamiento por fluidez, considerando que el hielo rodea estos obstáculos. Cuando la velocidad de deslizamiento es muy fuerte se producen desprendimientos y la fricción ya no depende de la velocidad, sino de la presión del agua en las cavidades subglaciales. Pero las ideas de Lliboutry son generalmente descartadas, ya que ponen en peligro la teoría de las ondas de crecida glaciales, desarrollada durante mucho tiempo por Nye a partir de 1960 y que le valió convertirse en el gurú de los glaciólogos. Sin embargo, la ecuación inicial en la cual está basada esta famosa teoría nunca había sido controlada hasta entonces a partir de mediciones efectuadas en los glaciares, las cuales sólo serán realizadas en los años 1970 y 1980.

Cuando todavía no se toman en cuenta las ideas de Lliboutry sobre el deslizamiento de los glaciares, ocurre en el Valais un desastre que demuestra que éstas eran pertinentes. Es entonces elegido como experto por el juez de instrucción de Viège encargado de la investigación.

«El 30 de septiembre de 1965, a mediodía, se desprendió la parte inferior de la lengua del glaciar de Allalin; es decir, casi un millón de metros cúbicos de hielo, provocando una avalancha que arrastró las obras de construcción del embalse de Mattmark, causando la muerte de 88 personas.

[...] Si se hubieran examinado en tiempo oportuno las fotografías tomadas desde 1949, se habría observado en algunas de ellas una lengua glaciar muy agrietada, lo que entonces habría podido hacer sospechar un fenómeno anormal y pensar, sin duda, en la posibilidad de una avalancha de hielo. En materia de desastres naturales, casi nunca se consultan los documentos más antiguos».

La catástrofe era previsible; sin embargo, los ingenieros de la época no podían conocer las ideas de Louis

Lliboutry, ya que éstas no circulaban. Sólo se les hubiera podido reprochar una falta de imaginación.

Los glaciares provocaban desde mucho tiempo desastres mucho más grandes en la cordillera Blanca en Perú, una cadena montañosa que se extiende de norte a sur por más de cien kilómetros y cuyas cimas culminan a más de 6.000 m. Los glaciares de esta región evacúan enormes flujos de hielo, y como las fuertes pendientes impiden que sean muy espesos, son rápidos y muy agrietados. Al oeste de la cordillera Blanca se alza una cadena paralela de menor altitud y compuesta de rocas volcánicas: la cordillera Negra. El valle que separa las dos cadenas montañosas es el valle del río Santa, que nace en la laguna Conococha, la «laguna de los truenos». Este callejón es fértil y está muy poblado.

En diciembre de 1941, un alud de lodo y de rocas causó 6.000 víctimas, el cual fue provocado por el repentino vaciado de una laguna que se encontraba a un extremo del glaciar. El mismo fenómeno, un aluvión, ya se había producido en 1725 y había dejado miles de víctimas. En 1945 sucedió otro desastre: el poblado de Chavín, situado en la vertiente oriental, fue destruido por un aluvión.

En 1950, mientras algunos ingenieros intentaban bajar progresivamente el nivel de la laguna Jancarurish, al norte del Alpamayo, cerca de diez millones de metros cúbicos de agua y por lo menos tres millones de metros cúbicos de tierra y rocas se vaciaron repentinamente hacia el valle de Los Cedros, dejando centenares de víctimas y causando cuantiosos daños.

No obstante, existen en la cordillera Blanca dos lagunas mucho más peligrosas y donde no se puede aplicar la técnica de la disminución del nivel del agua: la laguna Parón y la laguna Safuna Alta.

Lliboutry cuenta en sus memorias:

«La CPS [Corporación Peruana de Santa], afectada por la catástrofe de Los Cedros, se dirigió a la empresa de ingeniería francesa Coyne et Bellier, que solicitó los consejos del geólogo André Pautre y recurrió a mí para el tema glaciológico».



El terremoto de 1970 en Perú tuvo como consecuencia el gigantesco desprendimiento de una parte de la cumbre norte del Huascarán (6.655 m).

En febrero de 1967, Louis Lliboutry aterriza en Lima con sus compañeros y en seguida se dirige hacia Conococha por la carretera estrecha y sin barandas que atraviesa la cordillera Negra, serpenteando por el lado del valle. Luego el grupo sube a caballo y bajo la lluvia hacia la laguna Parón, por un sendero mal trazado.

«El único que tenía la cabeza protegida de forma adecuada era Benjamín (el ingeniero de la CPS): llevaba el típico sombrero de paja trenzada por campesinos, que protege tanto contra el sol como contra la lluvia, y permite pasar rápidamente a través de las ramas espinosas».

La laguna Parón, a 4.200 m de altitud, cubre un fondo de valle plano de 600 m de ancho y 3 km de largo. Amenaza la ciudad de Caraz, situada 2.000 m más abajo, ya que el embalse natural que la retiene puede ser

destruido no sólo por la erosión al aire libre, sino también por la erosión torrencial subterránea: los «renards» (erosión en surcos). Además, los ingenieros temen que la gran morrena sea en realidad una lengua glaciar recubierta y que el agua pueda encontrar un camino al derretirse el hielo.

Lliboutry pide que se realicen numerosas mediciones y sondeos eléctricos. La única solución para bajar el nivel de la laguna es perforar en la roca sana una galería de 1.200 m, dotada de una válvula, y que desemboque 50 m bajo la superficie de la laguna. En primer lugar se construye una ruta de acceso y luego se inician las obras.

En julio de 1967, la CPS confía a Louis Lliboutry una segunda misión, la de ir a explorar las lagunas Safuna, en la vertiente norte del Pucahirca (6.020 m).

Para llegar hasta las dos lagunas superpuestas, primero hay que descender a lo largo del cañon del Pato, luego rodear la cordillera Blanca por el norte hasta la ciudad de Pomabamba, y finalmente subir a caballo las praderas llenas de altramuces en flor.

«Nuestro objetivo era explorar la laguna y medir su temperatura. [...] También quería completar la cartografía del lugar por fotogrametría terrestre y medir los desplazamientos de balizas».

El resultado fue el siguiente:

«[...] la velocidad de ablación en la lengua es 40% más fuerte durante la estación húmeda que durante la estación seca, lo que una simple helada nocturna no logra explicar. La lluvia debe facilitar la transferencia del calor atmosférico al hielo».

Durante el año siguiente se realizan sondeos sísmicos y eléctricos y extracciones de muestras, para comprobar la composición y solidez de la morrena. De todas formas, la laguna constituye un peligro evidente, y lo más urgente es vaciarla. Se excava un túnel horizontal

en la morrena justo en la superficie de la laguna, para impedir que suba el nivel. La extracción por sifón se realizará con bombas accionadas por electricidad producida in situ, haciendo pasar el agua caída por una turbina.

Louis Lliboutry regresa a Perú en 1969 para estudiar —por cuenta de la CPS— la posibilidad de una instalación hidroeléctrica en todo el norte de la cordillera Blanca, en particular alrededor del nevado Santa Cruz (6.259 m).

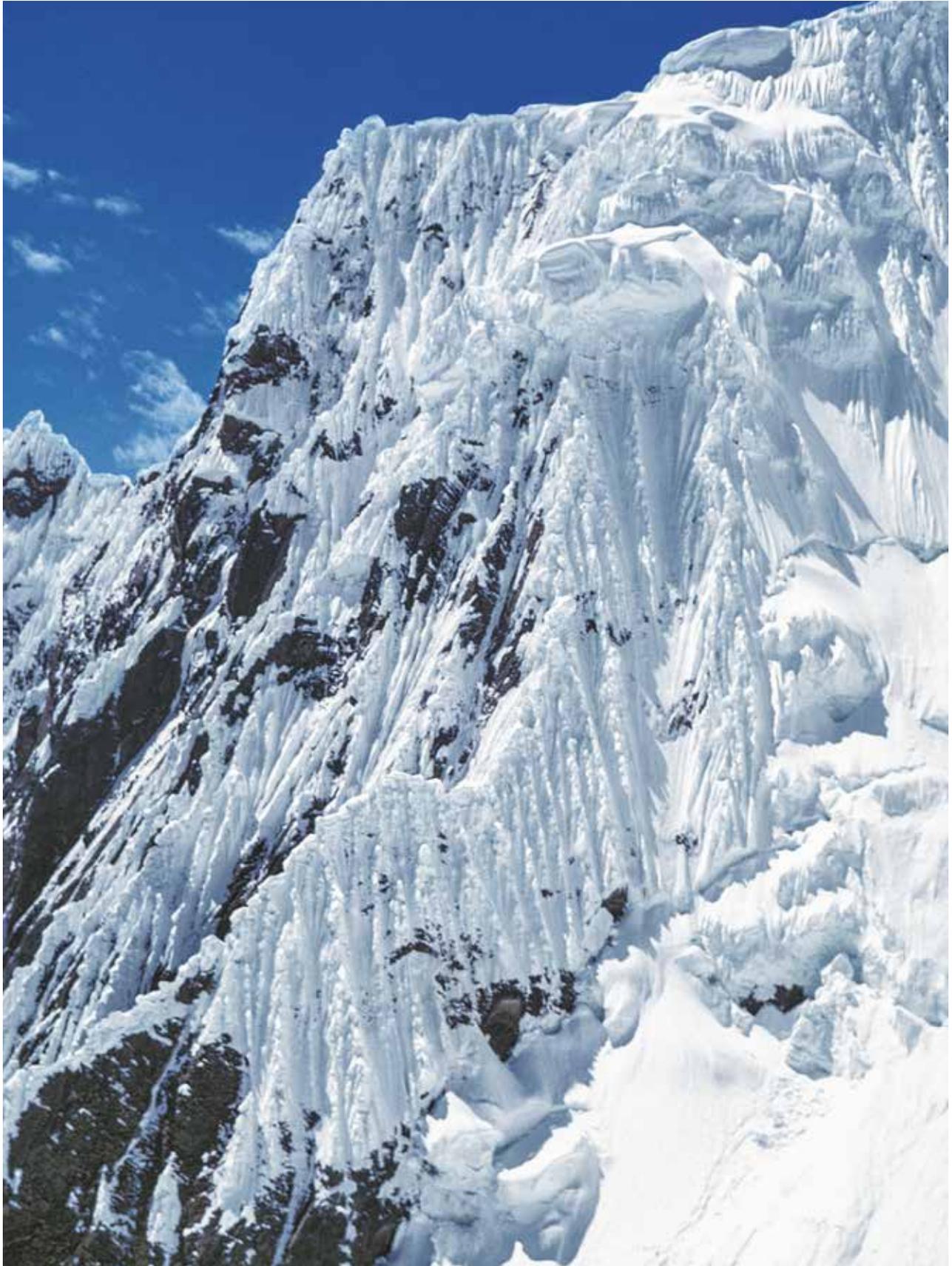
«La CPS había podido obtener la ayuda de un Alouette III de la Fuerza Aérea. [...] Su piloto, el teniente Federico Cáceres, con un aspecto de donjuán, resultó ser un notable piloto de montaña. Con Benjamín Morales nos hizo sobrevolar la cordillera Blanca. Fueron vuelos inolvidables, en particular sobre el nevado Huandoy».

En 1970, cuando todas estas obras estaban a punto de concluirse, un violento sismo arrasó toda la región, provocando numerosas víctimas hasta en el callejón de Huaylas. Se registraron 80.000 muertos; entre ellos, los 18.000 habitantes de la ciudad de Yungay, que quedaron

El lago Rahucocha y el glaciar nevado del Santa Cruz.

Escarcha de hielo del nevado Pucahirca (6.046 m), región de Huaylas, departamento de Áncash, en la cordillera Blanca.







sepultados bajo los escombros durante el terremoto y luego cubiertos por un alud de hielo y rocas. Louis Lliboutry, enviado por la UNESCO para estudiar el fenómeno, sigue a bordo de un helicóptero el curso del río Santa, y luego sobrevuela la avalancha hasta 5.000 m de altitud.

«Aterrizamos en la inmensa capa de lodo seco en superficie, donde se encontraba Yungay diez días antes, una ciudad donde yo había comprado un sombrero de paja en un mercado repleto y coloreado, y donde un indio que todas las mañanas traía hielo de un glaciar en su burro, envuelto en paja para protegerlo del sol, me había ofrecido un poco de hielo molido con jarabe de fruta [...] El lugar ya no era más que un desierto ocre».

A pesar del devastador terremoto, la laguna Parón no sale de su cuenca. En cuanto a la laguna Safuna, se vaciará naturalmente sin provocar ningún aluvión.

En las actas del coloquio de Moscú, *Nieve y Hielo*, de agosto de 1971, se encuentra un informe muy detallado acerca de la catástrofe de Yungay, redactado por Louis Lliboutry, y presentado en el resumen siguiente:

«El sismo del 31 de mayo de 1970 en Perú provocó gigantescos derrumbes en el Huascarán. Se desprendieron partes de murallas y de torres rocosas, arrastrando fragmentos del glaciar somital. Los escombros lijaron las nevizas de los glaciares inferiores, atravesaron la lengua glaciar sin que se desprendiera ningún fragmento, y provocaron una erosión intensa de las pendientes inferiores. Un cono de avalancha de 5 hm³ bloqueó el valle de Llanganuco, a 3.850 m. Otra avalancha de aproximadamente 40 hm³, similar a la que se produjo en 1962 en Ranrahirca, pero tres veces más fuerte y cuatro o cinco veces más rápida, se abalanzó sobre el cono de Ranrahirca y cubrió la ciudad de Yungay. Si bien el aspecto final fue una lava de lodo (la tierra caliente derritió el hielo y la neviza), corresponde clasificar este fenómeno entre las avalanchas y los derrumbes excepcionales, con una fricción interna inusualmente baja».

A finales de agosto de 1970, Louis Lliboutry se encuentra de nuevo en Lima. El gobierno peruano había

◀ El sismo más mortífero de la historia de América Latina tuvo lugar el domingo 31 de mayo de 1970, a las 15: 23 horas en la cordillera Blanca de Perú. «Llegamos en helicóptero sobre la inmensa capa de lodo seco, en el mismo lugar donde se encontraba la ciudad de Yungay. Solo tres palmeras de la plaza central emergían de este inmenso sudario».

pedido a la UNESCO que instalara una comisión encargada de proponer nuevos lugares para la reconstrucción de las ciudades, que estuvieran a salvo de las avalanchas y de los aluviones. El gobierno de Alvarado decretó una reforma agraria de inspiración socialista, parecida a la de Chile, y la ley establece la creación de comunidades agrícolas, de tradición india. Uno de sus nuevos campos de aplicación será el callejón de Huaylas, donde vive la familia de Benjamín Morales, puesto que luego del terremoto las tierras quedaron sin dueños y los deslindes desaparecieron. La población vive bajo carpas, confiando en dirigentes espontáneos con los cuales la comisión gubernamental de «reconstrucción y rehabilitación de la zona afectada» decidió tratar.

En realidad, la comisión se limitará a apoyar las propuestas de Benjamín, quien conoce el callejón como la palma de su mano.

En un texto titulado *Chronique des missions du Laboratoire de Glaciologie, 1970*, Michel Vallon, quien acompaña a Lliboutry en esta aventura, da una visión general de la organización del trabajo en terreno: «Cinco horas a caballo para tres horas de trabajo. Morales queda satisfecho. En lo personal, me duelen mucho más las nalgas que la cabeza».

En agosto, el profesor Jean Tricart, durante una gira de conferencias en América Latina, recoge fotografías aéreas del callejón y, de regreso a Francia, las presenta a sus estudiantes del Centro de Geografía Aplicada para ser analizadas. El informe será enviado al gobierno peruano a fines de 1970.

«La conclusión es alarmante: todo el callejón de Huaylas está expuesto a deslizamientos de tierra, y debería ser enteramente evacuado. Lo que causa una gran inquietud en el gobierno peruano. El informe es clasificado como “top secret” y confiado a la Escuela superior militar para ser examinado. Luego me lo enviaron para que yo hiciera comentarios al respecto.

[...] Aunque me fue difícil cuestionar a unos compatriotas, no me quedaba más alternativa: había que demoler ese informe, lo que no era complicado. Los autores ignoraban todo de los orígenes de los aluviones y de las avalanchas del Huascarán. [...] Los errores de fotointerpretación eran numerosos, debido a que no se había realizado ningún control en el terreno, y que los documentos existentes no habían sido consultados. Todo era muy superfluo, era un abuso de confianza de unos charlatanes».

Nuevas campañas glaciológicas



Saint-Sorlin, el glaciar más estudiado de los Alpes por el laboratorio de Lliboutry. Serge Martin, frente a su carpa Makalu. Agosto de 1969.

Entre 1960 y 1983, el laboratorio estudia el Mar de Hielo, el glaciar de Argentières y el glaciar de Bossons en el macizo del mont Blanc, el glaciar de Gébroulaz y los glaciares de la Chiaupe y del Cul-du-Nant en la Vanoise, el glaciar de Saint-Sorlin en las Grandes Rousses, el glaciar Blanc, el glaciar de Arsine, el glaciar del Mont-de-Lans y el glaciar Noir en el macizo de los Ecrins.

El glaciar de Saint-Sorlin ha sido el más frecuentado por los investigadores del laboratorio, en particular para elaborar herramientas de perforación y extracción de testigos y estudiar en detalle la dinámica de un glaciar alpino.

«Además de sus dimensiones reducidas y de la ausencia de zonas agrietadas, yo pensaba al principio que su zona de ablación era una capa de hielo cuyo espesor

era bastante uniforme, fácil de modelar. En realidad no es así, y su superficie casi plana oculta un lecho muy irregular, que abarca un valle rectilíneo que baja desde el paso de Los Quirlies y se prolonga más abajo del glaciar, en el valle que alberga los lagos de Bramant. [...] Curiosamente, si bien uno de estos dos valles, subglacial y descubierto, es la prolongación del otro, no se conectan entre sí. Trescientos metros antes de emerger del glaciar, el valle subglacial gira repentinamente en ángulo recto al oriente, hacia el valle del Rieu Blanc».

En 1967 se realiza la primera misión compleja en el glaciar de Saint-Sorlin. Se transporta el material de perforación con dos Weasel por una pista abierta con bulldozer. La campaña anterior permitió a François

Gillet implementar diversas técnicas que había inventado, como la sonda liviana de vapor calentado con propano, capaz de perforar 10 m de hielo en media hora, mientras que el modelo «Kasser» (nombre de su inventor) utilizado anteriormente requería varias horas de esfuerzos. Ello permite instalar amplias redes de balizas de ablación para evaluar el balance de masa glaciar y medir las velocidades de flujo.

Durante ese verano, el glaciar es perforado cerca del frente hasta el lecho rocoso, con el taladro de perforación del SIPRE, manejado por la sonda Minuteman de Craelius. Un sensor de presión es instalado en el fondo y Serge Gluck establece perfiles gravimétricos. En la noche del 9 de agosto, una tormenta hace volar el derrick y la plataforma de perforación; éstos serán encontrados a la mañana siguiente a 30 m del agujero.

En 1968, el ingeniero topógrafo Charles Carle estará encargado de toda la topografía de las balizas. En agosto, la segunda misión compleja reúne a entre 9 y 16 personas durante 23 días (302 hombres-día). «Durante esos 23 días hubo 6 días de lluvia, 2 días de nieve y 1 día de tormenta», relata Lliboutry en su informe. «El campamento fue instalado justo abajo del lago Tournant. Bajo la responsabilidad de Gillet se realizan tres perforaciones simultáneamente: una con un sacatestigos mecánico, otra con una sonda de agua caliente y la tercera con un sacatestigos eléctrico. Elaborado por Daniel Donnou y François Gillet, este nuevo sistema que derrite el hielo con una resistencia eléctrica en forma de corona permite sacar testigos de 2 m de largo movilizándolo para el trabajo a sólo dos personas. Y sobre todo, el sacatestigos eléctrico presenta la ventaja de ser suspendido por un cable eléctrico fácilmente manejable con un cabrestante, mientras que el sacatestigos mecánico requiere levantar la broca de perforación luego de cada carrera (desenroscándola) para poder extraer los testigos. Así ganamos un tiempo muy valioso, lo que es esencial para perforar a gran profundidad. Daniel Dupuy, en una cueva tallada en el hielo, mide el contenido de agua líquida en los testigos por absorción dieléctrica».

Desgraciadamente, en el último día, dos rayos sucesivos dañaron los aparatos de medición que acababan de

ser colocados en el fondo de los agujeros perforados: «Habíamos olvidado que un cable vertical de 60 m en el hielo constituye un pararrayos. El rayo no alcanzó las balizas metálicas, pero golpeó y pulverizó una baliza de madera situada cerca. Gillet y Dupuy escaparon por milagro».

Estas herramientas serán recuperadas y reemplazadas en 1969 durante la tercera misión, la más grande jamás emprendida en un glaciar francés. Ésta cuenta con 421 hombres-día, 10 toneladas de material transportadas en 22 viajes en Weasel. Un albergue de 6 m de largo que puede alojar a 9 personas en 3 niveles, ha sido instalado al borde del glaciar. La perforación eléctrica para extraer testigos en todo el glaciar (72 m) demorará 22 días, tomando en cuenta los eventuales desperfectos. Después de un primer ensayo del sacatestigos eléctrico, realizado el año anterior hasta el bed-rock a 67 m de profundidad, se efectúa una nueva perforación eléctrica hasta el lecho rocoso a 72 m (el material será luego transformado para ser utilizado en la Antártica hasta 500 m de profundidad). Paralelamente se realiza una perforación mecánica, pero producto de una falsa maniobra, el sacatestigos y 12 m de barras caen al fondo del orificio de 60 m.

«Tratamos de recuperarlos con una barra de extracción equipada con una campana de rescate, pero tras una falsa maniobra, estas barras y la campana cayeron. Hubo que ampliar el orificio con agua caliente y Daniel Donnou, con su traje de buceo, se dejó caer en el orificio hasta casi 20 m y recuperó todo el material. Los testigos extraídos fueron examinados poco a poco por Dupuy (en una cueva, ya que la cabina refrigerada que habían traído no pudo funcionar), y luego llevados a Grenoble para realizar un estudio petrográfico. Una perforación mecánica de 15 m fue realizada en zona de acumulación, provocando atrapamientos inexplicables (¿causados por algunas grietas en el glaciar?) En uno de los casos, a 13 m, hubo que calentar el hielo durante 3 días con la sonda de vapor para librerar el sacatestigos atrapado».

En 1970, una perforación con agua caliente permitió recuperar y recalibrar el manómetro subglacial instalado en 1967.

«Así, el equipo de perforadores iba adquiriendo experiencia poco a poco con el pasar de los años, con incidentes y reveses, fracasos y éxitos». Las mediciones que realizaron llevaron a la conclusión de que la presión del agua subglacial es muy variable según el lugar, contradiciendo la hipótesis inicial. Pero la era de las misiones complejas en los glaciares de los Alpes es rápidamente superada por las amplias áreas de investigación desarrolladas en Terre-Adélie y en las Kerguelen. Los hombres de Lliboutry y de Lorius sueñan con nuevos horizontes.

Nueva estadía en Chile para la UNESCO

En noviembre de 1971, Louis Lliboutry es enviado a Santiago de Chile por la UNESCO para dar un curso de hidrología de nieves y hielos, destinado a ingenieros hidrólogos de los países andinos, en colaboración con el austríaco Walter Ambach y el noruego Gunnar Østrem. Los cursos se desarrollan normalmente, a pesar de la gran efervescencia que se vive en la ciudad y de los enfrentamientos entre los estudiantes partidarios de Allende y los estudiantes opositores.

Louis envía la siguiente carta a Claude, su esposa, el 19 de noviembre de 1971:

«Tal como yo lo había previsto, e incluso peor de lo que había previsto, no me dejan ni un minuto libre: una clase de una hora en la mañana, que debo redactar enteramente, trabajos prácticos de cuatro horas generalmente, en la tarde. El resto del tiempo, me muero de sueño.

En cuanto al tema material, todo ha sido muy bien organizado por el Conicyt (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica) y la gente de la UNESCO, en colaboración con la Corfo (Corporación de Fomento de la Producción) y Endesa (Empresa Nacional de Electricidad). En la universidad, más exactamente en la Escuela de Ingeniería, se ven muchos progresos desde 1966. Nuestros cursos no han sido perturbados por los disturbios que hubo en la noche, mientras no estábamos, y en la casa central de la Alameda (la sede de la universidad, ubicada cerca del Palacio Presidencial La Moneda), donde se produjeron enfrentamientos entre comandos de extrema izquierda y estudiantes, que en su mayoría apoyan al rector demócratacristiano. A nosotros, profesores y estudiantes (4 peruanos, entre los cuales está B. Morales, 1 boliviano, 1 argentino, y uno de Valparaíso y los otros 9

de Santiago) nos alojan en el hotel El Conquistador, que está muy bien situado: podemos comer en el excelente restaurante vasco que se encuentra al lado, el Pinpilinpausha, o en el restaurante chileno-italiano Il Bosco, en la Alameda, que también está muy cerca, sólo por 35 a 55 escudos.

[...] Toda la Alameda está patas arriba, con una enorme zanja debido a la construcción del metro, y la edificación de un inmenso centro de convenciones. Hoy en la noche estoy invitado a cenar donde Marangunic. Óscar González sigue estando muy dedicado a su trabajo. Visitamos el nuevo local del Instituto Antártico Chileno, una magnífica casona con un jardín y una piscina, comprada por nada a un chileno adinerado que huyó del país, en la calle Luis Thayer Ojeda (¡Tantos recuerdos!).

Querida Claude, pienso mucho en ti, sobre todo en la noche, con todas las parejas que veo en las calles [...]. Y disfrutando de este tiempo hermoso, inalterable, con este calor de 26-30°, las acacias en flor frente a la Escuela de Ingeniería y los geranios en flor que vi ayer en Nuñoa, pienso en todos ustedes, allá, en ese triste inicio del invierno.

Espero que los niños se porten bien. Aquí las jóvenes que van al liceo han acertado su uniforme azul marino, y éste se convirtió en minifalda. Se ven algunos *hot pants*, pero ninguna maxifalda (sí se ven en Lima, lo que se explica quizás por el clima). Muchas barbas y pelo largo, pero bien cortado y bien cuidado, no hirsuto: el diario *El Mercurio* se burla de Fidel Castro [...].

Te dejo, ya que debo preparar mis clases. Un fuerte abrazo para ti y los niños. Tu "papito" que te adora».

Al final de una clase, el joven rector de la nueva Universidad de Antofagasta (en la costa del desierto de Atacama) se acerca a Lliboutry para solicitar su opinión sobre varios informes publicados acerca de la posibilidad de abastecer de agua potable a su ciudad transportando icebergs desde la Antártica. Juntos discuten largamente sobre todas las dificultades que no habían sido abordadas por los autores de los primeros artículos serios sobre el tema (Weeks y Campbell). Remolcar icebergs presentaría enormes problemas; además, supongamos que el hielo llega a su destino: habría que almacenarlo, derretirlo, filtrarlo... Por lo que se abandona el proyecto.

Glaciar Juncal Norte, en la Región de Valparaíso. 1954. ▶



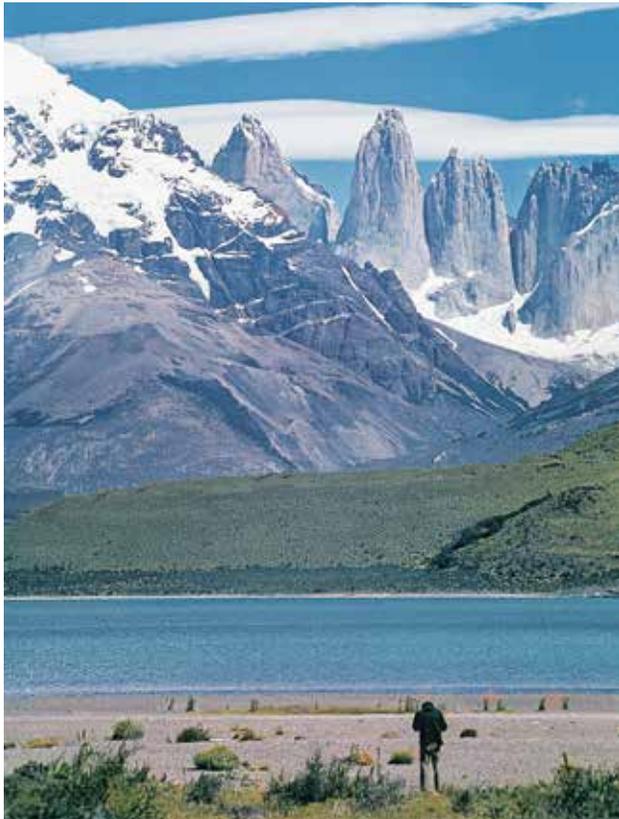
Pero la historia no termina aquí: en 1976 se crea la compañía «Iceberg Transportation International», cuyo principal accionista es el Príncipe Mohammed al Fayçal, ministro de Agua e Irrigación de Arabia Saudita. Este proyecto tampoco llegará a buen término.

Sin embargo, el ingeniero francés Georges Mougin, cercano a Paul-Émile Victor, ha trabajado sobre el tema desde esa fecha, y no pierde la esperanza de reactivar el proyecto de explotación de los icebergs.

Durante la década posterior a los acontecimientos de 1968, Louis trabaja intensamente, buscando quizás recuperar los diez años que cree haber perdido en cuanto a una carrera normal de investigador.

Estudia la dinámica de los glaciares, elabora programas de medición, se reúne con jóvenes investigadores en terreno, analizando los resultados obtenidos y redactando artículos.

Dirige el Laboratorio de Glaciología, con un personal administrativo que considera muy insuficiente. Su principal trabajo consiste en pedir financiamiento tanto para el funcionamiento como para el equipamiento



Las Torres del Paine y la laguna Amarga. Torre central, 2.850 m, en la Patagonia chilena. 1956.

del laboratorio. Luego el financiamiento otorgado debe ser distribuido entre los cinco grupos que lo integran.

Organiza el programa de enseñanza de la geofísica en la universidad y debe garantizar oportunidades laborales a los estudiantes. Y por supuesto también es docente, «única actividad que justifica un sueldo para el Estado».

Además, trata de obtener la construcción de nuevos locales que le permitirían acoger a profesores asistentes e investigadores extranjeros.

En cuanto a la tectónica de placas

Louis Lliboutry escribe en su autobiografía: «A partir de mis notas y de mi correspondencia, quiero evocar por un lado mis recuerdos de profesor universitario y de explorador, y por otro lado contar cómo se desarrolló en Francia en la misma época la ciencia de los glaciares y de la tectónica de placas».

La glaciología sigue siendo una actividad marginal para los investigadores de otras disciplinas. Empezará a ser considerada como una ciencia seria sólo cuando Louis Lliboutry se interese por la tectónica de placas. «Fue esta actividad paralela la que consolidó mi reputación entre los geofísicos franceses. Como me ocupaba de glaciología, tenía que ser también una ciencia de vanguardia y estimable».

En la década de 1960, algunos investigadores acumularon pacientemente pruebas, hoy consideradas como irrefutables, que evidencian la deriva de los continentes a lo largo de la historia geológica.

«Los sismólogos habían descubierto bajo la litósfera de los océanos y gran parte de los continentes una capa donde la velocidad de las ondas sísmicas, que deja de crecer con la profundidad, era un poco más baja que en los estratos superiores e inferiores: la LVZ (Low Velocity Zone). Ellos estimaban que la temperatura se aproximaba al punto de fusión de la roca. Para mí, como estaba acostumbrado a los glaciares templados y sabiendo que Vallon había encontrado ahí una velocidad de ondas sísmicas inferior a aquella que había sido medida en los glaciares levemente más fríos, no había ninguna duda: la LVZ alcanzaba realmente el punto de fusión en todo su espesor y esta capa contenía inclusiones de magma».



Macizo de las Torres del Paine. Vista del lago Pehóe en la hacienda Torres del Paine. 1956.

Lliboutry escribirá más tarde: «Yo había seguido todos esos hallazgos con mucho interés». En mayo de 1969, Lliboutry envía a la revista *Journal of Geophysical Research* un artículo que genera gran impacto en Estados Unidos. Expone el tema en París, en un coloquio organizado en noviembre de 1970 por Claude Allègre y Maurice Mattauer, luego en Londres en febrero de 1971 y en Moscú en agosto del mismo año.

«Entraba de lleno entonces en el pequeño círculo de los investigadores europeos que estudiaban la tectónica de placas. Un club muy cerrado».

Entre 1969 y 1974, Louis Lliboutry participa en el desarrollo de esta nueva teoría que va a revolucionar las ciencias de la Tierra, y contribuye (con Le Pichon, Mattauer, Nicolas y Allègre) a que sea aceptada por los geólogos franceses. «Es así que, en 1975, había convencido

a todos mis colegas de la Universidad de Grenoble de que era necesario acoger a un equipo muy bueno de jóvenes sismólogos parisinos, para implementar una carrera de geofísica interna en provincia».

Sin embargo, en 1974, Lliboutry decide abandonar sus investigaciones sobre la tectónica de placas. No puede seguir trabajando solamente a nivel teórico. Tendría que reciclarse para seguir realizando estudios en terreno. Por otro lado, le parece más importante lograr que la teoría de la tectónica de placas sea aceptada por los geólogos franceses, que tratar de rivalizar con los tenores de la disciplina. Hacer la síntesis entre la tectónica de placas y la geología estructural es un tema de investigación que le conviene más. «Entre 1972 y 1975, dicté un curso que tenía como tema central la tectónica de placas, pero titulado diplomáticamente Estudio geofísico de las megaestructuras».

Expediciones a la Antártica



Belleza escénica del continente antártico.

Luego de llegar a Grenoble, Claude Lorius viaja a Moscú y a Leningrado para entablar contactos con glaciólogos soviéticos, y luego se reúne con el equipo australiano de Bill Budd y con los norteamericanos, los únicos que pueden realizar transportes aéreos hacia y en la Antártica.

«Lorius fue a Washington, donde se reunió con nuestro viejo amigo de Groenlandia, Dick Cameron, que dirigía entonces los programas antárticos de la NSF (National Science Foundation). La coyuntura internacional se había vuelto más favorable para conseguir una sólida participación de Estados Unidos en un proyecto que incluía a la URSS. Así nació el Proyecto Internacional de Glaciología Antártica (IAGP), basado en un compromiso inicial de los investigadores, y luego aceptado por las instancias superiores. No provenía de la decisión de alguna autoridad superior, de un ministro o de un diplomático. Y funcionó mucho mejor».

Se organiza un gran raid en Terre-Adélie, durante el verano austral 1971-1972, con el soporte aéreo de Estados Unidos.

Esta estrecha franja de la Antártica que cubre una superficie de cerca de 432.000 km² ha sido reivindi-

cada por Francia como uno de los cinco distritos que componen las Tierras Australes y Antárticas Francesas —aunque esta reivindicación no sea universalmente reconocida—, y alberga la base científica francesa Dumont d'Urville, construida por las Expediciones polares francesas de Paul-Émile Victor, bajo la dirección de André Franck Liotard.

Lorius y dos técnicos del Laboratorio de Glaciología participan en la expedición, cuyo objetivo es realizar la extracción de una serie de muestras de nieve y testigos en baja profundidad, entre la base Dumont d'Urville y Vostok.

En 1971, la Comisión de Ciencia y Tecnología del Consejo Europeo implementa un programa europeo de investigaciones en la Antártica. Se crea un grupo internacional de expertos en el cual Lorius participa desde el principio. Louis Lliboutry es invitado a la tercera reunión, en noviembre de 1972. El grupo está integrado por dos belgas, un experto alemán en geodesia, el director del Instituto Polar Noruego, un profesor de la Universidad de Berna, dos meteorólogos —un italiano y un austriaco—, un inglés y tres franceses, entre quienes se encuentra Lorius.

El proyecto resulta rápidamente poco viable, ya que es difícil de financiar. A lo largo de los años y de las reuniones preparativas, éste terminará por limitarse en 1975 a una invitación del Instituto Polar Noruego para realizar un «estudio piloto» en las islas Spitzberg. Entre tanto, Francia y Alemania se han retirado. Louis Lliboutry está decidido a promover, en cambio, las misiones del IAGP.

Después de un primer test del sacatestigos eléctrico a 44 m en Terre Adélie, en 1972, se realiza una extracción de testigos hasta el lecho rocoso a 304 m en Terre Adélie. Luego, durante el verano austral 1974-1975, Lorius y Gillet parten al Domo C, situado entre Dumont d'Urville y Vostok, donde el espesor del hielo es cercano a 3.200 m. El objetivo de esta misión de reconocimiento es evaluar el interés y la factibilidad de realizar extracciones de testigos



El Laboratorio de Glaciología de Grenoble, creado por Lliboutry en 1958, permitió el desarrollo de las investigaciones francesas en la Antártica y el descubrimiento del calentamiento global por el equipo de Claude Lorius.

a gran profundidad y analizarlos en relación con hielos más antiguos.

Una extracción hasta 905 m será realizada durante el verano austral 1977-1978. Luego pasarán entre cinco

y quince años de tanteo antes de que los resultados sean analizados e interpretados correctamente. Lorius tardará cerca de veinte años en demostrar la validez de sus intuiciones que dieron origen a la climatología moderna.

El Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente

El jefe del laboratorio no puede ausentarse por un lapso muy prolongado, pues tiene que dedicar parte de su tiempo a solucionar problemas técnicos y conflictos al interior del equipo, buscar financiamiento para poder realizar las operaciones previstas y las obras de renovación de los locales, etc.

En un informe del comité directivo del 7 de enero de 1977, Louis Lliboutry insiste en la necesidad de desarrollar en Francia una geofísica del medio ambiente, con estudios en terreno y trabajos en laboratorio para analizar las muestras y medir los parámetros indispensables para el aspecto teórico:

«La glaciología (única disciplina perteneciente a la geofísica que se puede desarrollar en la década de 1960 en Grenoble) representa una encrucijada «estratégica», puesto que está relacionada con la meteorología, la oceanología, la paleoclimatología, la reología de los materiales sólidos, la geodesia y la exploración geofísica.

1- Tratándose de una ciencia en gestación, la primera dificultad era la ausencia de carrera y de textos académicos. Finalmente, la carrera sería creada en Grenoble (en el caso de que la acreditación solicitada fuera otorgada en 1978). Las clases ya empezaron y los textos salen en fotocopias:

a) Magíster en Geofísica, [...] DESS (Diploma de estudios superiores especializados) en Glaciología [...], DEA (Diploma de estudios avanzados) en Geofísica avanzada, opción Geofísica del Medio Ambiente.

En 1977-1978 el DEA acoge a 8 estudiantes franceses, además de estudiantes extranjeros.

2- La segunda dificultad era formar un buen equipo de investigadores y técnicos. Los técnicos se sentían atraídos por un trabajo personalizado y la alternancia entre laboratorio o taller-misiones en terreno, lo que permitió contratar a unos excelentes profesionales. [...].

En la década de 1970, en una época en que las ofertas de trabajo de parte del CNRS eran importantes, los buenos estudiantes no mostraban interés por nuestro laboratorio, pobremente equipado y que se dedicaba a desarrollar una disciplina desconocida. Hoy ya no es el caso; sin

embargo, las contrataciones son prácticamente nulas. Es así que en comparación con 18 técnicos (entre los cuales hay 16 del CNRS) y 5½ ingenieros (entre los cuales 4½ del CNRS), el laboratorio sólo cuenta con 7 investigadores del CNRS; los otros son docentes investigadores.

3- La tercera dificultad fue conseguir el equipamiento. En un principio, la glaciología estaba muy poco desarrollada y nuestros requerimientos fueron durante mucho tiempo modestos, aparte de unas cámaras frías y de un taller de mecánica. [...].

4- La cuarta dificultad está relacionada con los locales. La DGRST se opone al término de la construcción de nuestro edificio, donde todavía no tenemos oficinas ni laboratorio de física. La situación se ha vuelto dramática para los equipos que trabajan en el Campus, ya que tenemos que instalar estructuras prefabricadas provisionales a partir del invierno. En cuanto al personal alojado por la universidad en las dependencias de la calle Très-Cloîtres, corre riesgo, puesto que este antiguo inmueble está a punto de derrumbarse».

En 1978, Lliboutry pide cambiar el nombre del laboratorio a Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente (LGGE). Al principio el presidente del comité y el director científico del CNRS rechazan la solicitud, ya que para ellos el estudio del medio ambiente no constituye más que una «moda pasajera». Pero la adopción de este nombre resulta tan natural, que no representa finalmente ningún problema. Desde 1975, Louis Lliboutry habla de «geofísicos del medio ambiente» en vez de «geofísicos de superficie»: entendió que con la etiqueta de «glaciólogos», sus investigadores no podían encontrar ninguna oportunidad laboral.

En 1979 redacta un «programa pedagógico» en el ámbito de la geofísica, y agrega una lista de dependencias indispensables que deben ser construidas, representando por lo menos 2.500 m² y 200 m² sin calefacción.

La construcción del Laboratorio de Glaciología en el campus universitario de Saint-Martin-d'Hères no fue fácilmente aceptada por el CNRS. En respuesta a la comisión nacional de supervisión de las operaciones



Regreso al refugio Vallot, después de una jornada de sondeo en el Col du Dôme. Al fondo, la Aguja del Bionnassey, en los Alpes franceses. Junio de 1973.

inmobiliarias públicas, que había rechazado la construcción de un edificio de 1.100 m² en un terreno de 1.200 m², Lliboutry tiene una buena reacción: ¡afirma que el laboratorio requiere de una pista de aterrizaje para helicópteros! ¡Esta «falsa» información deja atónita a la comisión de supervisión!

El campus universitario de Saint-Martin-d'Hères

Los ocupantes de la calle Très-Cloîtres se trasladan finalmente a nuevas dependencias en abril de 1982, en el campus universitario: «Tras veinte años de lucha, la glaciología por fin tenía casa propia».

«El Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente que yo había logrado obtener del CNRS veinte años atrás, por fin inauguraba el edificio que había solicitado desde el principio. Los discursos oficiales fueron seguidos por un cóctel. El prefecto, entre dos copas, me reveló lo que pensaba:

—“En el fondo, esta investigación científica cuesta muy caro y no sirve para nada”.

Yo le contesté: «Eso es lo que se dice en los países subdesarrollados».

Louis Lliboutry lo sabe mejor que nadie. Poco después de haber obtenido un doctorado en ciencias físicas, en 1950, fue profesor durante seis años en la Universidad de Chile, en Santiago, en el marco de la cooperación. Más tarde le pidieron crear la carrera de Ciencias Geofísicas en la Universidad de Ingeniería de Lima y en la Escuela Politécnica de Salvador de Bahía. Buscando relacionar la docencia con una eventual actividad de investigación local, se ha enfrentado siempre al mismo obstáculo: era imposible pensar en hacer investigación sin aplicación inmediata: prevención sísmica en Perú y en Chile, fechado de los testigos de hielo extraídos por los petroleros en Brasil.

«En mi país, De Gaulle había aumentado mucho el presupuesto destinado a la investigación, por la grandeza de Francia, para que pudiera volver a ser el faro científico que había sido antes de la masacre de sus futuras élites durante la Primera Guerra Mundial. (Mi laboratorio había sido creado gracias a ese aumento.) En cuanto a su sucesor, Pompidou, si bien se preocupó por desarrollar



Toma de muestras de nieve entre el mont Blanc y el mont Blanc de Courmayeur.

las exportaciones de nuestra industria, no le gustaban mucho los investigadores desde mayo de 1968 y él compartía la opinión del prefecto. Redujo drásticamente el presupuesto para la investigación. Con Giscard d'Estaing, este presupuesto se estancó. Luego los economistas y los políticos tomaron conciencia de la importancia de la investigación, la cuál también debía ser estrictamente planificada. Mi laboratorio había tenido que esperar para conseguir dependencias adecuadas, a pesar de los logros que había obtenido a nivel internacional, debido a que la iniciativa de la investigación venía de la base de los propios investigadores, y no de la cima, de los gerentes nacionales de investigación o de los inspectores de finanzas».

En aquella época, los altos funcionarios de la investigación no podían admitir que se introdujera una nueva disciplina fuera de París. En Chile, Louis Lliboutry había adherido a la Unión Geofísica Americana y a la Sociedad Británica de Glaciología. El enorme auge de las ciencias geofísicas en Estados Unidos contrastaba con su estancamiento en Francia, donde sólo tres académicos habían aportado innovaciones a nivel universitario: Cagniard, con su método de prospección; Émile Thellier, quien había elaborado las leyes de la imantación de la arcilla cocida, e Yves Rocard, quien había desarrollado el estudio de la ionósfera.

«Para Lliboutry, desarrollar la geofísica en Grenoble significaba enfrentarse al veto parisino. Sin embargo, no podíamos oponernos a que se estudiaran también los glaciares alpinos en París. Además, la etiqueta de “glaciólogo alpino” no ofrecía ninguna oportunidad laboral a mis estudiantes. Personalmente no hubiera invadido terrenos privados.

En realidad, esta rama científica no era únicamente un buen nicho de investigación. Para avanzar, debía recurrir a varias asignaturas importantes que no se enseñaban mucho en La Sorbona en esa época: estadística y tratamiento de señales, topografía, mecánica de medios continuos sólidos, meteorología, estudio de las transferencias de energía aire-suelo, hidrología, etc. Por lo tanto tuve que reciclarme, de forma autodidacta (como lo había hecho después de la guerra en física, y luego en análisis numérico), para poder enseñar estas materias a los alumnos. Si alguien me preguntara si mi nivel de estudios es “bac+2” o “bac+5” podría contestar que mi nivel es “bac+58”».

Desde la ley de deformación del hielo establecida por Nye en 1952, y desde el coloquio de Chamonix en 1958



«La introducción de modelos físicos ha provocado una profunda revolución en las ciencias de la Tierra. Es la tesis que defendió con mucho ímpetu Louis Lliboutry, con consecuencias más sociológicas que epistemológicas». Revista *La Recherche*. Febrero de 1985.

que marcó el inicio de las teorías modernas sobre el flujo de los glaciares, los avances han sido notables. La glaciología ha experimentado desarrollos tecnológicos cruciales, como el uso de la informática en 1971 para la primera modelización numérica del casquete antártico, el análisis de los testigos de hielo por espectrografía de absorción atómica, la cartografía del hielo en el mar a partir de satélites, en particular con ayuda del radar de síntesis de apertura (en 1982) y el fechado de los testigos de hielo polar con un acelerador de partículas acoplado a un espectrógrafo de masas. Sin olvidar la instalación de equipos de perforación y extracción de testigos que permitieron en 1968 realizar la primera extracción de muestras a gran profundidad hasta el zócalo rocoso de la estación: ¡-2.164 m!

No obstante, a partir de 1981, la investigación científica comenzó a cambiar. Lliboutry no puede evitar sentir una leve discrepancia con algunos de sus colegas, y al mismo tiempo un poco de nostalgia por la época de sus inicios.

«Cuando preparaba mi tesis, bajo la dirección de Louis Néel (quien publicaba en la época los artículos teóricos que, mucho más tarde, le valieron el Premio Nobel), era una investigación artesanal, con un costo insignificante. Diez años más tarde, para continuar esas investigaciones, se requería de un difractor de neutrones muy costoso. Néel pudo conseguirlo únicamente porque había logrado obtener la creación en Grenoble de un centro de investigaciones del Comisariado de Energía Atómica. Hoy las investigaciones son realizadas por equipos que reúnen a decenas o centenares de

trabajadores científicos, con presupuestos que se expresan en millones e incluso billones».

«A lo largo de los años, los desarrollos técnicos, las mediciones de laboratorio y los cálculos han prevalecido sobre las misiones en terreno, que también eran verdaderas hazañas deportivas», escribe Lliboutry en el preámbulo de su autobiografía. Cuando se ve obligado a dejar su puesto de director, siente inevitablemente una gran amargura.

«Frente a animadores y responsables de equipos que ya no tenían que presentar ideas de investigación originales, sino que tenían que ser excelentes diplomáticos y negociadores, yo no podía seguir siendo director de laboratorio. Y tenía un sucesor competente que poseía esas cualidades: Claude Lorius. [...] En realidad Lorius se había convertido poco a poco en el verdadero jefe del laboratorio, puesto que era él quien obtenía los grandes contratos públicos de investigación necesarios para los estudios antárticos. [...] Si yo me había anclado hasta entonces en el puesto de director —a pesar de las tareas pesadas y de las preocupaciones que ello implicaba— era para mantener una actividad importante en dinámica de los glaciares y mecánica del hielo. [...] Era previsible que a mediano plazo el rendimiento científico de la glaciología iba a disminuir, pero para preservar un valioso *savoir-faire* y para seguir formando jóvenes investigadores en el ámbito de las mediciones geofísicas en terreno difícil, teníamos que continuar nuestros estudios sobre los glaciares».

Lorius escribirá en *Mémoires sauvées des Glaces*:

«Lliboutry era sin lugar a dudas el iniciador de la glaciología en Francia. Era un hombre imponente, con una personalidad fuerte y atípica, marcada por su acento catalán. Era un teórico de alto nivel, cuyas clases mostraban a veces demasiada sabiduría y desconcertaban a sus alumnos, pero también era un hombre de terreno».

Los últimos años de colaboración entre ambos serán marcados por la discordia y algunos enfrentamientos, pero el aprecio que sentían el uno por el otro siempre superaba cualquier conflicto.

«Como director del único laboratorio de glaciología en Francia, estaba perfectamente al corriente de los trabajos que estábamos realizando, entre otros sobre el uso de los isótopos para reconstituir el clima del pasado, un tema que lo apasionaba» (Lorius, 2016).

François Gillet rinde homenaje a la política científica desarrollada por Lliboutry, en particular en el ámbito

de la perforación y extracción de testigos de hielo que condiciona en gran parte todas las investigaciones realizadas en el laboratorio:

«El estudio de los glaciares alpinos requiere recurrir a varios procesos de perforación adaptados a los estudios realizados, a la profundidad que debe ser alcanzada, a la zona donde se encuentra el glaciar y a las restricciones logísticas. En el caso de estos glaciares y, más aún, de los casquetes polares, debemos realizar extracciones para recuperar a gran profundidad las muestras de hielo que serán analizadas.

No obstante, el material y los equipos utilizados en la tierra no pueden ser usados en el hielo debido a sus propiedades particulares, y la expertise de las compañías especializadas en esta área es inadecuada.

Luego de algunas experiencias desafortunadas, Louis Lliboutry decidió desarrollar en el laboratorio materiales adaptados a las necesidades específicas de los glaciólogos. Para ello supo convencer al CNRS para que otorgara al laboratorio los medios técnicos indispensables, y a pesar de las dificultades y a veces de los fracasos, supo dar a esta política el apoyo y la continuidad que requería. Es lo que permitió al laboratorio adquirir poco a poco una notoriedad reconocida a nivel internacional, en particular en el tema de las extracciones de testigos de hielo en la Antártica. Así, cuando el equipo de Claude Lorius llegó a Grenoble, ya tenía a su disposición los testigos de hielo indispensables para sus análisis, y es uno de los elementos que le permitieron posicionarse rápidamente a nivel internacional».

La extracción de testigos efectuada en 1980 en el glaciar de Argentière, en todo su espesor, es la última gran operación realizada a iniciativa de Louis Lliboutry. También será la última relacionada con la dinámica de los glaciares alpinos. Posteriormente, las grandes operaciones han estado ligadas más bien a la contaminación atmosférica o a la paleoclimatología.

Finalmente, Louis Lliboutry es destituido de su cargo de director en 1983, en virtud de una regla introducida ese mismo año, según la cual ningún director de laboratorio podía permanecer en el puesto más de doce años. La primera decisión del nuevo director, Claude Lorius, es formar equipos autónomos, de tamaños muy diferentes, reservándose la supervisión del equipo más grande, encargado de explotar las muestras de hielo extraídas. Los resultados obtenidos con las muestras de Vostok le «abren el grifo de las subvenciones



El refugio Vallot, ubicado a 4.362 m, en la ruta normal hacia el mont Blanc. Fue contruido en 1890 por el astrónomo y geógrafo Joseph Vallot y renovado en 1938 y 2006. En 1975, el CNRS decidió confiar los estudios científicos del refugio al Laboratorio de Glaciología de Lliboutry.

de investigación». A lo cual se agrega el hecho de que las variaciones climáticas y la contaminación del planeta ya alcanzan en todo el mundo el primer lugar de las preocupaciones de la ciudadanía y de los investigadores científicos. La paleoclimatología ha tomado el relevo de la glaciología propiamente dicha.

«Como si fuera para marcar simbólicamente el fin de una época de esfuerzos obstinados relacionados con los glaciares alpinos, durante la noche de navidad de 1983, el refugio de los Cósmicos ardió como una antorcha, con un viento violento que impedía que cualquier helicóptero pudiera intervenir. El fuego fue tan intenso que las bobinas de cobre de la antigua cámara de Wilson de Leprince-Ringuet se derritieron, convirtiéndose en lingote».

En la noche del 6 al 7 de enero de 1989, el antiguo palacio episcopal que había albergado durante tanto

tiempo su laboratorio de glaciología es afectado por un incendio que lo destruye casi completamente.

La universidad de «papá» había quedado incinerada, como cuando en los viejos tiempos un soltero que «sentaba cabeza» y se casaba quemaba las cartas de sus antiguas amantes. Esta incineración simbolizaba la ruptura, consumida desde mucho tiempo, con una investigación espontánea, carente de recursos y marginalizada. [...] La «bomba de finanzas» del Estado regaba a una cohorte de trabajadores científicos menos folclórica que antes, pero igual de entusiasta. La naturaleza de lo desconocido ha cambiado, y se presenta ahora únicamente para los expertos que han asimilado un denso estrato de conocimientos, pero su exploración sigue siendo apasionante y da sentido a la vida.

Epílogo

Louis Lliboutry finalmente se jubila en 1990. En 1992, la Sociedad Internacional de Glaciología (*International Glaciological Society*), cuya sede se encuentra en Cambridge (Reino Unido), le otorga el premio Seligman Crystal, en reconocimiento a su notable contribución a la glaciología, en particular en el ámbito del deslizamiento de los glaciares. En respuesta a las felicitaciones del presidente de la IGS, Lliboutry comienza su discurso con la siguiente pregunta: «¿Cómo un hombre de origen mediterráneo, a quien no le gusta el té, ni el whisky, ni la Coca-Cola, ni los *hot-dogs*, y que prefiere el café, el vino, el aceite de oliva, el ajo..., puede obtener esta prestigiosa distinción?».

En 2000, su libro *Géophysique et Géologie*, publicado en Francia en enero de 1998, es traducido al inglés en Estados Unidos y editado bajo el título *Quantitative Geophysics and Geology*. En 2002 «no se da por vencido», como lo muestra la carta que dirige a Serge David, fundador del Laboratorio de Química Orgánica multifuncional de Orsay, y a su mujer Georgette:

«Lo que me preocupa desde hace dos años es la hidráulica subglacial. Desde hace veinte años se han registrado enormes progresos al respecto en términos de observaciones y mediciones; sin embargo, nos hemos quedado en los modelos simplistas y en las falsas teorías de 1970. Todo lo que he escrito en aquella época sobre el tema y que me valió, estando en actividad, los honores y la consideración de mis pares, ya no vale nada. Tengo que corregirlo y dejar como legado una teoría sólida. ¿Pero acaso los editores aceptarán publicar un artículo largo y «pesado», escrito por un hombre jubilado, de 80 años, y sin mucho interés para la mayoría de los suscriptores del *Journal of Glaciology*? Y debo luchar con un sistema de ecuaciones diferenciales y ecuaciones en derivadas parciales acopladas, muy complejas y retorcidas, teniendo a mi disposición sólo una calculadora de bolsillo para realizar los cálculos respectivos, en vez de contar con un ingeniero informático y un material de última generación, como antes».

En 1979, Louis Lliboutry había descartado presentarse como candidato a la dirección del Instituto Nacional de Astronomía y Geofísica (*Institut national*

d'astronomie et de géophysique-INAG), como también algunos años antes había rechazado la idea de proponer su candidatura al Collège de France. Más tarde llegó a interrogarse sobre las motivaciones profundas por las cuales se había negado a dejar su ciudad, Grenoble.

«Quizás me equivoqué al no querer ir a París y así darme a conocer a través de los medios de comunicación, que construyen hoy en día la reputación de los científicos».

Sin embargo, recordando cuarenta años de esfuerzos para desarrollar la ciencia de los glaciares, concluye sus notas autobiográficas retomando por su cuenta el siguiente comentario de Edouard Herriot en la inauguración de la presa de Génissiat:

«Para detener el curso de un río, insistimos durante mucho tiempo en colocar bloques y rocas en su lecho. Muchos son arrastrados por la corriente; otros permanecen, se aglutinan y se amontonan en el fondo. Poco a poco se logra domar el río. Finalmente, un bloque termina por emerger de las aguas, y se le coloca una banderita encima. Acepto ser uno de los grandes bloques sumergidos, y dejo a otros la tarea de ir a plantar la banderita».

Los amigos de Louis frecuentan asiduamente la Villa de Corenc. Lliboutry escribe a su amigo Jean Honoré Luce: «La vida sigue siendo bella (mientras te estoy escribiendo veo caer la nieve en el jardín, es fabuloso)».

«[...] Estoy consciente de la brecha que separa a ingenieros civiles e investigadores universitarios. [...] Estos altos dirigentes de la investigación creen que el progreso vendrá de los programas computacionales más sofisticados; en realidad, vendría más bien de una mejora de los modelos físicos iniciales.

Es por ello que trabajo desde hace dos años en mejorar los modelos físicos ligados al flujo de los glaciares, en particular de aquellos cuya base se encuentra en el punto de fusión y que no descansan sobre una capa de sedimentos omnipresente, perfectamente plana. Se trata ante todo de un problema de hidráulica subglacial. ¡Después de haber aprendido a los 35 años la micrometeorología a propósito de los penitentes, y luego a los 50 años la estadística moderna a propósito de



Louis Lliboutry, durante su viaje en Chile, en 1971.

la aparición cada año de las balizas instaladas en el glaciar de Saint-Sorlin, termino aprendiendo la hidráulica a los 80 años! [...] Los tres largos artículos que pretendo enviar al Journal of Glaciology presentan mi teoría en su totalidad, pero en realidad sólo exploran las posibilidades que ésta implica».

Louis Lliboutry se interesaba desde mucho tiempo por el aspecto filosófico de las actividades humanas. Buscaba saber lo que decían al respecto los filósofos de las ciencias y los sociólogos del conocimiento científico.

Pero lo que le apasionaba era la especificidad, la grandeza y la necesidad de la investigación pura.

«No podemos predecir el futuro a largo plazo de la investigación pura a partir del futuro de la investi-

gación técnica y aplicada, puesto que ésta también es imprevisible. Ambas podrían desaparecer en un país técnicamente avanzado, víctimas de avatares políticos. Sin embargo, podemos ser optimistas, ya que la investigación pura proviene de una necesidad congénita de la especie humana, de la exploración y comprensión del mundo exterior. Por supuesto hay que rechazar el cientismo naif que prevalecía hace un siglo. La ciencia no es la antorcha que ilumina la vía del progreso, la que sería en este caso única y trazada de antemano. Podemos más bien comparar la investigación pura con un fuego fatuo espontáneo e imprevisible, persistente a pesar de todo y contra cualquier interés mercantil, cualquier ideología oscurantista, mientras existan seres humanos».

Los glaciares y los campos de hielo representan cerca del diez por ciento de la superficie terrestre. En América del Sur, a lo largo de la cordillera de los Andes, la superficie cubierta por glaciares alcanza aproximadamente a 30 mil km², de los cuales el 78 por ciento se encuentra en territorio chileno.

Sin tener aún un conocimiento cabal del comportamiento de los glaciares a nivel mundial, hay que reconocer que gracias a las investigaciones que el profesor Lliboutry inició en nuestro país por allá por la década de 1950, hoy existe mucha más información y un consenso en el mundo científico acerca de la importancia que tienen estas grandes masas de hielo, por las funciones que desempeñan como reguladores climáticos y como grandes reservorios de agua dulce del planeta.

Cabe destacar que, además del legado científico y el aporte directo al desarrollo de la glaciología moderna realizada por este investigador francés, está el hecho de haber dejado una huella para que otros científicos se motiven por el estudio de esta rama de la geografía física que tanta relevancia ha adquirido en el último tiempo.

El cómo enfrentar el cambio climático representa uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, puesto que este fenómeno está provocando una importante reducción de los glaciares en todas las regiones del mundo, estimándose que aquellos de menor tamaño desaparecerán completamente en las próximas décadas, con las consecuencias que ello conlleva.

Por lo anterior, cada vez se hace más necesario el cuidado de nuestros ecosistemas de montaña, y, siendo la ciencia una de las vías más importantes de acceso al conocimiento, son los científicos los llamados a responder a este desafío de carácter mundial. Y si bien es la ciencia la que establece los modelos que permiten conocer y explicar los distintos fenómenos de la naturaleza, por sí sola no es suficiente si no existen instancias de transferencia del conocimiento.

La comunicación acerca de los avances en investigación más allá del mundo académico permite el desarrollo de mejores políticas públicas, mayor eficiencia en los procesos productivos de las empresas y, algo que cada día adquiere mayor relevancia, una participación ciudadana informada en los procesos que afectan su calidad de vida. Por esta razón, este libro, que en su primera parte describe la contribución realizada por este visionario sabio francés —quien hace más de medio siglo impulsaba el estudio de glaciares, destacando la necesidad de su cuidado y preservación—, en su segunda parte ha querido incorporar la contribución de científicos, empresas, académicos e investigadores, que, siguiendo las huellas dejadas por Louis Lliboutry, presentan parte de sus resultados, puntos de vista y experiencias.

Carlos Berroeta

Jefe de Investigación y Relaciones Científicas
Aguas Andinas



Glaciares Picarte y Juncal Sur. Misiones de la DGA dirigidas por Gino Casassa.

En las huellas de Lliboutry Los glaciares, íconos del cambio climático

Dos décadas de pérdida glaciaria en los Andes

Inés Dussaillant / candidata a PhD Universidad de Toulouse. Afiliada al Laboratorio de Oceanografía y Geofísica Espacial (LEGOS, Francia) y al Instituto de Geociencias del Medio Ambiente (IGE, Francia).

Colaboradores: Etienne Berthier, Fanny Brun, Mariano Masiokas, Romain Hugonnet, Vincent Favier, Antoine Rabatel, Pierre Pitte y Lucas Ruiz.

Calculamos de manera íntegra y homogénea el volumen de hielo perdido por los glaciares de la cordillera de los Andes durante los últimos 18 años utilizando imágenes ópticas espaciales, y evaluamos los consecuentes impactos sobre el alza del nivel del mar y los recursos hídricos locales. La base de datos generada es de gran utilidad para validar modelos glaciológicos e hidrológicos que intentan proyectar los cambios futuros de los glaciares y mejorar el manejo de los recursos hídricos andinos.

La cordillera de los Andes, ubicada al oeste del continente sudamericano entre los 10°N y 56°S de latitud, presenta una amplia variedad topográfica y climática en toda su extensión, permitiendo la existencia de una gran cantidad y diversidad de cuerpos de hielo. Con su extensión latitudinal única en el mundo, los Andes constituyen la superficie de hielo más grande del Hemisferio Sur después del continente Antártico, con glaciares distribuidos desde las más altas cumbres sobre los 6.000 msnm hasta el nivel del mar.

Los glaciares de montaña de la cordillera de los Andes se han adelgazado de forma acelerada durante los últimos años, ubicándose entre los mayores contribuidores de agua dulce al alza del nivel del mar en todo el mundo. Muchos de estos glaciares representan recursos hídricos locales, siendo estos particularmente importantes en las regiones tropicales y los Andes Áridos, donde el derretimiento del hielo actúa como reserva de agua para períodos de sequía. En muchos casos estos glaciares también constituyen atracciones turísticas importantes para las economías regionales.

Cuantificar exhaustivamente la pérdida de volumen de hielo de los glaciares andinos es crucial para limitar futuros impactos económicos, ecológicos y sociales en los países ubicados en el cordón andino. Sin embargo, las escasas, incompletas y cortas observaciones disponibles a lo largo de los Andes no han permitido aún cuantificar de manera íntegra y homogénea la magnitud total de la pérdida de estos glaciares durante un período suficientemente prolongado.

La motivación de este trabajo consiste en calcular la pérdida de volumen de hielo de los Andes en toda su

extensión durante el período 2000-2018 usando series de tiempo de Modelos de Elevación de Terreno Digital (DEM) producidos a partir de imágenes satelitales estereoscópicas del sensor ASTER (a bordo del Satélite TERRA, Nasa). El método ASTERIX (ASTER monitoring Ice toward eXtinction) utilizado ha sido ampliamente validado anteriormente sobre glaciares de Alaska, Himalaya, los Alpes y algunas regiones específicas de los Andes.



Una pequeña laguna lateral se forma gracias a los deshielos de verano en el glaciar Torre, uno de los glaciares periféricos del Campo de Hielo Sur. La majestuosa silueta del cerro Torre hace de éste uno de los paisajes más espectaculares de la Patagonia.



El glaciar Nef es uno de los glaciares afluentes del Campo de Hielo Norte. La fotografía muestra un pequeño frente lateral; sin embargo, la lengua frontal termina más abajo en un lago pro-glacial formado por el reciente retroceso del glaciar.

Este método ha sido empleado anteriormente en un estudio similar para calcular la pérdida de masa reciente de la integridad de los glaciares del Himalaya en Asia.

La Figura 1 muestra la distribución espacial del adelgazamiento de los glaciares andinos durante el período 2000-2018 y dos subperíodos 2000-2009 y 2009-2018. Estos resultados corresponden a una pérdida de masa total de $20.0 \pm 4.0 \text{ Gt yr}^{-1}$ (-0.63 ± 0.15 metros de agua equivalente por año, m w.e. yr^{-1}) durante el período 2000-2018, lo que corresponde a una alza del nivel del mar de $0.06 \pm 0.02 \text{ mm yr}^{-1}$ o un acumulado de 1 mm en 18 años. Este valor corresponde a cerca del 10% de la contribución global de los glaciares de montaña calculada para el período 2002-2016. Las mayores pérdidas se observan en la región de los Andes Patagónicos, con una tasa de balance de masa de $-0.68 \pm 0.17 \text{ m w.e. yr}^{-1}$, promediada según superficie para las regiones de

Patagonia Norte, Patagonia Sur y Tierra del Fuego durante el período 2000-2018.

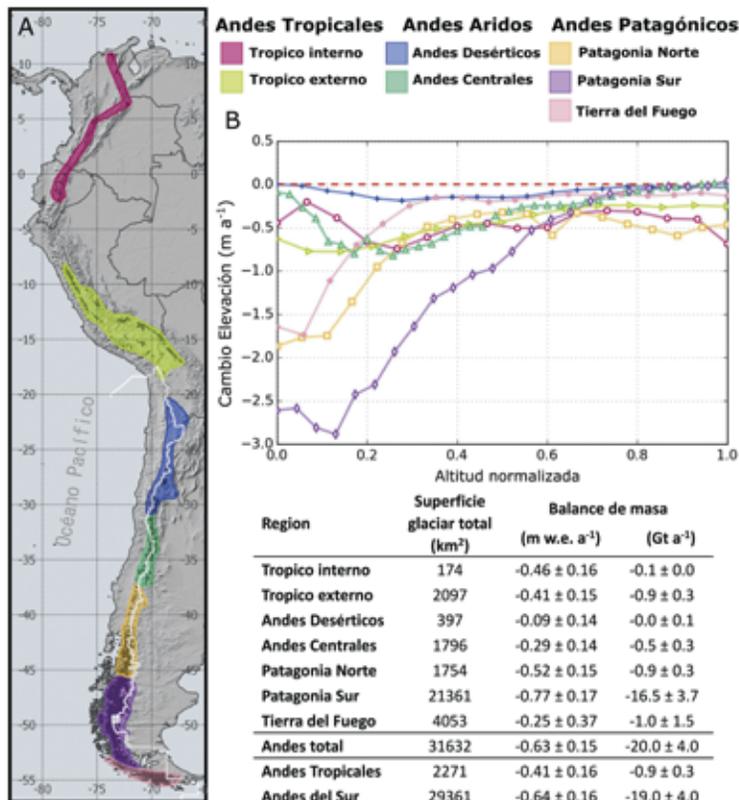
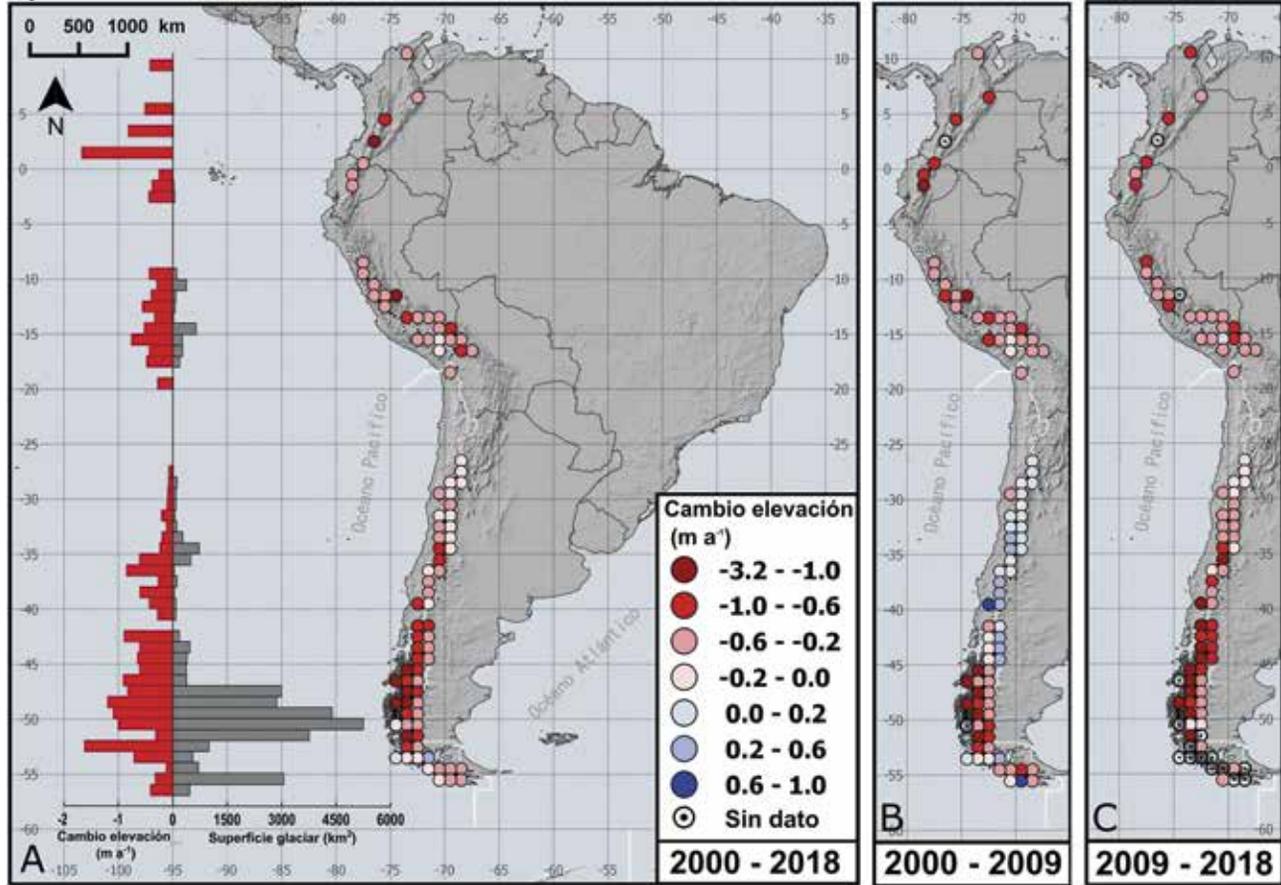
Los Andes Tropicales le siguen con una tasa de balance de masa significativa de $-0.41 \pm 0.16 \text{ m w.e. yr}^{-1}$ promediada para las regiones del Trópico Externo e Interno.

Notablemente, una región intermedia entre los 26° y 37°S muestra pérdidas relativamente moderadas durante el mismo período, con una tasa de balance de masa de $-0.25 \pm 0.14 \text{ m w.e. yr}^{-1}$ promediada para las regiones de los Andes Desérticos y Centrales.

El análisis por subperíodo (2000-2009 vs 2009-2018) revela pérdidas decadales estables tanto en los Trópicos como en Patagonia.

Contrariamente, los glaciares de los Andes Áridos se mantuvieron relativamente estables durante la primera década del siglo XXI, variando a condiciones

Figura 1



▲ 1. Tasa de cambio de elevación de los glaciares Andinos (adelgazamiento en rojo y engrosamiento en azul). (A) Tasa de cambio de elevación promediado por celda de 1° latitud x 1° longitud para el período de enero 2000 a abril 2018. Los histogramas muestran la superficie de hielo (gris) y la tasa de cambio de elevación (rojo) en función de la latitud. (B) Tasa de cambio de elevación para el período de enero 2000 a marzo 2009. (C) Tasa de cambio de elevación para el período de enero 2009 a abril 2018. Las celdas 'sin datos' corresponden a aquellas donde la cobertura de datos de cambio de elevación es escasa (menos del 19%). Estos casos corresponden principalmente a celdas ubicadas en Patagonia Sur y Tierra del Fuego, cerca de la costa Pacífica, donde la cobertura de nubes es persistente. Notar que la escala de color presenta intervalos irregulares. Esto fue escogido para facilitar la visualización.

◀ 2. Delimitación de subregiones Andinas. (A) Siete subregiones Andinas definidas de acuerdo a latitud y características climáticas. (B) Tasa de cambio de elevación por subregión Andina para el período 2000-2018 en función de la elevación normalizada definida como $(h-h_1) = (h_{99}-h_1)$, donde h es la elevación y h_1 y h_{99} son las elevaciones del 1^{er} y 99^{avo} percentil del área cubierta de hielo, respectivamente. La tabla muestra el balance de masa subregional y regional para el período 2000-2018.



Abriéndose camino por la salvaje meseta del Campo de Hielo Sur. El gran plateau superior es una gran ventaja para el desplazamiento, facilitando el transporte del equipo necesario durante las largas misiones exploratorias.

de fuerte pérdida y desequilibrio a partir de 2010. Este comportamiento es una respuesta a una situación climática regional de sequía sostenida, un fenómeno sin precedentes históricos en cuanto a su duración, también conocido como la Mega Sequía. En esta región, la pérdida de masa glaciaria sostenida durante los últimos años ha ayudado parcialmente a contrarrestar los impactos negativos de la sequía.

La ‘contribución del desequilibrio’ de los glaciares, aquella que corresponde a la pérdida de hielo perenne durante un período determinado, se vio aumentada de una década a la siguiente en 4 cuencas hidrográficas analizadas en la región de los Andes Centrales.

Esto demuestra la importante función de los glaciares como mitigadores de los impactos de la sequía sobre los recursos hídricos en esta región altamente vulnerable de los Andes.

La base de datos generada en el presente trabajo es homogénea, mutidecadal y por primera vez resuelta a

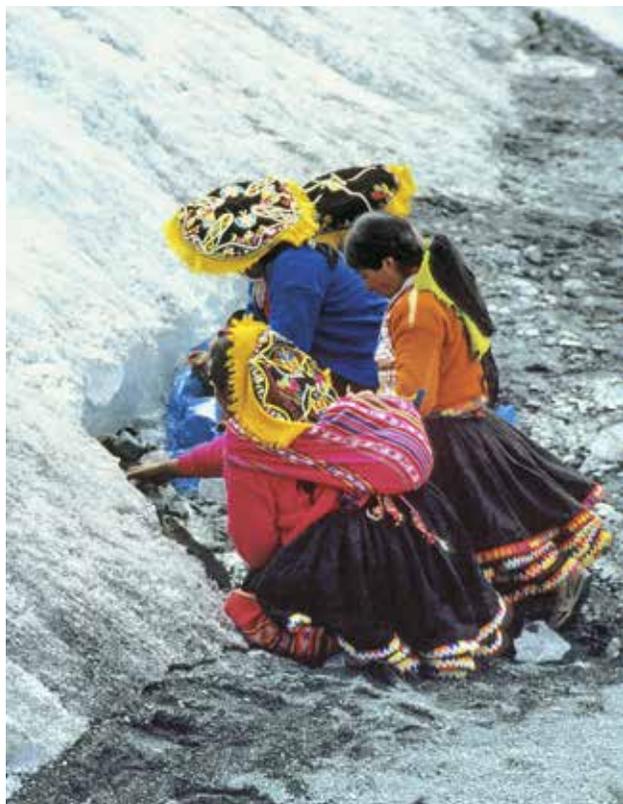
la escala de la cordillera de los Andes. Los resultados obtenidos permiten generar nuevo conocimiento sobre la respuesta reciente de los glaciares andinos frente al cambio climático, resaltando el marcado gradiente latitudinal y la variabilidad interdecadal de las pérdidas de masa glaciaria.



Estos datos son de gran utilidad para la comunidad científica, permitiendo tanto validar los modelos glaciológicos e hidrológicos que intentan proyectar los cambios futuros de los glaciares andinos, como mejorar el manejo de los recursos hídricos regionales.

Nieves y glaciares de los Andes tropicales

Bernard Francou / Director de Investigación Emérito IRD-IGE/UGA, Francia.



Peregrinaje del Qoyllur Rit'i en el glaciar del Qolquepunku (Cuzco, Perú). Ritual cristiano desde el siglo XVII, pero herencia de una larga tradición chamánica andina que considera los nevados como dioses tutelares.

Mientras que el retroceso de los glaciares es muy visible desde hace varias décadas en el paisaje andino, aún no es evidente para todos que esto tenga causas físicas identificables y relacionadas con el clima.

Los nevados, personajes míticos de la cosmovisión andina

La tradición animista, todavía muy presente en las cordilleras antiguamente ocupadas por los incas, sitúa a los «nevados» (el término «glaciar» no es utilizado comúnmente) en el mundo sobrenatural. Lo que asimilamos a «desiertos blancos» son en realidad, para muchos pueblos andinos, lugares ocupados por divinidades ancestrales, Achachillas en Bolivia, Apus en Perú.

Las comunidades siempre han buscado ganarse sus favores a través de rituales, cultos, ofrendas, incluso sacrificios humanos practicados hasta el período incaico. Imploran a estas divinidades para que les concedan agua y condiciones que garanticen una buena cosecha, garante a su vez de su sobrevivencia.

Estas creencias permanecen vivas, como lo demuestran las prácticas chamánicas alrededor de las montañas en sitios a veces muy antiguos, o, en Cuzco, cerca del Ausangate, la fiesta del Qoyllur-Rit'i. Esta gran peregrinación mágico-religiosa se lleva a cabo cada año a mediados de junio al pie del nevado Qolquepunku; allí se congregan decenas de miles de indígenas que rezan y bailan durante tres días, hasta en el mismo glaciar. Personajes de origen misterioso, los Ukucos (los «Osos»), quienes se esconden detrás de pasamontañas, son los encargados de recoger hielo y transportarlo a los valles como una reliquia milagrosa. Cuando le pregunté a uno de ellos en 2004 por qué habían dejado de hacerlo, si había visto que lo hacían aún en 2001, me respondió que veía que el glaciar estaba retrocediendo, por lo tanto que estaba enfermo, y que no sería apropiado agravar su estado.

El origen de los glaciares como objetos científicos en los Andes

«Masa constituida de nieve y de hielo, fluyendo bajo el efecto de su propio peso, desde zonas elevadas donde recibe agua sólida por las nevadas, hacia zonas bajas, donde se pierde por fusión», así podríamos definir un glaciar. Fenómeno natural sensible a los estados sucesivos de la atmósfera, primero por las precipitaciones sólidas que aumentan su masa, y segundo por los flujos de energía intercambiados entre la atmósfera que tienden a hacerla disminuir por fusión y por sublimación¹, un glaciar, como una gigantesca estación meteorológica, registra el clima.

En su parte alta, el proceso de acumulación domina, es la «zona de acumulación», mientras que en su zona baja, las pérdidas se hacen más importantes, es la «zona de ablación». Entre las dos, un «límite donde» se

equilibran los aportes y las pérdidas, la «línea de equilibrio». Por otra parte, el hielo, como cualquier cuerpo viscoso y plástico, fluye hacia abajo por gravedad a una velocidad de algunos centímetros a unos metros por día. Este mecanismo introduce un cierto plazo entre el crecimiento o decrecimiento de masa provocada por el clima, y el avance o retroceso de su término inferior. El glaciar desaparece brutalmente a baja altitud cuando la cantidad de hielo transportada desde arriba se consume totalmente por los efectos de la fusión.

En los Andes, el reconocimiento de los nevados se remonta a 1740, cuando los académicos franceses, La Condamine, Bouguer, Jussieu y sus pares españoles, vienen a medir los tres primeros grados del meridiano bajo el Ecuador. Las altas montañas cubiertas de nieve son para ellos puntos de apoyo de su sistema trigonométrico. Miden su altura, registran el nivel inferior alcanzado por las «nieves perpetuas». Luego, en 1802, Humboldt y Bonpland intentan ascender estas cumbres y estudian cómo las plantas y los animales se adaptan a las limitaciones de la altitud, formando cinturones biogeográficos, pero no se interesan particularmente en los glaciares

como tales. Habrá que esperar la expedición de Hans Meyer a Ecuador, en 1903, para que los glaciares se consideren como objetos científicos; su retroceso ya fue establecido durante las últimas dos décadas del siglo XIX, desde que Edward Whymper, pionero del andinismo, efectuó en 1880 la ascensión a los volcanes nevados más altos de Ecuador y realizó grabados precisos de algunos de sus glaciares². En los años 1930-1940 en Perú, y más tarde en los años 1970-1980 en Bolivia, en Colombia y en Ecuador, aparecen las primeras cartografías precisas de los glaciares que permitirán estudiar sus fluctuaciones y vigilar las lagunas peligrosas abandonadas por su retroceso; esas lagunas constituyen un verdadero peligro cuando, generalmente con sismos violentos, se vacían intempestivamente y provocan miles de víctimas, en particular en la cordillera Blanca del Perú^{3, 4, 5, 6}.

A inicios de la década de 1980, con la intensificación de su retroceso, los glaciares se vuelven indicadores pertinentes del cambio climático y son vigilados con esa intención. Son reconocidos también como reservorios de agua naturales, cuya disminución acelerada puede tener consecuencias en las cuencas hidrológicas, en particular

Llegando a la cima del Antisana (5.750 m) para efectuar una perforación. Al fondo, el Cayambe (5.790 m), y por debajo de la capa de nubes, la cuenca amazónica.



en aquellas donde el recurso hídrico es utilizado para el riego, la generación hidroeléctrica y el abastecimiento de las ciudades. Por iniciativa de equipos de diferentes orígenes, se ponen en marcha varios programas, al igual que del IRD⁷ que construye a partir de 1991, entre Bolivia y Ecuador, un observatorio de glaciares en cooperación con instituciones andinas, con extensiones a Colombia y al norte de Chile. Los métodos utilizados para estudiar los glaciares pertenecen a la geofísica y requieren la implementación de un sistema de observación complejo.

El análisis de las fotografías aéreas, luego de las imágenes tomadas por satélites, permite reconstruir con una buena precisión las fluctuaciones glaciares desde la década de 1950. Para ir más lejos en el tiempo, hay que recurrir a indicadores geomorfológicos como las morrenas, que se pueden datar con diferentes métodos⁸. El período de investigación cubre la Pequeña Edad de Hielo (PEH, siglos XIV-XIX) y el retroceso ocurrido después de 1850. El diagnóstico del «estado de salud» actual de los glaciares se establece a

escala anual, e incluso mensual, a través de mediciones del «balance de masa»⁹. Relacionar el incremento o la pérdida de masa al clima no es tarea fácil, y para hacerlo hay que analizar los procesos de acumulación y de ablación del hielo.

La ablación, que suma los efectos de la fusión y de la sublimación, constituye una variable compleja; exige estaciones meteorológicas completas en donde se miden los flujos de energía intercambiados entre la atmósfera y la superficie del glaciar.

El área y la longitud de un glaciar dependen del escurrimiento del hielo, cuyas características (espesor, velocidad) son los resultados de factores propios de cada glaciar como la pendiente y la rugosidad del sustrato rocoso. El estudio geofísico de los glaciares exige entonces un dispositivo costoso y equipos especializados, razón por la cual se limita a algunos individuos cuidadosamente escogidos por ser representativos de las cordilleras en las que se sitúan. Así, el IRD y sus contrapartes «auscultan» entre Bolivia y Ecuador una docena de glaciares.



Monitoreando con un GPS las velocidades de desplazamiento superficial del glaciar rocoso sur del cerro Caquella en Bolivia. En el fondo, salar de Pastos Grandes.

Retroceso de los glaciares de los Andes tropicales desde la Pequeña Edad de Hielo y su aceleración en las últimas décadas

El último episodio relativamente frío fue la Pequeña Edad de Hielo (PEH), que empezó al final del siglo XIII, y terminó en la segunda parte del siglo XIX. El recalentamiento del siglo XX, que los científicos asocian por consenso a las actividades humanas, ha puesto en evidencia la sensibilidad de nuestro sistema climático a los denominados gases a efecto invernadero adicionales, producto de la combustión de fuentes de energía fósil.

¿Cómo hacer para identificar las fluctuaciones pasadas de los glaciares?

Al retirarse, los glaciares dejan huellas, sedimentos de todo tipo, entre ellos las morrenas dispuestas en forma de cordón, cuya edad permite reconstruir las superficies pasadas y, en algunos casos, el volumen de hielo desaparecido. De Bolivia a Ecuador, los estudios realizados por nuestro equipo en esos depósitos han permitido tener una visión global de la PEH en los Andes tropicales¹⁰. Los glaciares avanzaron una primera vez en los Andes centrales a partir de 1200-1350, después de un período de retiro marcado durante los siglos X-XII, luego alcanzaron un máximo entre 1630 y 1680 en Bolivia y Perú, y un poco más tarde, alrededor de 1730, en los Andes del Norte (Ecuador, Colombia, Venezuela).

Luego, los glaciares emprendieron un retroceso paulatino en la segunda mitad del siglo XVIII, interrumpido por avances menores. Las pérdidas de superficie entre el máximo de los siglos XVII-XVIII y la primera mitad del siglo XX suman alrededor de 30%. Los avances extremos de la PEH ocurren gracias a temperaturas por lo menos 1°C más bajas que las de la segunda mitad del siglo XX, y a precipitaciones 20 a 30% más elevadas.

El descenso de las precipitaciones es el que inicia la desglaciación posterior al máximo de la PEH, mientras que la elevación de la temperatura toma el relevo a partir de la segunda mitad del siglo XIX. Es razonable pensar, tanto en los trópicos como en otros lugares, que el máximo de la PEH pudo ser provocado en parte por una disminución notable de la actividad solar: el «mínimo de Maunder», entre 1650 y 1715, fue descubierto gracias a la observación de las manchas solares por el telescopio recién inventado.

El deshielo ocurrido desde los años 1950, y sobre todo desde 1975-1980, es conocido con precisión gracias a las fotografías y las imágenes. Se sabe gracias a los estudios hechos en Ecuador (volcanes Cotopaxi, Antisana, Chimborazo), en Bolivia (Cordillera Real) y en Perú (Cordillera Blanca) que los glaciares han sido relativamente estables entre el inicio de los años 1950 y 1976-1980, pero un retroceso muy pronunciado aparece desde entonces¹¹.

Este retroceso muestra alternativamente períodos de aceleración, como al inicio de los años 1980, durante la década de 1987-1998 y entre 2001 y 2007, y períodos de pérdidas menores, como en los años 1984-1986, 1999-2000 o 2008-2010. En la mayoría de los glaciares, la magnitud del retroceso de los años 1976-2006 no tiene equivalente desde el máximo de la PEH: se calcula que las superficies y los volúmenes de los glaciares de la zona han sido amputados en un 40%-50% en 30 años, llegando hasta un 100% (desaparición total) en algunos casos, como el glaciar de Chacaltaya en Bolivia.

En espesor, se estima que los glaciares pierden desde 1976 un promedio de 4 m a 14 m de equivalente-agua por década, lo que condena a la larga a los glaciares que tienen escasas zonas de acumulación por encima de 5.100-5.300 m a una desaparición ineluctable¹².

Relacionar el retroceso de los glaciares a la evolución del clima: ¿una decadencia irreversible o una simple recesión pasajera?

Es impresionante constatar, en una amplia región que se extiende por más de 20° de latitud, entre el centro de Colombia y el norte de Bolivia, y que abarca climas diversos, con estación seca marcada (Bolivia, Perú), y sin estación seca (Ecuador, Colombia), la gran homogeneidad de la evolución de los balances glaciares a escala plurianual: los años positivos o negativos (es decir, los años donde la masa de los glaciares aumenta o disminuye) son sincrónicos de un lugar al otro. Se deduce que los glaciares de la región registran la misma variabilidad climática.

Su origen debe buscarse en el Pacífico tropical, y más específicamente en las anomalías de temperatura superficial de su parte central (El Niño Southern Oscillation). Nuestros estudios han notado que en los años en que se presenta El Niño (Pacífico central cálido), los glaciares se derriten mucho, mientras que en los años de La Niña (Pacífico central frío), la fusión disminuye^{13, 14}.

Ha quedado claramente demostrado que la atmósfera andina es más cálida (de 1°C a 3°C) en períodos El Niño en todas las regiones, más seca en ciertos sectores (sur de Colombia, sur de Perú y norte de Bolivia), y que la combinación de ambos factores aumenta la fusión y su magnitud hasta los 5.400 m. Como los eventos El Niño han aumentado en frecuencia y intensidad entre 1976 y 1998, es natural que se les atribuya una parte importante de la aceleración del retroceso de los glaciares que tuvo lugar durante este período.

No se puede sin embargo relacionar la evolución de los glaciares y los cambios ocurridos en el clima sin interrogarse sobre la física de los procesos de ablación, que se conoce mejor actualmente por los estudios realizados por nuestro equipo en Bolivia en el glaciar Zongo (16°S) y en Ecuador en el glaciar 15 del Antisana (0°28S). Gracias a la baja latitud y a la alta altitud, en este ambiente de alta montaña tropical llega en dirección de la superficie del glaciar una gran cantidad de energía de origen radiactivo, pero la temperatura del aire no alcanza un nivel suficiente para alimentar una fusión eficiente.

En efecto, la baja densidad del aire (la columna atmosférica alcanza a 5.000 m, la mitad de la presión que tiene a nivel del mar) limita el calentamiento del aire y la transmisión del calor a la superficie del hielo. Para que esta energía sirva para derretir el hielo, tiene que ser absorbida por la superficie del glaciar, y para eso el glaciar tiene que ser de un color distinto del blanco de la nieve recién caída, que refleja 80% de la luz del sol. Cuando la nieve es sucia o cuando el hielo aparece en la superficie, el glaciar, en cambio, absorbe hasta 60-70% de la radiación solar y destina por gran parte esta energía a la fusión del hielo.

En el contexto de recalentamiento actual, observamos que las situaciones durante las cuales los glaciares no aparecen cubiertos de nieves blancas y reflejantes a menos de 5.400-5.200 m son siempre más frecuentes. Esto viene de la subida de la temperatura atmosférica que aumenta la probabilidad que se produzcan precipitaciones líquidas o a temperatura de fusión (0°C), cuando antes las precipitaciones eran generalmente sólidas y «frías».

En ciertas regiones, además, las precipitaciones tienden a disminuir (tendencia crónica a la sequía), lo que contribuye al mismo resultado. Las tasas de fusión son máximas cuando los glaciares, poco protegidos por capas de nieves reflejantes, reciben la máxima cantidad de aportes radiactivos: son los meses del equinoccio al Ecuador, o los meses del verano austral en dirección del

tropical en Perú y Bolivia. Se ve entonces que, en esos ambientes tropicales de altura, el rol de la temperatura en la fusión de los glaciares es complejo. Los glaciares se derriten con más intensidad, no tanto por el calentamiento directo de la atmósfera, sino más bien porque el calentamiento favorece un cambio en la fase de las precipitaciones, reduciendo la posibilidad de que se mantenga a nivel del suelo una cobertura de nieve a baja altitud.

Se ha observado que la subida de la temperatura aumenta la carga de vapor de agua en la atmósfera, la cual tiende a aumentar la fusión al detrimento de la sublimación, la primera siendo mucho más eficiente que la segunda para hacer desaparecer el hielo¹⁵. En zonas de glaciares ubicadas a baja altitud, zonas marítimas como los Hielos de Patagonia y de Tierra del Fuego, donde los glaciares alcanzan el nivel del mar, la fusión se relaciona más con la temperatura atmosférica, así como también, en el caso de los ventisqueros que desembocan al mar, a la temperatura del océano.

Existen pocos datos de temperatura y de precipitación formando series largas y continuas durante las últimas décadas a más de 4.000 m de altitud. Por extrapolación de medidas de estaciones situadas a baja altitud, se estima que la temperatura ha aumentado en 50 años de 0,6 a 0,7°C en los Andes centrales¹⁶. Hay mayor incertidumbre en cuanto a la precipitación, en las que es difícil identificar una tendencia clara a nivel de la región. Existen entonces muchas razones para pensar que la elevación de la temperatura atmosférica es la que origina la disminución de los glaciares de los Andes tropicales.

Los estudios realizados con la ayuda de modelos muestran en efecto que los glaciares tropicales son muy sensibles a la temperatura: en Bolivia, en el glaciar Zongo, se estima que por 1°C de aumento en la temperatura, la línea de equilibrio sube en altitud 150/200 m¹⁷. Conforme a estos modelos, con líneas de equilibrio medidas actualmente entre 5.100 m y 5.300 m, bastaría entonces un aumento del orden de 3°C para provocar la desaparición casi completa de los glaciares de esa región de los Andes, ya que existen pocas superficies glaciares que sobrepasan los 5.800 m.

Según las previsiones de los modelos climáticos hechas para los Andes centrales por varios equipos de climatólogos, el aumento de la temperatura podría alcanzar o hasta superar los 3°C si los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero siguen la tendencia actual. En ese caso, la presencia de los glaciares andinos



Glaciar de Zongo, en la vertiente sur del Huayna Potosí (6.090 m), cordillera Real de Bolivia. Este glaciar es probablemente lo más estudiado en el trópico, con una serie de datos de balance de masa, de balance hidrológico y de balance de energía desde 1991 a 1996.

se volvería residual, reducida en el mejor de los casos a las cumbres más altas. Es difícil fijar razonablemente una fecha para tal eventualidad, ya que subsisten demasiadas incógnitas, tanto del lado de los modelos climáticos como del lado de los modelos que simulan la respuesta de los glaciares a las variables del clima.

Consecuencia sobre el recurso agua

Los glaciares son conocidos por ser reservorios de agua. En las regiones andinas sometidas a fuertes contrastes estacionales en las precipitaciones (Perú, Bolivia), éstos regulan el régimen hidrológico, derritiéndose y liberando agua antes de que llegue la estación lluviosa. En los años secos (por ejemplo, los años El Niño en el altiplano boliviano) atenúan el déficit, derritiéndose más todavía. Pero se necesita una concentración importante de glaciares para que su impacto en los sistemas hidrográficos sea notable, lo cual ocurre dentro y a la salida de las cordilleras más nevadas, como la Cordillera Blanca o la Cordillera Real, o algunos casquetes glaciares aislados al sur de Perú y del Ecuador. En estas cuencas,

la liberación del hielo ha producido en las últimas décadas un aumento sustancial de los caudales, el mismo que es temporal, y se invertirá cuando las reservas de hielo alcancen un nivel mínimo. Existen medidas realizadas en pequeñas cuencas situadas a gran altitud en la Cordillera Blanca que muestran que una parte importante del volumen escurrido (35-60%) proviene de la fusión de reservas de hielo no renovables.

En una cuenca andina como la del Santa, que drena la parte occidental de la Cordillera Blanca, produce un notable porcentaje de la hidroelectricidad de Perú y riega una amplia región desértica de la costa, se estima que esa proporción es en promedio un 10-20%, más importante (-40%) durante la estación seca¹⁸. Para la ciudad de La Paz (Bolivia), la contribución del derretimiento de los glaciares a la alimentación de agua de la ciudad sería actualmente de un 15%, pero aumentaría a 27% durante el período del año en el que las precipitaciones se hacen escasas¹⁹. En este contexto, los glaciares andinos tropicales serán particularmente vulnerables y podrían desaparecer en el transcurso del siglo XXI.

Estimación del balance de masa de superficie del glaciar San Rafael y en el Campo de Hielo Norte. Resumen de tesis de doctorado

Gabriela Collao / Institut des Géosciences de l'Environnement (Grenoble, Francia).

Los Campos de Hielo de la Patagonia son la región cubierta de hielo más grande del Hemisferio Sur después de la Antártida. El Campo de Hielo Norte (CHN) corresponde al más pequeño de los campos de hielo Patagónicos, con una extensión de aproximadamente 4.000 km².

Este cuerpo de hielo ha experimentado pérdidas de hielo aceleradas desde la Pequeña Edad de Hielo cuyas causas aún no están claras. En mi tesis estudié los flujos de hielo generados por la dinámica glaciar, los balances de masa en la superficie y las condiciones climáticas del CHN para comprender mejor las causas de la pérdida de masa de este campo de hielo. Debido a la falta de datos disponibles, el enfoque se basa principalmente en modelación tanto de las condiciones climáticas como de la dinámica del flujo glaciar.

Primero, mi tesis se centra en la dinámica del glaciar San Rafael (SRG), que corresponde al mayor de los glaciares que componen el CHN. El flujo de hielo de este glaciar es modelado utilizando el modelo Elmer/Ice. El objetivo es simular los cambios de masa del glaciar y la dinámica.

En este glaciar las entradas y salidas de masa más importantes son el balance de masa superficial, que corresponde a la acumulación de nieve en la parte alta del glaciar y la fusión en la parte baja y la descarga de hielo en el frente a través del desprendimiento de icebergs.

El objetivo es estimar estos dos procesos por medio de la modelación del flujo y así conocer los motivos de la pérdida de masa. El modelo de flujo se inicializa utilizando la velocidad de la superficie y los datos de elevación de la roca basal. En la figura 2 podemos ver

Frente del glaciar San Rafael y icebergs en la laguna del mismo nombre.



las velocidades medidas y modeladas del glaciar San Rafael cuyas velocidades de más de 7 km por año en el frente se encuentran entre las más altas del mundo. La gran similitud entre las velocidades medidas y simuladas muestra la buena representación alcanzada con el modelo de flujo.

El modelo es forzado considerando distintos escenarios de balance de masa de superficie, y las simulaciones revelan que los estudios anteriores han sobreestimado la acumulación de nieve.

Los resultados de la modelación muestran que el desequilibrio glacial está controlado principalmente por una alta descarga de hielo en el frente (-0.83 Gt/a) comparada con el balance de masa superficial ligeramente positivo (0.08 Gt/a).

Nuestras modelaciones permiten estimar que las pérdidas de hielo comprometidas para el glaciar serán en promedio de 0.34 Gt/a para el próximo siglo. Este valor es la pérdida mínima esperada de este glaciar en respuesta al cambio climático futuro.

En un segundo paso, modelamos el balance de masa superficial del CHN utilizando un modelo climático regional, el modelo MAR. Este modelo utiliza datos de reanálisis (temperatura del aire, humedad, viento, presión) en los bordes para representar el clima en la región del CHN y simular la acumulación de nieve y la fusión de hielo en los glaciares.

El modelo es adaptado y validado utilizando datos de temperatura, precipitación, fusión y acumulación medidos en terreno y datos de albedo obtenidos de datos satelitales (MODIS). Entre 1980 y 2014, el resultado de la simulación es un balance de masa de superficie total para el CHN igual a -1.84 Gt/a.

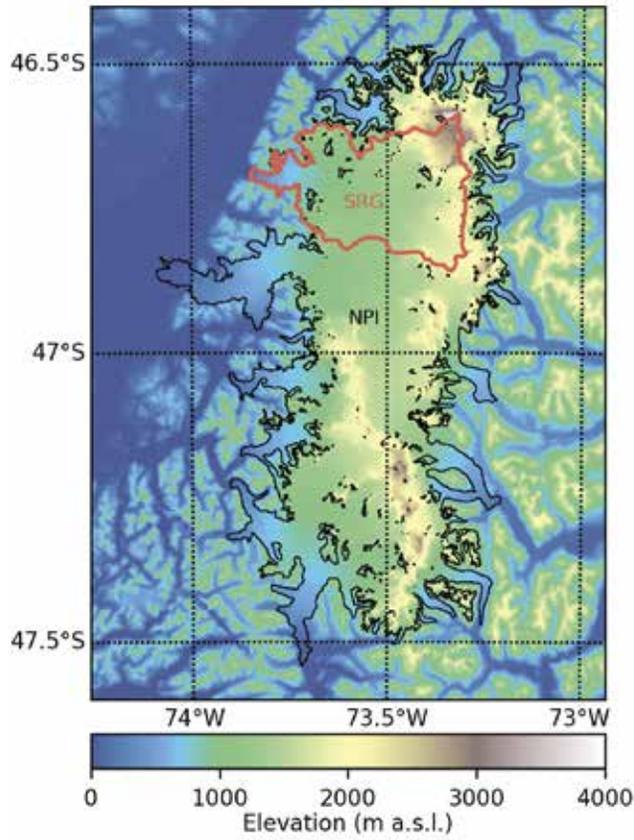
Este valor corresponde a la primera estimación negativa en este campo de hielo. El balance de masa superficial tiene una fuerte variabilidad de año en año que depende de la temperatura y las nevadas en la Patagonia.

Debido a la topografía del campo de hielo, con una extensa zona plana en el centro, las pequeñas variaciones de la acumulación o fusión en esta zona tienen un impacto muy fuerte en la pérdida o ganancia de masa de los glaciares.

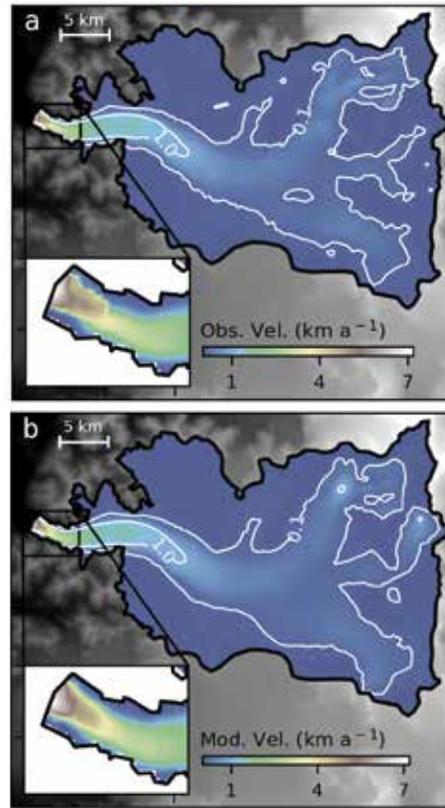
Combinado con las pérdidas por descarga de hielo en los frentes, el valor del balance de masa de superficie negativo propuesto para CHN habría permitido la importante pérdida de masa del campo de hielo desde la década de 1980.

El análisis de los resultados revela que el albedo, igual a la relación entre la radiación solar incidente y reflejada en la superficie, es muy importante en el balance de masa de superficie y controla la fusión del glaciar. Otro componente muy importante es la cantidad de nieve caída. Las nevadas explican las mayores variaciones

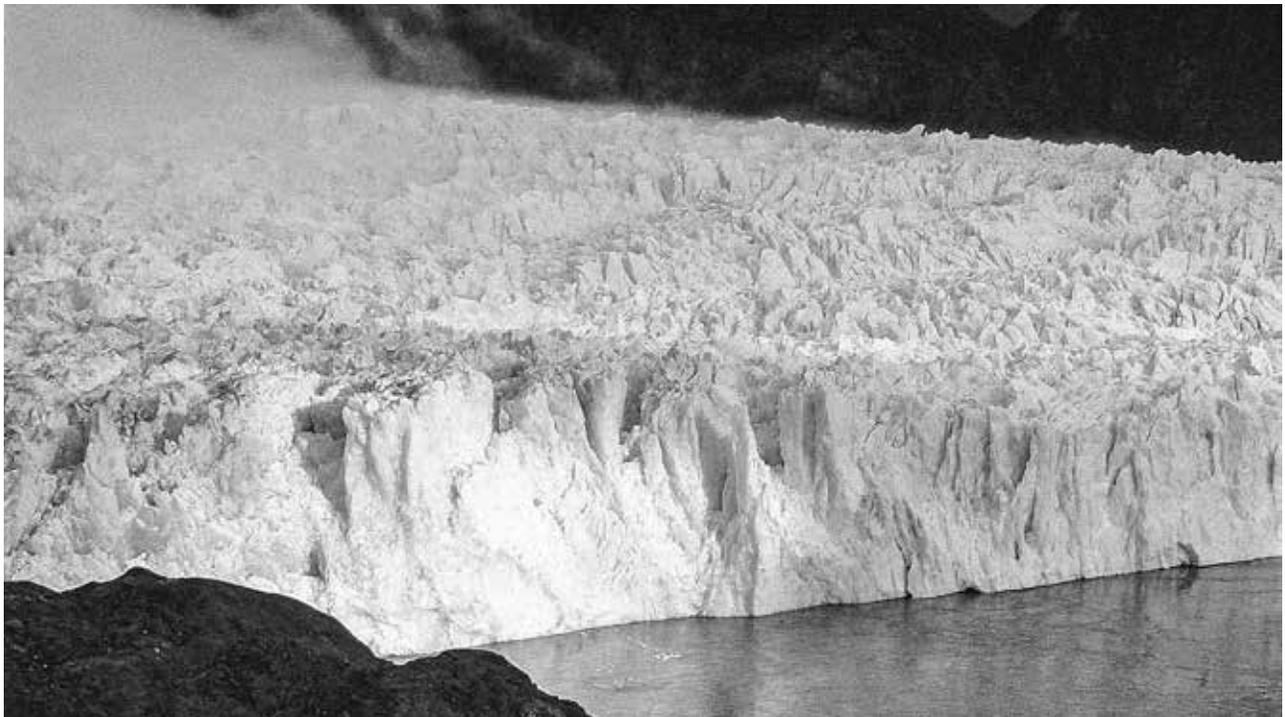




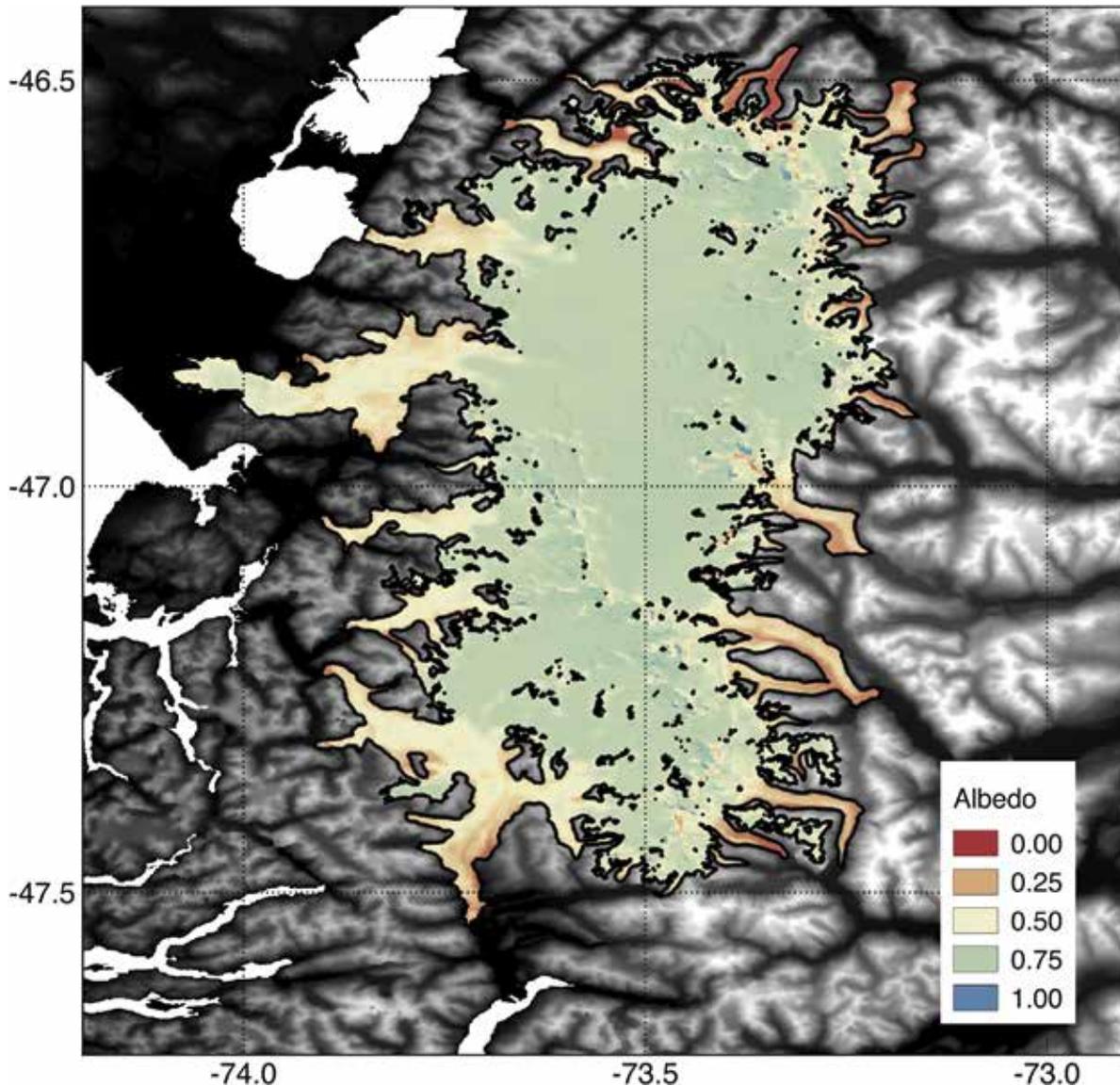
1. Topografía y ubicación del Campo de Hielo Norte (CHN) y glaciador San Rafael (GSR).



2. Velocidades superficiales glaciador San Rafael. a) Velocidad estimada con imágenes satelitales (Mouginot and Rignot, 2015) y b) velocidades simuladas con el modelo de flujo.



Frente del glaciador San Rafael. Foto Andrés Rivera.



3. Albedo estimado con imágenes satelitales MODIS, utilizado para validar el modelo.

en el balance de masa de superficie, de donde suponemos que las condiciones climáticas que prevalecieron en la Pequeña Edad de Hielo fueron más húmedas y permitieron que el glaciar creciera hasta alcanzar altitudes demasiado bajas para que los glaciares se mantengan estables en las condiciones actuales.

(1) Resumen de tesis de doctorado. IGE (L'Institut des Géosciences de l'Environnement) Antiguo LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) Université Grenoble Alpes. Directores de tesis: Vincent Favier y Fabien Gillet Chaulet. 2018

Se agradece a la DGA por los datos utilizados, a Geoestudios y a la DGA por las fotografías tomadas durante la campaña de terreno realizada en Campo de Hielo Norte, 2014.



Esta tesis permitió evaluar las condiciones climáticas regionales y mejorar nuestro conocimiento sobre la dinámica de los glaciares y los valores de balance de masa de superficie del Campo de Hielo Norte. Sin embargo, se deben realizar nuevas mediciones en la zona de acumulación del CHN para mejorar las estimaciones y concluir definitivamente sobre las causas de la disminución del CHN.

Louis Lliboutry: Un artífice del conocimiento de los Campos de Hielo

Gino Casassa / Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile, y Centro de Investigación Gaia Antártica, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.

Tuve el honor de conocer al Prof. Louis Lliboutry a principios de los ochenta en Grenoble. Él me había solicitado algunas de las nuevas cartas a escala 1:50.000 de los Campos de Hielo que habían sido recientemente publicadas por el Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM), a lo que accedí con placer. Era la oportunidad de conocer al ilustre glaciólogo francés, autor de la memorable obra *Nieves y glaciares de Chile*. Aunque nuestra reunión fue breve, pude apreciar su sabiduría, experto conocimiento y, por sobre todo, su entrañable amor por los glaciares andinos, que los había recorrido y estudiado en el inicio de su carrera. Se reporta aquí la primera medición exacta de la cota de la cumbre del monte San Valentín, con un resultado de 4.032 +/- 1 m.

Hasta la década de 1950 los Campos de Hielo de la Patagonia y de Tierra del Fuego eran un misterio en gran medida aún no revelado. Basado en las fotos aéreas Trimetrogon de 1944/45 de la United States Army Air Forces (USAAF) y de las cartas preliminares a escala 1:250.000 realizadas por el Army Map Service a partir de dichas fotos aéreas, publicadas en 1950 por el IGM, Lliboutry (1956) generó los primeros mapas detallados de los glaciares chilenos, incluyendo sus famosos mapas *Hielo Patagónico Norte* y *Hielo Patagónico Sur*. Estos campos de hielo constituyen las extensiones más grandes de hielo del hemisferio sur fuera de la Antártica, llamados oficialmente en Chile Campo de Hielo Norte (3.675 km², Meier *et al.*, 2018) y Campo de Hielo Sur (12.232 km², Meier *et al.*, 2018).

En la última glaciación, ambos campos de hielo estaban unidos, con una cubierta de hielo continua entre los 40 y los 55 grados de latitud sur (Hulton *et al.*, 2002). Esta barrera de hielo no permitía el flujo de gran parte de sus aguas de fusión hacia el oeste, las que evacuaban principalmente hacia el Atlántico. Actualmente separa a estos dos campos de hielo una gran depresión formada por los valles de los ríos Baker, Bravo y Pascua, que desembocan en los fiordos al este del golfo de Penas. Se sabe ahora que los glaciares de estos dos campos de hielo patagónicos presentan enormes tasas de adelgazamiento, de hasta 30 metros por año (Rignot *et al.*, 2003), y en promedio 85 centímetros por año para los dos campos

de hielo (Braun *et al.*, 2018), experimentando, a nivel global, las mayores pérdidas de hielo en proporción a su área. A pesar de ello, algunos pocos glaciares están en relativo equilibrio, como el Perito Moreno, y otro avanza, como es el caso del Pfo XI (Casassa *et al.*, 2014).

En base a la cartografía preliminar y al análisis de las fotos aéreas, Lliboutry pudo mapear los grandes glaciares efluentes de los campos de hielo patagónicos, y describir sus características glaciológicas. De esta manera, estos campos de hielo dejaron de ser simples manchas blancas en la cartografía y se dispuso de la primera información más detallada de los hielos interiores, conocidos como una «pampa de nieve» por los pobladores locales. Esta contribución describe la primera medición exacta de la cumbre del monte San Valentín, el más alto de la Patagonia chilena, y los reportes cartográficos anteriores, incluyendo las relevantes descripciones efectuadas por Lliboutry.

Monte San Valentín

Desde fines del siglo XIX, cuando se realizaron levantamientos cartográficos limítrofes por parte de Chile y Argentina (Buscaini y Metzeltin, 2001), se apreciaba que el monte San Valentín era el más alto de la Patagonia. Esta mole de roca se yergue unos 4 mil metros por sobre su entorno, y es visible a más de 100 km de distancia, muchas veces por sobre las nubes. Se distingue perfectamente desde la ribera suroccidental del lago



Cumbre monte San Valentín, 27 de marzo de 2007. De izquierda a derecha: Marco Rodríguez, Patrick Wagnon, Robert Gallaire, Stéphane Houdier, Gino Casassa y Patrick Ginot.

General Carrera. Ubicado a una latitud de $46,60^\circ$ Sur y $73,35^\circ$ Oeste, su imponente cumbre marca las nacientes y la divisoria superior de los glaciares (desde el norte y según los punteros del reloj): Grosse, Exploradores, San Rafael y Gualas. En el mapa *Hielo Patagónico Norte* de Lliboutry (1998), estos glaciares aparecen nombrados como Circo, San Valentín Este, San Rafael y Gualas. Es notable la exactitud de los mapas esquemáticos de Lliboutry. Por ejemplo notó que el glaciar Pirámide no se origina en la cumbre del monte San Valentín, sino que nace de una anticumbre ubicada en el filo somital 2 km al oeste de la cumbre principal (Lliboutry, 1956).

La Tabla 1 muestra las distintas altitudes atribuidas al monte San Valentín desde los levantamientos de las Comisiones de Límites de Chile y Argentina de fines del siglo XIX. Se puede apreciar que existen

dos altitudes originales: 3.876 m y 4.058 m. La altura de 3.876 m, que se cita a veces como 3.976 m, se atribuye en algunos textos (ej. Buscaini y Metzeltin, 2001), erróneamente, a una triangulación que habría realizado el explorador y topógrafo sueco Hugo Nicolaus Pallin, que acompañó al geólogo-geógrafo y explorador polar Otto Nordenskjöld en su expedición al glaciar San Quintín en 1920/21. Si bien es cierto Pallin mapeó el sector aledaño a la zona baja del glaciar San Quintín, no midió la altura del monte San Valentín, que estaba a una distancia de 60 km hacia el noreste. De hecho, Pallin publica en su mapa (Pallin, 1933) la cota de 4.058 m, obtenida del mapa del laudo arbitral de 1902 (Tabla 1).

Interesante notar que Lliboutry actualizó en 1994 la altura original de 3.876 m del monte San Valentín, citada en su primer mapa (Lliboutry, 1956), a la

cota de 4.080 m (Lliboutry, 1998), basado en la altura medida con un receptor GPS por ascensionistas franceses en 1993 (https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_San_Valentin, acceso enero 2019). Considerando que la precisión de la cota de 4.080 m la evaluaron los franceses en +/- 20 m, a todas luces el receptor GPS que usaron era de frecuencia simple, y además estaba bajo el régimen de «selective availability» que usaba en ese entonces EE.UU. para degradar la calidad de la señal.

Tabla 1. Altitud del monte San Valentín según cartografía histórica y mediciones modernas

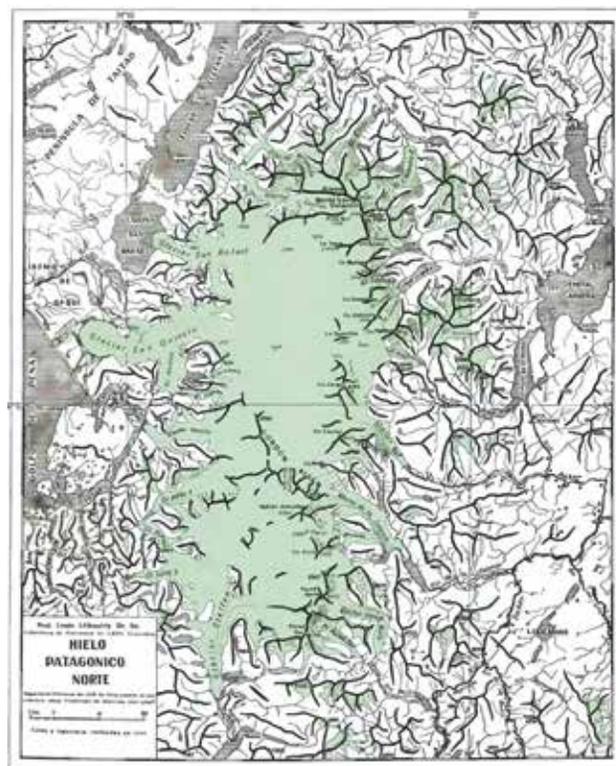
Altitud (m.s.n.m.)	Año	Autor	Descripción
3.870	1895	Juan Türke	Atlas de Chile: corregido según los últimos datos. Santiago, Eduardo Cadot, 20 p
4.058	1902	Laudo Arbitral de 1902	General Map of the Southern Region of the Argentine Republic and Chile. Showing the Argentine and Chilean projects and the boundary line settled by Arbitrator. King Edward VII. Scale 1:1.500.000
4.058	1950	IGM Chile	Carta Preliminar 4.673 monte San Valentín 1:250.000, basada en fotografías aéreas Trimetrogon de 1944, proyección Conforme Cónica Lambert, paralelos tipo 33° y 45°
3.876	1956	Louis Lliboutry	<i>Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología. Mapa esquemático Hielo Patagónico Norte</i>
3.910	1982	IGM Chile	Carta 1:50.000 4.630-7.620 monte San Valentín o San Clemente, basada en fotografías aéreas de 1975, SAD69
4.080	1998	Louis Lliboutry	Mapa esquemático <i>Hielo Patagónico Norte</i> con cotas y toponimia puesta al día en 1994. Capítulo <i>Glaciers of Chile and Argentina. Glaciers of the Wet Andes. Satellite Image Atlas of the World</i> . Eds. R.S. Williams Jr. and J.G. Ferrigno. USGS Professional Paper 1386-1 (Lliboutry, 1998)
3.910	2005	IGM Chile	Carta 1:50.000 J-032 monte San Valentín o San Clemente, basada en fotografías aéreas de 1995, WGS84
4.032 +/- 1 m	2007	Gino Casassa y Jens Wendt	Primera medición precisa con GPS geodésico en la superficie de nieve de la cumbre del monte San Valentín, 27 de abril de 2007, 12:00 UTC, WGS84

Un poco antes, en 1982, el IGM publicó la carta 1:50.000 del Monte San Valentín, basada en fotografías aéreas de 1975, designando una cota de 3.910 m. Esta cota ha sido preservada en la reedición de esta carta publicada por el IGM en 2005.

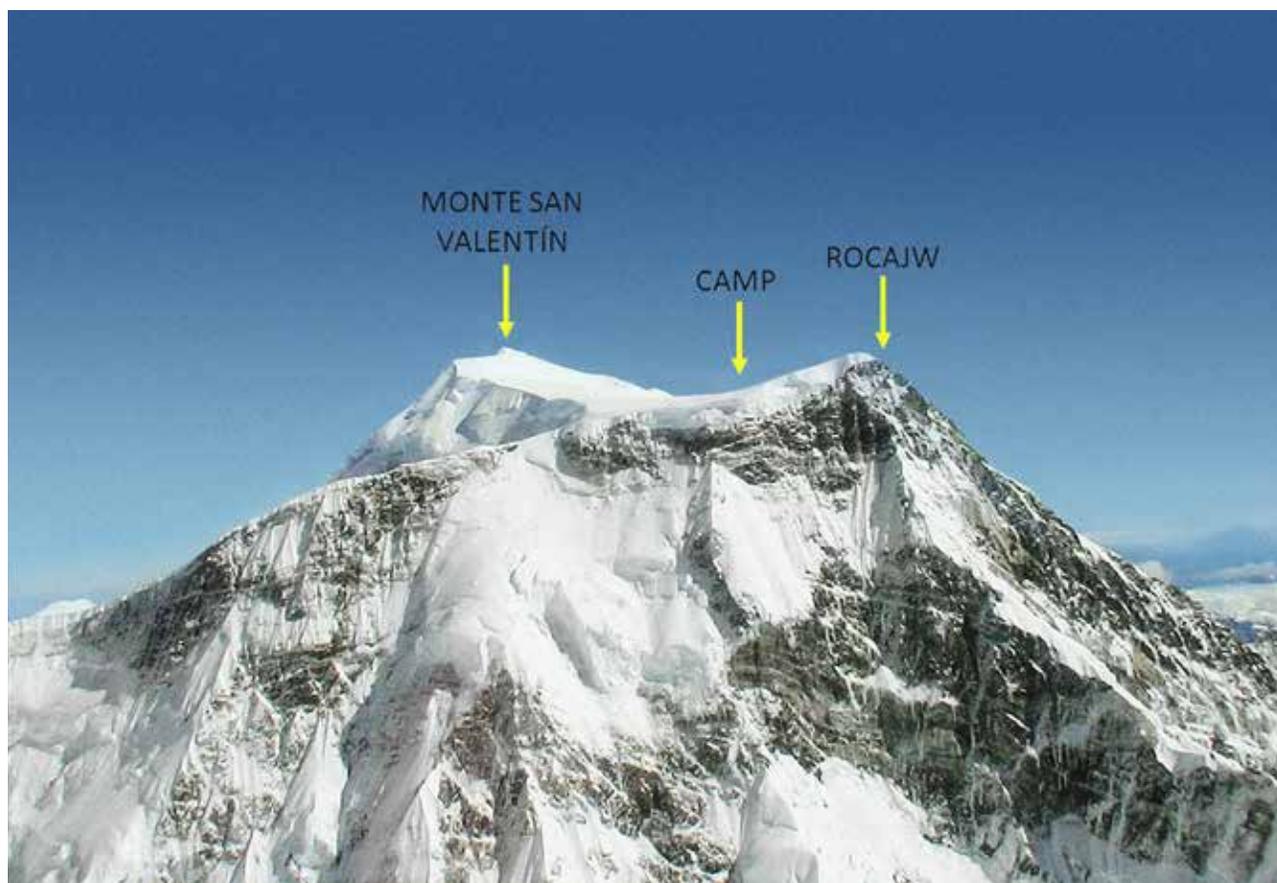
Proyecto SANVALLOR 2005-2007

Hubo que esperar hasta el año 2007 para determinar una cota exacta para la cumbre del Monte San Valentín. En efecto, el proyecto glaciológico francés SANVALLOR, con colaboración chilena, desarrollado entre 2005 y 2007, tuvo como objetivo taladrar testigos de hielo desde las cumbres más altas de la Patagonia austral: los montes San Valentín y San Lorenzo (3.706 m).

Es así como en marzo de 2005, con apoyo de helicóptero, los franceses Bernard Pouyau y Patrick Ginot, junto al chileno Gino Casassa, realizaron una perforación somera de 15 metros en el plateau bajo la cumbre del monte San Valentín, a una cota de 3747 m, donde midieron una temperatura de -12°C a una profundidad de 10 m (Vimeux *et al.*, 2008). Basado en la buena preservación de señales químicas e isotópicas, deciden



Mapa Lliboutry, 1998.



Monte San Valentín. «CAMP» indica el lugar del campamento de la expedición SANVALLOR de 2007. «ROCAJW» es la estación GPS en roca.

regresar perforando un testigo de hielo hasta la base del glaciar, cuya profundidad se estimó en unos 100 m. Finalmente en 2007 consiguen taladrar la cabecera del glaciar San Rafael exitosamente hasta la base, enviando en forma congelada el testigo de hielo al Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) de la Université Joseph Fourier en Grenoble, laboratorio que había fundado Lliboutry en 1958 y que dirigió él mismo por 25 años.

Es durante la expedición SANVALLOR de 2007, el 27 de marzo, que los seis expedicionarios ascienden la cumbre desde el campamento ubicado en el plateau somital, instalando un receptor GPS Javad modelo Pinnacle de doble frecuencia por un período de 1 hora. En forma simultánea midieron con otro receptor GPS idéntico en una base instalada en roca por el geodesta alemán Jens Wendt (QEPD) 230 m al norte del campamento de 3.747 m. A su vez, este punto en roca formó parte de una red geodésica medida durante el mismo

periodo, con tiempo de ocupación de al menos 48 horas en cada estación. De esta manera, con un procesamiento GPS diferencial realizado por Jens Wendt, se obtuvo una cota «ortométrica» de 4032 +/- 1 m para la cumbre del San Valentín, que se puede considerar referida al nivel medio del mar. Esta medición de la cumbre se realizó sobre superficie de nieve, la que es proclive a cambiar de altura dependiendo de la acumulación y/o erosión de nieve en este sector del glaciar.



En síntesis, el profesor Louis Lliboutry fue un notable pionero del conocimiento cartográfico y glaciológico de los glaciares de la Patagonia. Los antecedentes topográficos del monte San Valentín y el entorno del Campo de Hielo Norte reflejan claramente su gran aporte.

Desafíos glaciológicos del Campo de Hielo Sur

Andrés Rivera / Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos, CECs, Valdivia, Chile, Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

El Campo de Hielo Sur (CHS) es un conjunto de glaciares que se extiende desde los 48.3° a los 51.6° de latitud sur, territorio que es compartido por Chile y Argentina (Figura 1), constituyéndose en la mayor masa de hielo temperado del hemisferio sur, con un área que totaliza en la actualidad 12,636 km² distribuidos en 139 glaciares mayores a 5 km² de superficie (De Angelis, 2014).

Las fluctuaciones de sus glaciares principales se han podido estudiar desde mediados del siglo XIX, cuando exploradores europeos realizaron viajes a la zona, como por ejemplo la expedición hidrográfica británica de 1826-1930 dirigida por el capitán Parker King que obtuvo el primer registro completo y relativamente detallado de las costas de Patagonia Occidental. A finales del siglo XIX, el conocimiento de la zona mejoró mucho gracias a las numerosas expediciones y registros de las comisiones de límites de Chile y Argentina que recorrieron

la zona para delinear la frontera entre ambos países, en particular por Hans Steffen representando a Chile y por Francisco Moreno a Argentina.

Desde principios de siglo XX algunos pioneros, como el alemán Alfred Kolliker, se internaron en la cordillera recorriendo la parte alta del CHS, donde se encuentra el plateau o altiplanicie de nieve desde donde nacen varios de sus glaciares. En la primera mitad del siglo XX se realizaron numerosas expediciones deportivas y de exploración en la zona, destacándose los trabajos y fotografías de excelente calidad obtenidas por Alberto de Agostini durante sus travesías a los glaciares de la Patagonia.

Luego, en el año 1944/45, la Fuerza Aérea de EE.UU. realizó un primer vuelo aerofotogramétrico denominado Trimetrogon, obteniéndose fotos aéreas del CHS con tres cámaras montadas en un mismo eje o plano vertical, perpendicular a la línea de vuelo,



Campaña de mediciones y monitoreos en el lago O'Higgins, en la Patagonia chilena. Es el lago más profundo de América Latina, con 836 m.

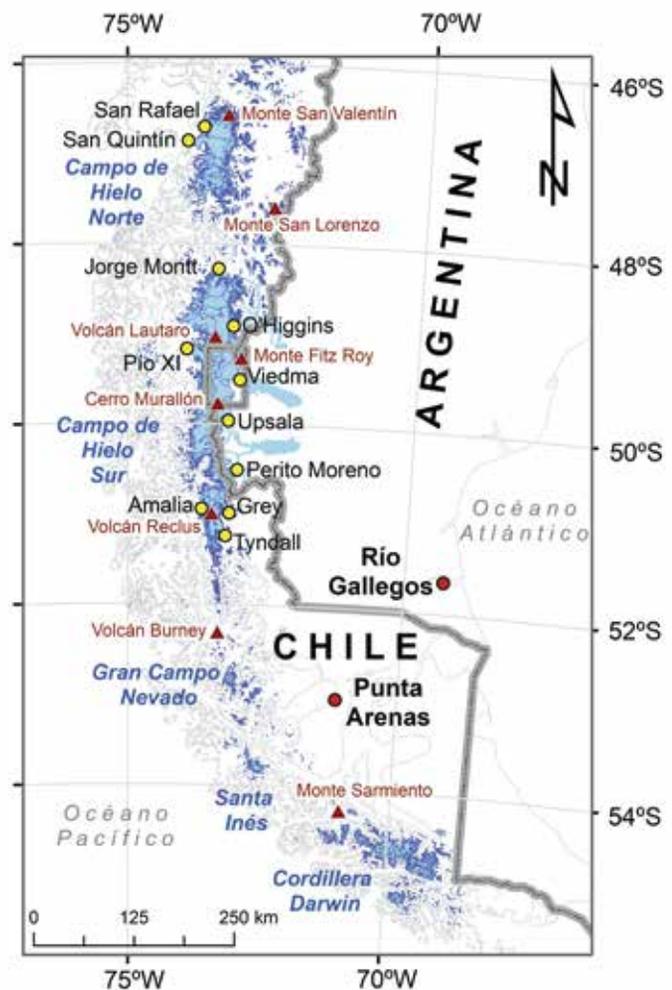
tomando una foto vertical y otras dos fotos oblicuas, a la derecha e izquierda respectivamente. Estas fotos fueron usadas por los norteamericanos para preparar una carta topográfica escala 1:250.000 traducida al castellano por el Instituto Geográfico Militar (IGM) como *Carta preliminar*.

Estas fotos fueron facilitadas a Louis Lliboutry (1956) durante su estadía en Chile, quien pudo estudiarlas en detalle y realizar las primeras observaciones glaciológicas de la zona, comenzando así nuestro conocimiento científico del CHS y de la mayoría de los glaciares patagónicos. Según sus propias palabras, la *Carta preliminar* del IGM representó «un progreso fantástico, sobre todo para el dibujo de las costas», no así para el mapeo de la zona cordillerana donde se ubican los glaciares del CHS que fueron «muy mal representados» debido a las características del levantamiento.

Las fotos eran de buena calidad como para fijar posiciones frontales de glaciares, determinar zonas de grietas, afloramientos rocosos y características superficiales del hielo, entre muchos otros elementos de interés. Lliboutry usó extensamente estas fotos para caracterizar las principales cuencas glaciares y determinar sus variaciones al compararlas con los registros históricos disponibles a la fecha.

Gracias a este análisis detectó que en general las lenguas principales estaban retrocediendo (e.g. glaciares Grey y Dickson), aunque en otros se habían observado algunas oscilaciones con avances y retrocesos (e.g. Pío XI), y en otros, como el Perito Moreno, se habían identificado varios ciclos de avance. El único ciclo de avance más general que detectó fue el que afectó a los glaciares San Rafael y San Quintín (o San Tadeo), del Campo de Hielo Norte, y al Viedma del CHS, que entre la década de 1930 y 1952 avanzaron, cuando pareció que «la deglaciación se había detenido».

Uno de los aspectos más relevantes detectados por Lliboutry en estas fotos Trimetrogon fue la existencia de material detrítico en superficie que constituían «franjas de fusión muy distanciadas» las que acertadamente interpretó como de origen volcánico al haber sido depositadas por erupciones volcánicas antiguas que cubrieron la parte centro-norte del CHS (Pío XI a Jorge Montt). Gracias a estas fotos identificó 3 bandas de cenizas volcánicas provenientes de algún centro volcánico ubicado al oeste de lo que denominó erradamente Volcán Viedma (nunatak Viedma), especulando que podría situarse al noroeste del cerro Lautaro, «que tiene una forma de

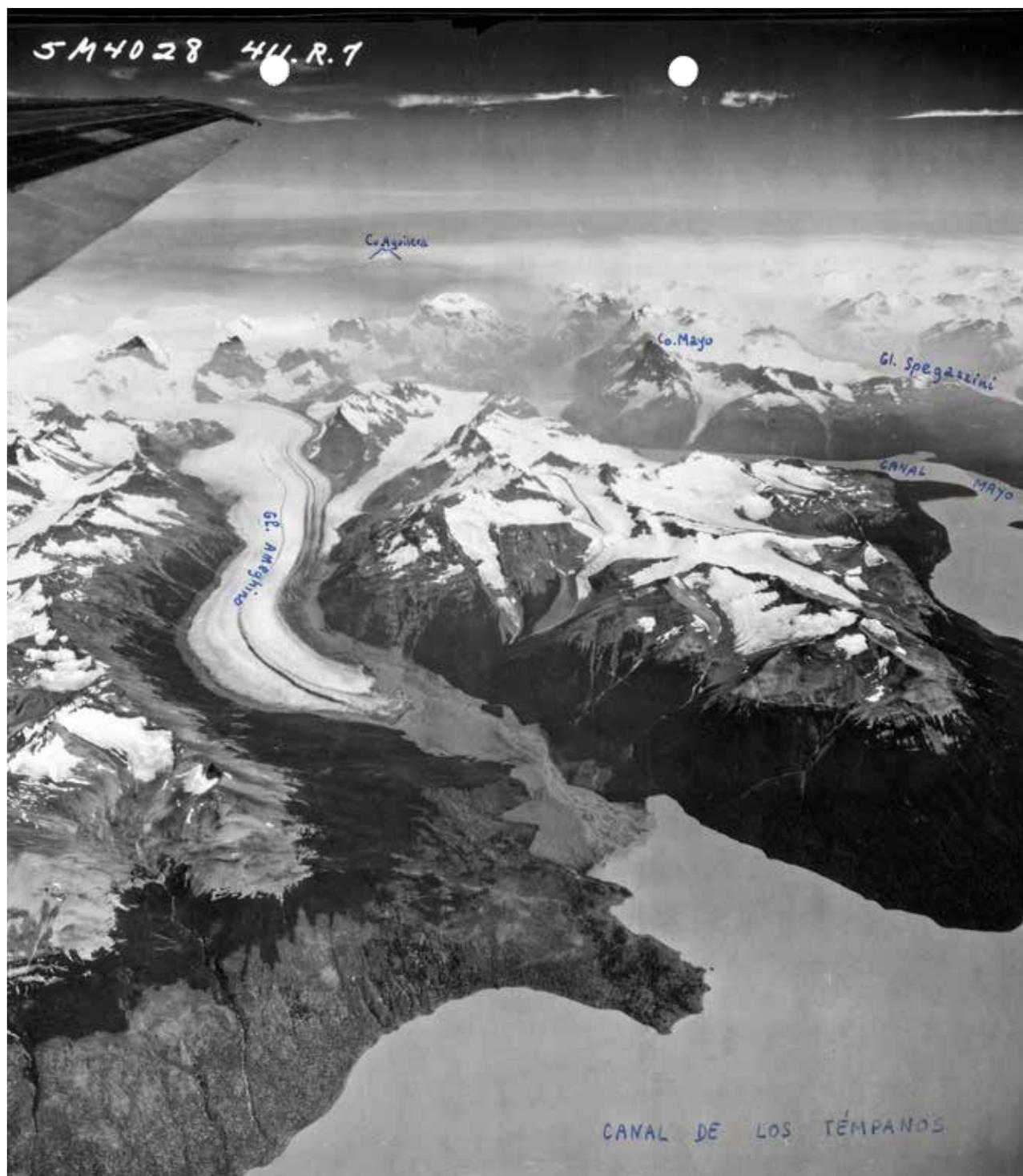


1. Mapa de ubicación con los principales glaciares y Campos de Hielo de la Patagonia en azul. Puntos amarillos indican los glaciares descritos en el texto. Campo de Hielo Sur: Acuerdo de 1998.

un volcán desmantelado» según sus propias palabras. Hoy sabemos que el único centro volcánico activo de la zona es el volcán Lautaro (Figura 1), de 3.606 metros sobre el nivel del mar (msnm) que ha tenido varias erupciones históricas y que manifiesta eventos menores prácticamente todos los años, como por ejemplo derretimiento en altura, avalanchas de derrubios y de nieve, todo asociado a su actividad volcánica.

Al comparar las posiciones actuales de los glaciares que fueron analizados por Lliboutry con las fotos aéreas de 1944/45 se ha comprobado en la mayoría de los casos que ha habido cambios muy significativos (Figura 2), como los experimentados por el glaciar Jorge Montt, que retrocedió casi 15 km hasta el 2018, dejando a su paso un fiordo que tiene profundidades de más de 400 m (Rivera *et al.*, 2012), o el glaciar O'Higgins, que en el





Fotos aéreas oblicuas obtenidas durante el vuelo Trimetrogon realizado en el verano de 1944/45 en todo Chile. Estas fotos son las primeras imágenes del Campo de Hielo Sur y las que fueron usadas por Lliboutry para denominar glaciares (notas a mano sobre las fotos) y estudiar sus cambios recientes.

mismo período retrocedió casi 13 km, dando paso a un fiordo lacustre de más de 800 m de profundidad, o el Upsala, que retrocedió cerca de 11 km en el mismo período, dejando atrás un brazo del lago Argentino con más de 600 metros de profundidad.

Otro glaciar que experimentó, por el contrario, un gran avance es el Pío XI, cuya lengua terminal se dividió en dos frentes que avanzaron hasta 11 km desde 1945, embalsando el valle del río Greve descrito por Lliboutry como un «valle desprovisto de vegetación y que parece ser sede de avenidas de agua». Este anómalo avance del Pío XI formó una morrena frontal en la cabecera del fiordo Eyre (Wilson *et al.*, 2016).

Junto a estos cambios frontales se ha detectado una gran pérdida volumétrica (Rignot *et al.*, 2003; Willis *et al.*, 2012), con algunas contadas excepciones, siendo la más notable la del Pío XI, que ha engrosado, y la del Perito Moreno, que se ha mantenido en una condición de equilibrio con mínimos avances y retrocesos, los que han resultado en numerosas ocasiones en embalsamientos y posteriores rupturas del Brazo Rico del Lago Argentino en los últimos años (Lenzano *et al.*, 2018).

Trimetrogon: la primera cobertura aérea de Chile

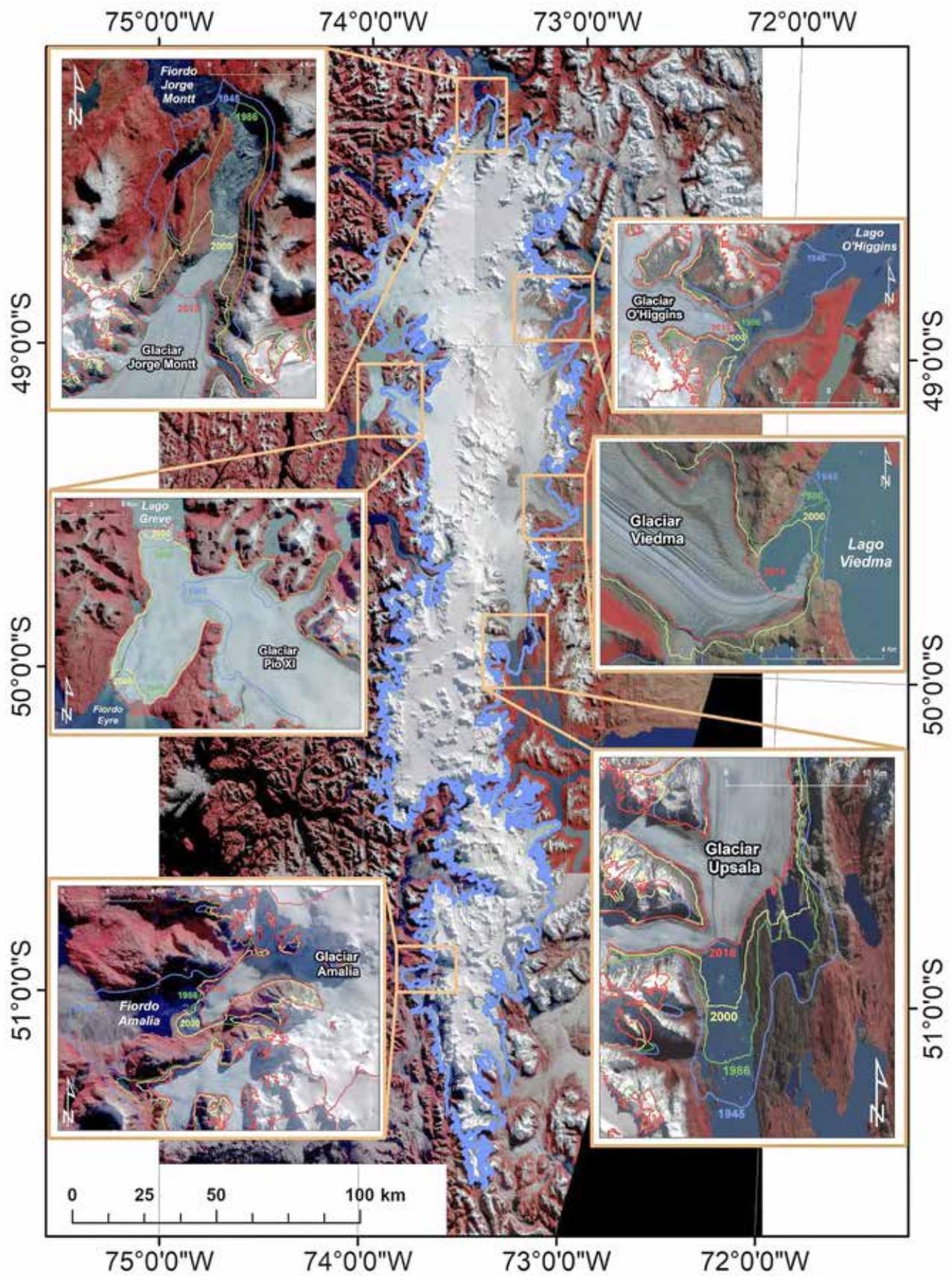
La reinterpretación de la extensión de glaciares a partir de las fotos Trimetrogon y las cartas preliminares del IGM permiten determinar que en 1944/45 había 13,883 km² de hielo, área que se redujo en 1986 a 13,070 km², luego a 12,787 km² en el año 2000 y finalmente a 12,133 km² en 2018. En otras palabras, en los últimos 73 años el CHS perdió 1,750 km² de hielo, que representa un 13% de la superficie original. Con el fin de tener una noción de escala de lo perdido, se puede mencionar que Rivera *et al.* (2016) estimó que en la actualidad hay 1,035 km² de hielo en todo Chile Norte y Centro (18-35°S), lo que representa sólo un 60% de todo lo perdido por el CHS en las últimas 7 décadas.

Con estas pérdidas generalizadas, se han llevado a cabo estudios de modelación del balance de masa superficial del CHS que han obtenido valores positivos entre los años 1975 y 2011 (Schaefer *et al.*, 2015), lo que contrasta con el análisis de modelos digitales de elevación de distintas épocas, que han resultado en balances de masa negativos para el CHS en su conjunto, con resultados, sin embargo, muy distintos, dependiendo del método empleado, destacándose la pérdida entre 2000 y 2016 de 11.84 ± 3.3 Gt/a usando SRTM, versus Tan-

DEM-X (Malz *et al.*, 2018) y pérdidas de 21.29 ± 0.38 Gt/a usando datos CryoSat-2 (Foresta *et al.*, 2018). A dicho retroceso y pérdida volumétrica generalizada se suma en muchos casos un aceleramiento del flujo de hielo (Mouginot & Rignot, 2015), particularmente a partir de la década de los 80. Una posibilidad es que el retroceso y adelgazamiento de largo plazo va a tender a aminorarse con balances de masa más positivos en décadas recientes. Sin embargo, los cambios frontales de los últimos años no reflejan esta desaceleración; de hecho, hay varios glaciares que han tenido pérdidas muy fuertes en años recientes (e.g. Jorge Montt, O'Higgins, Chico, Viedma, Grey y Amalia, entre otros). Esto implica que hay que mejorar los modelos y validarlos con más datos de terreno.

La mayor parte de los glaciares del CHS son desprendentes (producen témpanos), lo que en el largo plazo es la principal fuente de pérdida de masa para ese tipo de glaciares (Aniya *et al.*, 1996). Este proceso puede darse en fiordos sometidos a marea o en lagos, donde un factor importante que controla la dinámica del hielo es la profundidad de los cuerpos de agua donde los glaciares terminan.

Debido a que la batimetría cerca de los glaciares es determinada por la geología e historia glacial de largo plazo, sus profundidades tienen características locales muy disímiles entre glaciares cercanos, implicando que la actividad de producción de témpanos puede generar respuestas no climáticas, del tipo dinámico. En períodos de alta actividad desprendente y balances de masa negativos, el hielo puede retroceder o incluso colapsar en aguas profundas, acelerándose y adelgazando, en un proceso de estiramiento longitudinal. Puede propagar las perturbaciones frontales aguas arriba, incluso hasta las divisorias de hielo, en especial cuando las zonas de acumulación comparten una meseta relativamente plana o plateaux. En períodos de baja actividad de desprendimientos o con un balance de masa positivo, el glaciar puede avanzar, pudiendo traspasar sectores profundos de fiordos y lagos hasta formar morrenas frontales donde puede estabilizarse. Este ciclo de avance/retroceso de glaciares que producen témpanos se conoce en literatura inglesa como el Tidewater Calving Cycle (TWC). En el CHS hay varios glaciares que representan bien todas las fases del TWC, desde aquellos que han experimentado colapsos frontales, como el glaciar Jorge Montt (Rivera *et al.*, 2012), otros



2. Cambios frontales 1945-2018 del CHS y sus glaciares principales. Imagen de fondo, mosaico Sentinel del 2018.

que tuvieron dicho colapso y ahora están en relativo equilibrio, como el O'Higgins (Sakakibara & Sugi 2014), hasta otros como el Pío XI, que está en su fase de avance (Wilson *et al.*, 2016). Se puede concluir por lo tanto que los glaciares del CHS no necesariamente están res-

pondiendo a los cambios climáticos en forma lineal o directa, sino que sus comportamientos son mucho más complejos, con diferencias fuertes entre las cuencas de hielo, dependiendo de sus características dinámicas y topográficas (e.g. espesor y flujo del hielo).



El gran avance en la investigación científica del CHS gracias al uso generalizado de imágenes satelitales de alta resolución permite, entre otros, un monitoreo semipermanente de sus glaciares, el cálculo de velocidades del hielo gracias a técnicas de seguimiento de patrones superficiales (*feature tracking*) y la construcción de modelos digitales de elevación. Muchas de estas limitaciones ya fueron enunciadas hace más de 60 años por Lliboutry. Entre ellas, destaca la falta de datos de terreno para la validación de teorías y modelos que intentan explicar el comportamiento diferencial de sus glaciares. Esta limitación es crítica en especial sobre los componentes del balance de masa (acumulación y ablación), así como en los de flujo del hielo, donde aún no se sabe, por ejemplo, el espesor de hielo y el volumen total del CHS (Gourlet *et al.*, 2016).

Modelos climáticos para la Patagonia

A diferencia de las limitaciones extremas de la época de Lliboutry, hoy existen modelos climáticos que pueden aplicarse en Patagonia (Villaruel *et al.*, 2013), permitiendo simular cambios pasados y determinar proyecciones futuras de balance de masa ante distintos escenarios de cambio climático. El problema es cómo validar estas modelaciones y calibrar algunos de los parámetros que son fundamentales y de los que sabemos poco en el CHS, como por ejemplo acumulación y ablación, que en general se modelan a partir de datos de Re-Analysis y de extrapolaciones desde estaciones continuas ubicadas a gran distancia y a baja altitud. No obstante, en la actualidad existen algunas estaciones meteorológicas que miden cerca de las lenguas de hielo, por ejemplo cerca de los glaciares Tyndall y Grey (Weidemann *et al.*, 2013).

En el CECs se ha enfrentado este problema llevando a cabo varios proyectos de investigación de alta complejidad científica y logística, por ejemplo instalando tres bases glaciológicas en el CHS, las que fueron localizadas en nunataks (cerros isla o afloramientos rocosos rodeados por hielo). Cada base está compuesta por 2 módulos de fibra de vidrio anclados a roca que permiten el alojamiento, alimentación, trabajo y sobrevivencia de 6-8 personas. Cada base tiene además una

◀ Foto vertical del vuelo Trimetrogon de 1944/45 sobre parte de la cordillera Sarmiento y el fiordo de las Montañas, una zona que aunque se encuentra cerca de Puerto Natales, ha sido muy poco explorada hasta el día de hoy.

estación meteorológica completa con dos niveles de sensores y transmisión de datos en tiempo real. Estas instalaciones fueron financiadas por la Dirección General de Aguas (DGA) y están disponibles para investigadores y montañistas.

Junto a esta infraestructura, el CECs ha instalado varias cámaras fotográficas capturando fotos diarias, lo que ha permitido generar videos (time lapse) que muestran el flujo de hielo de varias lenguas glaciares terminales. También ha llevado a cabo numerosas expediciones aéreas, terrestres y lacustres, donde ha medido espesores de hielo, balance de masa y batimetría de fiordo/lagos. Estos datos han permitido revelar algunos de los secretos mejor guardados por el CHS y que maravillarían a pioneros como Lliboutry, como por ejemplo al detectar con radares las capas de cenizas volcánicas sepultadas bajo cientos de metros de espesor del hielo, cuando el solo pudo visualizarlas en superficie hace 70 años. En su época había espesores máximos del hielo que superaban los 1.300 m y que hoy son ocupados por lagos o fiordos sin hielo y cuyos fondos están a más de 400 metros por debajo del nivel del mar, como por ejemplo cerca del frente actual de los glaciares Jorge Montt, Upsala, Viedma y O'Higgins.

Los trabajos pioneros de Lliboutry siguen siendo fundamentales para un mejor entendimiento de los cambios de largo plazo del CHS. Sus pioneras investigaciones son una inspiración para la exploración e investigación glaciológica moderna, en especial para Chile y Argentina, que comparten el área y para los cuales más que ser un límite fronterizo, el CHS debería ser considerado una zona de permanente y estrecha colaboración científica.



La gran mayoría de los glaciares del CHS han experimentado fuertes pérdidas areales en las últimas décadas, las que en muchos casos parecen estar acelerándose. Esto implica que los glaciares siguen con un importante desequilibrio respecto de las condiciones climáticas actuales, a pesar de modelaciones que indican balances de masa positivos en décadas recientes. Las respuestas dinámicas del hielo, en particular por la alta producción de témpanos en aguas profundas, son el factor principal de la pérdida de masa en la zona, seguida por el fuerte derretimiento en las partes bajas.

La singularidad de los glaciares rocosos

Guillermo Azócar / Atacama Ambiente Consultores.

Son unidades del relieve que se describen como formas de acumulación rocosas con contenido de hielo variable y con morfología de lengua o lóbulo. Su superficie se caracteriza por la presencia de cordones, surcos, lóbulos y un frente empinado. Se originan principalmente a partir de procesos glaciales y periglaciales. La hidrología de los glaciares rocosos es un campo poco investigado; no obstante, conceptualizaciones de la hidrología del permafrost ártico y modelos teóricos de los flujos de agua al interior de un glaciar rocoso han ayudado a una mayor comprensión de los procesos hídricos de ellos. En Chile, se concentran principalmente a lo largo de los Andes, entre los 24 y 35.5° de latitud Sur, en las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo.

Los glaciares rocosos son unidades geomorfológicas presentes en los ambientes de alta montaña de Chile y el mundo, los cuales han sido principalmente estudiados durante las últimas décadas, en términos de comprender su proceso de formación, distribución y rol hidrológico, entre otros aspectos. El siguiente ensayo tiene por objetivo explicar las características generales de un glaciar rocoso, su proceso de formación, hidrología y de la distribución de ellos en los Andes chilenos.

¿Qué es un glaciar rocoso?

Corresponde a formas de origen tanto glacial como periglacial, distribuidos en diferentes partes del mundo. Se les describe como formas de acumulación rocosa con contenido de hielo variable o nulo, producido, depositado y deformado principalmente durante el período Holoceno y en tiempos históricos recientes (Birkeland, 1973; Haerberli *et al.*, 2003). De acuerdo con Capps Jr. (1910), quien propuso una de las primeras definiciones vigentes hasta nuestro tiempo, un glaciar rocoso, según su morfología superficial, sería una unidad geomorfológica en forma de lengua o lóbulo, constituida de rocas angulares, que asemejan a un glaciar.

Se localizan en áreas de alta montaña y polares. Su superficie se caracteriza por la presencia de cordones, surcos y lóbulos y un frente empinado (Potter, 1972). Su longitud va desde unos pocos metros a varios hectómetros, variando entre los 200 y 800 m (Barsch, 1996). Aunque la definición morfológica planteada por Capp Jr. (1910) es comúnmente usada hasta el día de hoy, aún hay controversias en cuanto a si es más adecuada una definición que enfatiza procesos y génesis, en contra de una definición basada en

características morfológicas (Berthling, 2011). En las últimas décadas han surgido otras definiciones que intentan describir un glaciar rocoso a partir de sus características geométricas, de posición geomorfológica, dinámicas y de origen del material (Clark *et al.*, 1998).

Una de las clasificaciones comúnmente usada es la planteada por Barsch (1996), que a partir de un atributo de características dinámicas realiza inferencias en cuanto a presencia de hielo al interior de un glaciar rocoso, basado en el principio de la presencia de hielo subsuperficial en diferentes planos de corte (Haerberli, *et al.*, 2006).

En esta categorización los glaciares rocosos se clasifican en formas activas (en movimiento y con hielo en su interior), inactivas (sin movimiento, pero aún con hielo en su interior) y fósiles o relictos (sin movimiento y donde se ha descongelado totalmente el contenido de hielo). Formas activas e inactivas son comúnmente agrupadas como glaciares rocosos intactos, debido a la dificultad de diferenciar entre formas activas e inactivas en la fotointerpretación (Barsch, 1996). Los glaciares rocosos activos son descritos como la expresión geomorfológica del permafrost de montaña con alto contenido de hielo (Barsch, 1996; Burger *et al.*, 1999; Haerberli, 2000). Internamente, un glaciar rocoso activo está constituido por una mezcla de hielo (entre 40 y 60%) y material detrítico (Barsch, 1996; Hoelzle *et al.*, 1998; Arenson *et al.*, 2002). Se han detectado tasas de desplazamiento horizontal de entre 10 cm y 100 cm por año (Burger *et al.*, 1999; Roer *et al.*, 2005). Se pueden transformar tanto en formas inactivas como también relictas, a consecuencia del descongelamiento del hielo por condiciones ambientales circundantes o por



Glaciar rocoso activo, cuenca superior del estero Yerba Loca. Andes de Santiago, enero de 2016.

un aumento en el grosor del manto rocoso no congelado (Barsh, 1996), como, asimismo, cuando se desplazan distantes de la fuente de origen de material rocoso y hielo. Las modificaciones de la pendiente en el lecho rocoso inciden en la disminución del movimiento.

Proceso de formación

La investigación científica ha planteado principalmente dos teorías en cuanto al origen de un glaciar rocoso; una que plantea un origen periglacial (origen criogénico) y otra glacial (origen glaciogénico; Mahaney *et al.*, 2007). Ambas teorías se apoyan en características relacionadas con el origen del hielo y el contexto ambiental de la localización de los glaciares rocosos.

La teoría periglacial establece que los glaciares rocosos son formas exclusivas del ambiente periglacial y el permafrost, siendo genéticamente distintos de los glaciares cubiertos (Wahrhaftig & Cox, 1959; Barsch, 1996). En este modelo teórico se propone que el origen interno del hielo al interior de un glaciar rocoso es no-glacial, constituido a partir de la percolación y congelamiento de aguas derivadas de las precipitaciones o fusión de nieve sobre depósitos no consolidados (hielo intersticial: Clark *et al.*, 1998). Este modelo teórico se

ajusta bien en pequeños glaciares rocosos de talud en los cuales es probable que el hielo interno del glaciar rocoso se haya originado a partir de acumulación periglacial (i.e. avalanchas).

La teoría glacial, la cual es ampliamente aceptada, establece que los glaciares rocosos son parte de un continuum geomorfológico en un ambiente glacial (Wahrhaftig & Cox, 1959; Clark *et al.*, 1998; Burger *et al.*, 1999). Bajo esta teoría, los glaciares rocosos se entienden como formas transicionales derivadas de procesos glaciales. En este continuum, el glaciar rocoso se localizaría en la parte terminal y al centro estaría el glaciar cubierto y en el extremo superior un glaciar blanco. Estas interacciones entre glaciar y glaciar rocoso son particularmente comunes tanto en la cordillera de los Andes como en otros cordones montañosos (Brenning *et al.*, 2005a; Milana & Güell, 2008; Monnier & Kinnard, 2017). Los glaciares rocosos pueden originarse a partir de una mezcla de procesos glaciales y periglaciales. Además, algunos glaciares rocosos se originan a partir de depósitos de movimientos en masa tales como derrumbes, deslizamientos de tierra, y también en taludes y depósitos glaciales poco cohesionados (Johnson, 1984; Barsch, 1996).

Hidrología de los glaciares rocosos

Es un campo de estudio donde se conoce muy poco en cuanto a las relaciones hidrológicas entre un glaciar rocoso y su cuenca. Conceptualizaciones científicas derivadas de la hidrología del permafrost de zonas árticas y en especial el rol de la capa activa (capa del suelo con ciclos de congelamiento y descongelamiento anual) son aplicables en áreas con presencia de glaciares rocosos intactos (Kuchment *et al.*, 2000; Woo *et al.*, 2008).

Estudios teóricos sobre la hidrología del permafrost y presunciones derivadas de modelos hidrológicos han ayudado a comprender el rol hidrológico de los glaciares rocosos al interior de las cuencas de montaña (Burger *et al.*, 1999; Giardino *et al.*; Schrott, 1998, Gascoin *et al.*, 2011).

Las características de un glaciar rocoso intacto están controladas por las condiciones climáticas, las propiedades detríticas y los mecanismos físicos que controlan el flujo de agua de deshielo a través de un glaciar rocoso. Por lo tanto, la variación estacional de suministro de agua controla la variación en la descarga por medio de un glaciar rocoso (Giardino *et al.*, 2011).

En términos de un modelo hídrico, un glaciar rocoso intacto tiene como inputs las precipitaciones sólidas, los aportes de las laderas adyacentes, avalanchas y las aguas subterráneas, y como outputs: el flujo de agua superficial, las descargas subsuperficiales, la sublima-

ción, la evaporación y el hielo almacenado (Giardino *et al.*, 1992).

De acuerdo con este modelo, el agua fluye en la subsuperficie sobre el tope del permafrost y en el subsuelo bajo la base del permafrost, actuando la capa de permafrost como una superficie impermeable entre la subsuperficie y el subsuelo. La descarga de agua en un glaciar rocoso presenta variaciones durante un año hidrológico; en el invierno la capa activa se congela y las descargas de agua se originan en su mayoría por flujos provenientes de la base del glaciar rocoso. Durante la primavera e inicios del verano, la nieve acumulada en superficie se funde e infiltra en la capa activa, recargando la porción superior del glaciar rocoso, creando un acuífero posado sobre el tope del permafrost que incrementa la escorrentía derivada desde un glaciar rocoso.

Debido a que las temperaturas en primavera podrían estar aún bajo cero grados en la capa activa, eventualmente parte del agua que infiltra derivada de las precipitaciones se congela nuevamente. Durante el verano el agua acumulada en la capa activa es liberada en períodos de semanas o meses, actuando esta porción del glaciar rocoso como un retardante del movimiento del agua, similar al funcionamiento que tendría una esponja, en la cual el agua que infiltró durante la primavera es liberada posteriormente. A finales del verano y

Síntesis de la distribución de glaciares rocosos y glaciares blancos en diferentes cuencas y zonas latitudinales de los Andes chilenos.

Cuenca	Glaciares rocosos		Glaciares blancos		Fuente:	
	Nro.	Superficie (km ²)	Nro.	Superficie (km ²)	Glaciares rocosos	Glaciares blancos
Altiplano Endorreico (-26°S)	s.d. ^a	5,65	s.d.	15,68	García <i>et al.</i> (2017)	
Copiapó (-27°S)	s.d.	15,95	s.d.	19,07	García <i>et al.</i> (2017)	
Huasco (-29°S)	424	23,30	112	16,86	Azócar (2018) ^{b,c}	Nicholson <i>et al.</i> (2009) ^{b,c}
Elqui (-30°S)	305	16,60	123	8,27	DGA (2010) ^b	DGA (2009a) ^{b,c}
Limarí (-30.5°S)	341	13,80	32	1,74	DGA (2010) ^b	DGA (2009a) ^{b,c}
Choapa (-31.5°S)	221	6,70	15	0,34	DGA (2010) ^b	DGA (2009a) ^{b,c}
Aconcagua (-32.5° S)	541	87,22	101	59,89	DGA (2011) ^{b,d}	DGA (2009b) ^{b,c}
Maipo (-33.5° S)	698	152,26	230	229,22	DGA (2011) ^{b,c,d}	
Rapel (-34° S)	189	36,31	241	140,53	DGA (2011) ^{b,c,d}	
Mataquito (-35°S)	11	0,78	41	14,06	DGA (2011) ^{b,c,d}	
Maule (-35.5° S)	14	3,50	52	19,01	DGA (2011) ^{b,c,d}	
Zona Sur (-36-41°S)	s.d.	s.d.	447	193	Barcaza <i>et al.</i> (2017) ^{b,c}	
Zona Austral (-41-56°S)	s.d.	s.d.	18.873	22,579	Barcaza <i>et al.</i> (2017) ^{b,c}	
TOTAL	2.744	362,07	20,267	23,296.97		

a Sin data. b Incluye superficies con áreas inferiores a 0.1 km². c Incluye glaciares cubiertos. d Incluye Rampas de proglaciales. e Documento en preparación.

comienzos del otoño es probable que existan aportes del descongelamiento del tope del permafrost en las partes frontales del glaciar rocoso. Debido a la falta de investigaciones, no hay claridad en la magnitud de este aporte.

Impacto del calentamiento global

La influencia hidrológica de los glaciares rocosos al interior de una cuenca está primeramente relacionada con la capacidad de almacenar un contenido variable de hielo, de almacenamiento estacional del agua e interacción con flujos hídricos que fluyen a través o debajo de los glaciares rocosos. Los glaciares rocosos intactos, además son indicadores de la presencia de permafrost rico en hielo y de la existencia de áreas con almacenamiento permanente o estacional de agua en el suelo (Barsch, 1996).

A diferencia de los glaciares blancos, en donde el impacto del calentamiento global actúa de forma más visible en la pérdida de volumen debido al aceleramiento del derretimiento del hielo por la radiación, los efectos del calentamiento global también se observan en los glaciares rocosos, pero a un menor grado, debido al efecto de aislamiento térmico que produce el manto detrítico de los glaciares rocosos sobre el hielo macizo o intersticial subyacente (Giardino *et al.*, 2011).

El descongelamiento del hielo al interior de glaciares rocosos debe ser menor que en el de los glaciares blancos. Por lo tanto, es posible teorizar que a medida que las temperaturas aumentan, se convertirán cada vez más en reservorios de agua cruciales en áreas de montaña, y especialmente en regiones áridas, donde se observa una disminución de las precipitaciones y un retroceso generalizado de los glaciares.

Distribución de los glaciares rocosos en Chile

Uno de los primeros registros científicos de su presencia en Chile fue realizado por Louis Lliboutry, quien describió los glaciares rocosos como formas presentes en el área de la cuenca del río Olivares. En las décadas siguientes se han realizado una serie de estudios que han contribuido a caracterizar la distribución y a cuantificar el número de glaciares rocosos, especialmente de las cuencas de los Andes semiáridos. Debido a objetivos de las investigaciones, diferencias metodológicas y recursos utilizados, aún hay incertidumbres en cuanto al número real y de las características de los glaciares rocosos distribuidos a lo largo de Chile.

En términos climáticos, la influencia de la extrema aridez en el área de la diagonal árida en la zona norte inhibe especialmente el desarrollo de glaciares rocosos entre los $-24-25^{\circ}\text{S}$. (Brenning, 2005b).

Es posible encontrar glaciares rocosos en circunstancias ambientales particulares (Kammer, 1998). A partir de la cuenca del río Huasco (-29°S), los glaciares rocosos aparecen como unidades geomorfológicas características de los Andes chilenos, cuya presencia se proyecta de forma casi ininterrumpida hasta la cuenca del río Maule (-35.5°S). Más al sur, la influencia sobre la topografía, de los procesos glaciales y fluglaciales del Holoceno tardío y moderno, en conjunto con el vulcanismo activo (Brenning, 2005b), inhiben su desarrollo, pero dan paso a la presencia abundante de glaciares.

Perspectivas y desafíos

Aunque en las últimas décadas ha aumentado la comprensión en cuanto al estudio de los glaciares rocosos, se recomienda el uso adecuado en cuanto a la terminología que distingue origen, localización, procesos y dinámica de los glaciares rocosos.

El rol hídrico de estos glaciares, en especial de los que están localizados en zonas áridas, en las cuales ha habido una disminución importante de las precipitaciones nivales y de ausencia de glaciares, debe ser estudiado, debido a que podrían ser componentes cruciales en cuanto a su rol como reservorios hídricos, en conjunto con el rol de la capa activa de ellos y su función como acuífero temporal.

Aunque la contribución hídrica de los glaciares ha sido escasamente estudiada, es probable que el descongelamiento de zonas con permafrost rico en hielo (e.g. glaciares rocosos intactos) incremente la descarga de los ríos durante estaciones secas en regiones áridas. Aún se requiere una mayor comprensión acerca del aporte de éstos a la escorrentía a los ríos.



La degradación natural y antrópica del permafrost de montaña rico en hielo en depósitos detríticos (i.e. glaciares rocosos intactos) incrementa la probabilidad de deslizamiento de rocas, derrumbes y flujos detríticos, aumentando el riesgo para las personas y la infraestructura en zonas de montaña.

Métodos de investigación de los glaciares rocosos

Alexander Brenning / Instituto de Geografía, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Alemania.

Los glaciares rocosos (también llamados glaciares de escombros o de roca) son un fenómeno muy común en el ambiente periglacial andino, cuya importancia en los Andes chilenos fue reconocida muy tempranamente por Louis Lliboutry, a partir de la década de 1950.

Durante las décadas recientes, importantes avances se han hecho en el desarrollo de tecnologías de geomática y geofísica, los que han permitido mejorar los conocimientos de la composición interna, la dinámica y la posible respuesta de los glaciares rocosos a los cambios climáticos pasados y futuros.

Esta contribución es una síntesis de los métodos actuales que se utilizan en la investigación de los glaciares rocosos, haciendo referencia principalmente a trabajos realizados en años recientes en la cordillera de Chile.

Louis Lliboutry reconoció a partir de la década de 1950 la importancia de los glaciares rocosos en los Andes chilenos al mapear su distribución en el alto río San Francisco, Andes de Santiago, en la actual zona minera de Los Bronces.

Lliboutry no sólo describió varios glaciares rocosos en detalle en terreno, sino también trató de aclarar su relación con los glaciares (principalmente cubiertos) de la región, tomando una posición glaciológica al negar la posibilidad de ser fenómenos o indicadores del permafrost de montaña (Lliboutry, 1986). Al caracterizar varios de estos *ice-debris landforms* (Berthling, 2011) —glaciares rocosos y glaciares cubiertos—, desarrolló modelos conceptuales de su formación.

Sus publicaciones sobre el ambiente periglacial y los glaciares rocosos comienzan en los años 1950 en francés, inglés y polaco (Lliboutry, 1953, 1955, 1957, 1961), y en 1986, Lliboutry presentó «el artículo más completo que he publicado sobre mis observaciones» (dedicación escrita a mano en una copia disponible en la biblioteca del IANIGLA, Mendoza, Argentina), en inglés y en ruso (Lliboutry, 1986).

En retrospectiva es muy lamentable que Lliboutry no contribuyera en forma más continua al estudio de los glaciares rocosos en Chile, y al intenso debate acerca de los procesos de formación que se desarrollaron desde las décadas de 1970 a 1990 entre varios autores internacionales.

Desde la perspectiva contemporánea, es un interesante pasatiempo intelectual el imaginarse de qué métodos el glaciólogo francés podría servirse hoy día, a más de 60 años de sus primeras publicaciones, para

aproximarse a los temas actuales de investigación, muchas veces relacionados con los efectos del cambio climático y con la relevancia de los glaciares rocosos para las actividades humanas.

Métodos actuales para la investigación de glaciares rocosos en el contexto chileno

El mapeo de los glaciares rocosos a partir de imágenes de percepción remota es un paso indispensable para conocer su importancia a nivel regional como cuerpos de hielo, movimientos en masa e indicadores de permafrost (ver contribución de G. Azócar en este libro; Brenning, 2005).

Las imágenes satelitales de alta resolución (<2 m idealmente) han llegado a ser una base de datos adecuada que está disponible a nivel mundial desde comienzos de la década del 2000, y que permite reemplazar el análisis de fotografías aéreas (ver mapa de Lliboutry, 1961) con sus complejas distorsiones.

En los años recientes se han hecho importantes avances hacia el mapeo automático de los glaciares rocosos utilizando imágenes satelitales de alta resolución y características de la textura que detectan las estructuras de flujo (Brenning *et al.*, 2012a). Más allá del mapeo, se han utilizado los modelos de estadística espacial para analizar la distribución de los glaciares rocosos y para mapear la distribución del permafrost de montaña en relación con las características geomorfológicas y climáticas (Brenning & Azócar, 2010; Azócar *et al.*, 2017).

Estos modelos también muestran un gran potencial en la identificación de posibles inestabilidades en los glaciares rocosos (Marcer *et al.*, 2018).

Monitoreo de la deformación

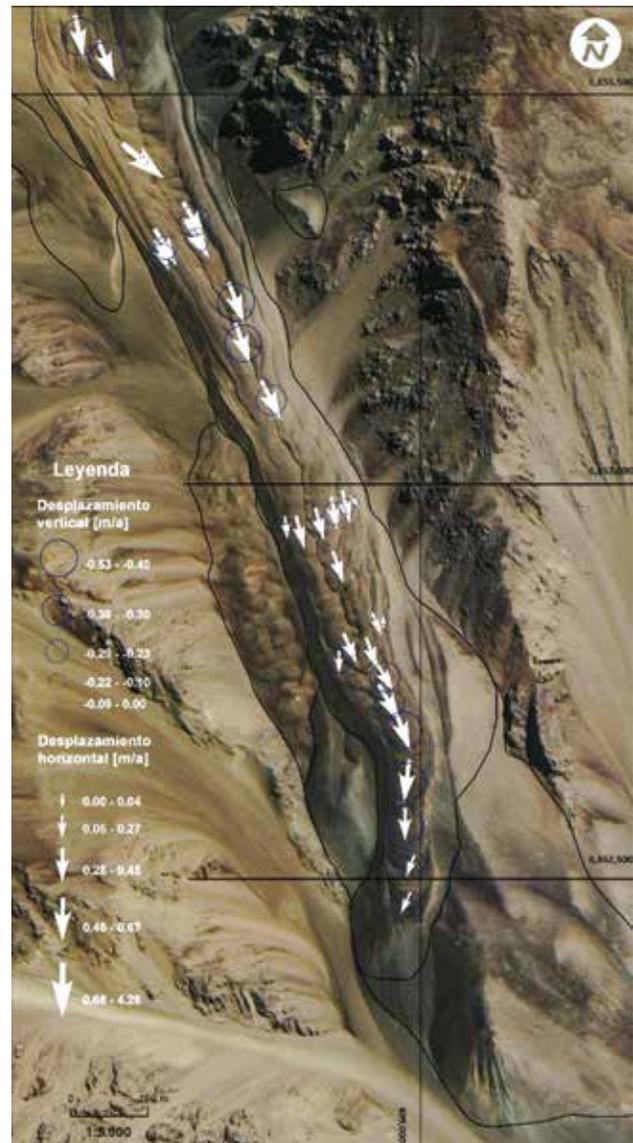
La actividad de un glaciar rocoso se manifiesta en su desplazamiento, y su degradación a través de la pérdida de hielo e incluso su posible aceleración y colapso (Bodin *et al.*, 2009). Es por ello que el monitoreo de la deformación de los glaciares rocosos ha generado un creciente interés en el contexto del cambio climático.

Informaciones sobre la deformación también permiten validar modelos físicos del movimiento y corroborar las hipótesis relacionadas con los procesos de formación (Monnier & Kinnard, 2016), y evaluar la

estabilidad de glaciares rocosos intervenidos por obras mineras (Contreras & Illanes, 1992).

El seguimiento de puntos de control en terreno usando sensores GNSS (más comúnmente conocidos como GPS) es el método más directo y preciso, pero también más laborioso para la medición del movimiento (Bodin *et al.*, 2010a, ver Fotografía; DGA-UGN, 2010).

Estos datos también son necesarios para calibrar y validar las mediciones de cambios de altura realizadas con métodos de percepción remota. Además del método Lidar (aéreo), destacan las imágenes ópticas de alta resolución, tomadas desde un avión (Bodin *et al.*, 2010b),



Desplazamientos verticales y horizontales del glaciar rocoso Llano de las Liebres medidos con GPS RTK entre diciembre 2009 y abril 2010. Río La Laguna, cuenca superior del río Elqui. Datos: DGA-UGN (2010); elaboración: G. Azócar.

satélite (Bodin *et al.*, 2018) o, más recientemente, dron (Goetz *et al.*, 2018). La interferometría radar (InSAR) es otro método muy prometedor para la detección de deformaciones (Bodin *et al.*, 2018), si bien su uso se complica en zonas de montaña.

Para medir la deformación interna de los glaciares rocosos se requiere de perforaciones equipadas con inclinómetros (Contreras & Illanes, 1992; Arenson *et al.*, 2002), método poco aplicado debido al alto costo de perforaciones y la inevitable destrucción de las perforaciones debido a la misma deformación.

Monitoreo de condiciones térmicas

Las observaciones de las condiciones térmicas de los glaciares rocosos son de suma importancia para poder evaluar su evolución y posible degradación, y por lo tanto para entender los posibles impactos del cambio climático en su dinámica y aporte hidrológico. El monitoreo térmico en muchos casos se limita a la capa activa del glaciar rocoso debido a la mayor factibilidad de las perforaciones. Ello permite confirmar la presencia de permafrost y la profundidad de la capa activa (DGA-UGN, 2010), y en el más largo plazo, identificar tendencias relacionadas al cambio climático (en Argentina: Trombotto & Borzotta, 2009).

Las temperaturas superficiales muchas veces se utilizan como indicador indirecto de las condiciones térmicas del suelo. En los Andes chilenos se han caracterizado los patrones térmicos espaciales en relación a la radiación, duración de la cubierta nival, y otros parámetros (Apaloo *et al.*, 2012; DGA-UGN, 2010). La temperatura invernal bajo una cubierta nival se ha introducido en los Alpes como indicador más específico cuyo uso, sin embargo, está más limitado en climas secos (Apaloo *et al.*, 2012).

Los métodos de percepción remota permiten caracterizar las condiciones térmicas de la superficie de los glaciares rocosos, e incluso muestran potencial para la caracterización física de la capa activa a través de la inercia térmica (Brenning *et al.*, 2012b).

Investigación de la estructura y composición interna

Uno de los mayores desafíos en el estudio de los glaciares rocosos es la investigación de su estructura y composición interna. Las observaciones directas están limitadas a los cortes (Lliboutry, 1986) y las calicatas (Contreras & Illanes, 1992), como también las perforaciones con

sacatestigos (Arenson *et al.*, 2002), las cuales son costosas y pueden sufrir de una fuerte pérdida de hielo por los efectos del calentamiento por fricción (Monnier & Kinnard, 2017).

Es por ello que los métodos de geofísica han jugado un importante rol en la investigación de los glaciares rocosos desde sus comienzos, en la década de 1950 (Wahrhaftig & Cox, 1959) y hasta el día de hoy (Hauck, 2013). Entre los actuales métodos destacan la geoelectrónica, la geoelectromagnética, la sísmica y el radar de sondeo terrestre (GPR), los cuales permiten, en cierta medida, detectar los límites verticales y laterales de cuerpos de hielo y, en términos relativos, el contenido de hielo.

Estos métodos han contribuido en forma significativa al conocimiento actual de la composición interna de los glaciares rocosos en Chile (Contreras & Illanes, 1992; Milana & Güell, 2008; Monnier & Kinnard, 2015, 2017), renovando también el interés en cuestiones fundamentales relacionadas con la evolución de los glaciares rocosos y su relación con los glaciares cubiertos, tema de gran interés para Louis Lliboutry (Lliboutry, 1953, 1955, 1986).

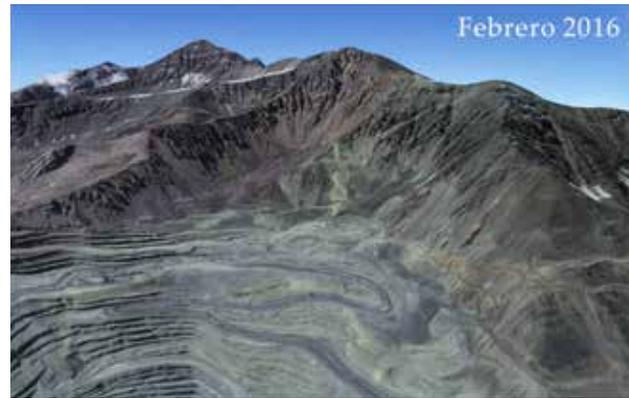
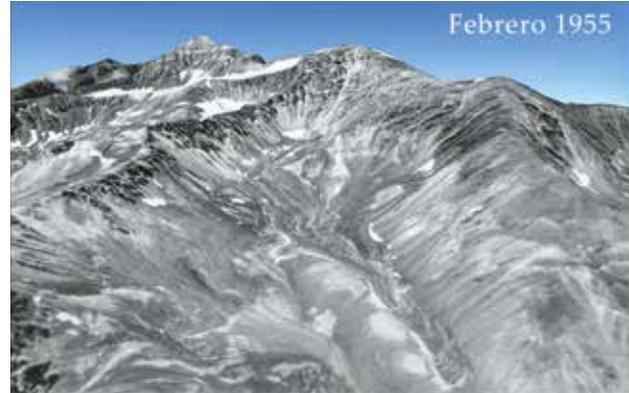
Entre los desarrollos más recientes en la geofísica del permafrost están la combinación matemática de varios métodos geofísicos para la estimación cuantitativa de los contenidos de hielo, aire y roca, y el monitoreo de glaciares rocosos con redes geofísicas permanentemente instaladas (Hauck, 2013).

Caracterización hidrológica

La caracterización del rol hidrológico de los glaciares rocosos es un tema importante y complejo que requiere de más estudios, sobre todo en los Andes semiáridos (Azócar & Brenning, 2010). La estimación del contenido de hielo de los glaciares sólo puede ser un comienzo en su valorización.

Mientras que los métodos de geofísica son claves a nivel local, investigando glaciares rocosos individuales (Milana & Güell, 2008), se pueden aplicar modelos estadísticos para obtener estimaciones a nivel de cuenca (Brenning, 2005; Azócar & Brenning, 2010).

Los caudales generados por los glaciares rocosos y sus cuencas hidrográficas (p.ej., Marangunic, 1976) son principalmente flujos subterráneos, difíciles de monitorear en cuerpos sedimentarios complejos de montaña (Harrington *et al.*, 2018).



Glaciar rocoso Infernillo. Fotografía izquierda: archivo Lliboutry, 1953. Derecha, arriba: Fotografía aérea Hycon del 23 de febrero de 1955. Derecha, abajo: complejo minero Los Bronces, de Anglo American, estudiado por Contreras & Illanes.

Los métodos hidrogeoquímicos de trazadores ambientales (p.ej., ciertos isótopos) y artificiales permiten medir la velocidad de flujo, el tiempo de tránsito, los caudales, y también la conectividad en complejos sistemas hidrológicos (Williams *et al.*, 2006; Crespo *et al.*, 2018). Otro método que opera a escalas de tiempo más largos es el estudio de cambios verticales en los glaciares rocosos, similar a la medición de los balances de masa con el método geodésico (Bodin *et al.*, 2010b).

Conclusiones

Si bien varios métodos de investigación que hoy se aplican a los glaciares rocosos así como varios métodos geofísicos y geodésicos, ya estaban disponibles desde la década de 1950, también se han hecho avances sustanciales en su precisión y combinación durante las décadas pasadas.

Los métodos Lidar y los drones, como también los nuevos métodos matemáticos para la inversión de datos de sondeos geofísicos, son quizás los avances más significativos y prometedores en este contexto.

Con el aumento en la cantidad de los datos generados con estos métodos y la complejidad de los modelos matemáticos necesarios para su procesamiento, el estudio de los glaciares rocosos en la actualidad se ha convertido en un área fuertemente computacional.

Lo que no ha cambiado desde los trabajos tempranos de Louis Lliboutry es la necesidad de realizar largas campañas de adquisición de datos en terreno. Por ello es indispensable que jóvenes investigadores sigan el ejemplo de Louis Lliboutry, quien combinó en sus estudios la detallada observación en terreno con los modelos físicos y matemáticos.



El monitoreo de la deformación de los glaciares rocosos ha generado un creciente interés en el contexto del cambio climático.

Impactos de la evolución de los glaciares rocosos en los Andes semiáridos

Xavier Bodin / Laboratorio EDYTEM, UMR 5204, CNRS, Universidad Savoie Mont-Blanc, Le Bourget-du-Lac, Francia.

Siendo cuerpos de permafrost rico en hielo, los glaciares rocosos son impactados por los efectos regionales del cambio climático global pero también se encuentran afectados por ciertas actividades humanas desarrolladas en los ambientes periglaciales de la alta montaña. En los Alpes, está bien documentada la variación interanual de los movimientos de los glaciares rocosos, con dos fases de aceleración mayor (1990 y desde 2008) que resultaron en velocidades nunca medidas en las décadas anteriores. Esto coincide con la evolución del estado térmico del suelo, el cual se está calentando por efecto del cambio climático global, pero también con un aumento correlativo de la cantidad de agua líquida en el permafrost.

En los Andes semiáridos, se pueden ver las consecuencias de la degradación del permafrost de montaña, como por ejemplo escasas pero intensas desestabilizaciones de glaciares rocosos observados en Chile. Además de ser afectada por el calentamiento global, esta criósfera 'escondida' es a veces impactada por la explotación intensa de los recursos. En retorno, los fenómenos desencadenados por las interacciones entre causas naturales y antrópicas pueden amenazar las actividades humanas.

Fenómenos geomorfológicos intensos pueden amenazar los valles de montaña

Durante la primavera austral del año 2005 ocurrió el colapso de un glaciar rocoso ubicado en la ladera oeste del cerro Las Tórtolas (IV Región), entre 4.700 y 4.300 m de altitud. Después de desprenderse, la masa de detritos mezclados con hielo y nieve fluyó aguas abajo, canalizado por un talweg, y la cabeza del depósito se inmovilizó a 3 km más abajo. Aunque no se sabe mucho de las causas exactas debido a la escasez de datos, este fenómeno parece ser una consecuencia del alza de las temperaturas del suelo combinada con un aporte notable de agua proveniente del derretimiento de la capa de nieve.

Como en otras montañas del mundo, el calentamiento global no sólo aumenta la deformación de los glaciares rocosos, sino que también, cuando la pendiente

de la ladera es suficientemente fuerte, provoca una desestabilización del terreno con la aparición de grietas de extensión, la desestructuración de la morfología inicial y, por ende, el posible colapso de la masa inestable.

Gracias a iniciativas a larga escala impulsadas por autoridades nacionales, Chile y Argentina poseen inventarios exhaustivos de los glaciares rocosos (ver artículo de G. Azócar en este libro). Eso y los estudios recientes (Azócar *et al.*, 2017; Bodin *et al.*, 2018; Villarroel *et al.*, 2018) proporcionan ahora una visión mucho más completa de los glaciares rocosos de la que tenían los científicos y la sociedad en general hace sólo quince o veinte años. En los años 70, el conocimiento estaba basado casi integralmente en los trabajos pioneros de Louis Lliboutry, los cuales guiaron los primeros inventarios producidos en Chile (Marangunic, 1979) y en Argentina (Corte & Espizua, 1981).

En complemento de los nuevos inventarios que proporcionan una descripción completa pero estática (Azócar *et al.*, 2017; IANIGLA, 2010), se usaron métodos de teledetección (como la interferometría radar) para detectar los movimientos de cientos de glaciares rocosos en la región de los Andes semiáridos. Así, sabemos que en la década de 2010, un 20% de los 200 glaciares rocosos mapeados en el sector Agua Negra-Tapado presentaron velocidades altas (> 50 cm/a), mientras se observó, como en los Alpes, una aceleración entre 2012 y 2017 (Bodin *et al.*, 2018).

En 2018, una gira de reconocimiento de los miembros de la sección Alpes occidentales de la International Glaciological Society, acompañados por científicos del IANIGLA (Mendoza, Argentina) y del CEAZA (La Serena, Chile), en el sector del paso fronterizo Agua Negra, permitió reconocer muchas evidencias de desestabilización de glaciares rocosos.

En honor a Louis Lliboutry y a sus estudios precursores de los glaciares de los Andes de Santiago, y por estar ubicado en una ladera del cerro Olivares, uno de ellos fue nombrado Olivares Theta y fue estudiado

mediante un relevamiento drone. Su alta dinámica podría amenazar el camino internacional y el proyecto de un túnel transfronterizo que se desarrolla a mil metros aguas abajo.

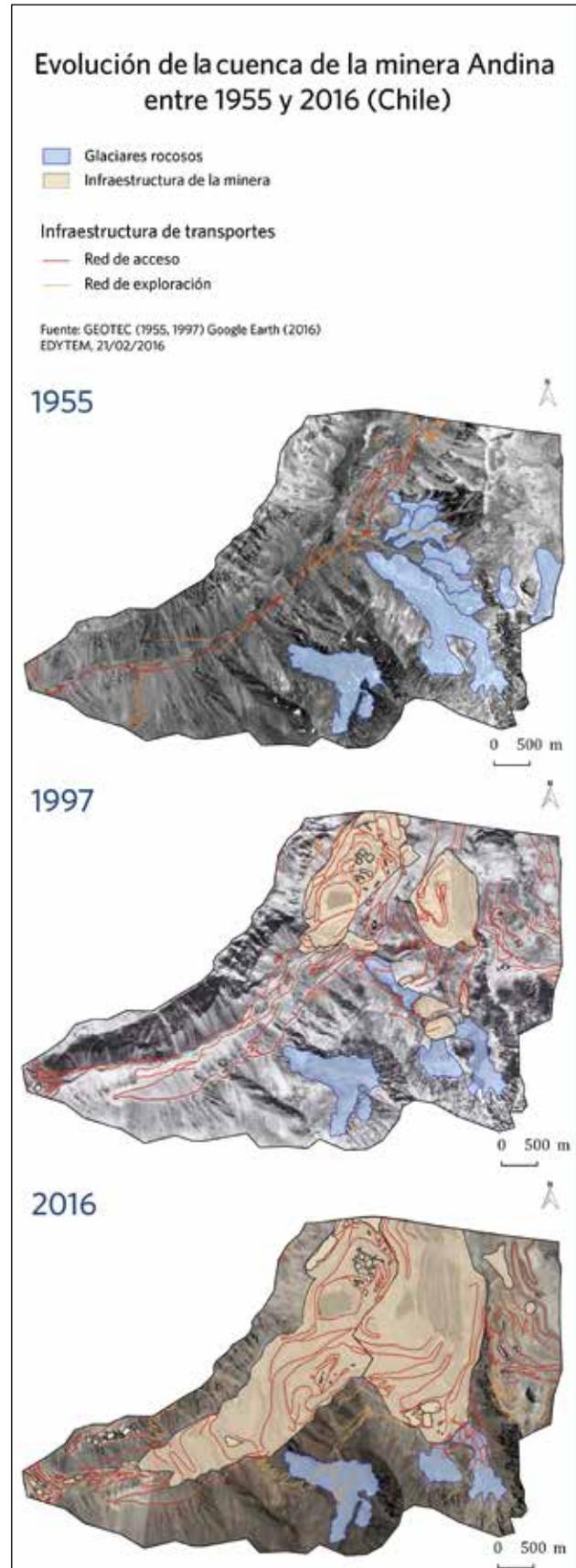
Interacciones entre dinámicas naturales y antrópicas: impactos sobre el medio ambiente y la sociedad

A través de los estudios llevados a partir de los años 2000 se conocieron mejor los impactos de la minería sobre los glaciares rocosos, una de las actividades más desarrolladas en la alta cordillera de los Andes semiáridos. Si bien existen otros tipos de intervenciones en alta montaña, en dicha región se puede observar uno de los casos más importantes conocidos en el mundo. En Chile, según observaciones de imágenes satelitales de 2016, en el complejo minero Andina/Los Bronces Figura 1, ubicado a menos de 50 km en línea recta del centro de Santiago, un tercio de los glaciares rocosos presentes en 1955 habían sido removidos por la actividad minera (Capus, 2016).

En la porción de la cordillera chilena comprendida entre Copiapó y Rancagua (Brenning & Azócar, 2010) calcularon que los proyectos mineros, en el 2010, ya habían impactado 4,5 km² de glaciares rocosos, lo cual equivaldría a casi 24.106 m³ de agua. Las intervenciones consisten en la remoción de formas (para sondaje, caminos o excavación) o el depósito de lastre (material excavado y procesado para extraer el mineral), pero también modificaciones de las calidades o del régimen de los ríos pueden impactar los territorios aguas abajo.



En Argentina, el caso del derrame de más de un millón de litros de agua contaminada por cianuro en el río Jachal, provincia de San Juan, en septiembre de 2015, plantea la pregunta sobre las responsabilidades de los impactos de las actividades mineras. En efecto, tras este evento que perjudicó a las comunidades del piedemonte, el poder judicial argentino decidió procesar al director del inventario nacional de la criósfera, Ricardo Villalba. Se atacó duramente a un destacado científico, mundialmente renombrado, uno de los que mejor conoce y que más actuó para proteger la criósfera.



¿La contaminación atmosférica también puede afectar el derretimiento de los glaciares?

Francisco Cereceda / Profesor titular del Departamento de Química, director del Centro de Tecnologías Ambientales, Universidad Técnica Federico Santa María.



Exploración del glaciar Grey, en el Parque Nacional Torres del Paine, Región de Magallanes y de la Antártica chilena.

Los glaciares juegan un rol clave en la regulación del balance climático global y de las temperaturas del planeta, conservando más del 75% del agua dulce de la hidrosfera. También cumplen un papel económico, social y cultural, siendo esenciales para la biodiversidad de nuestro hábitat, pues ellos sustentan toda una trama de servicios ecosistémicos. Una de las principales funciones de los glaciares es por supuesto acumular agua

en forma sólida durante el invierno, para suministrarla durante el período estival o en épocas de sequía, permitiendo amortiguar la falta de agua durante estos períodos, como parte del ciclo hídrico.

A nivel planetario, debemos entender que estamos atravesando actualmente por una etapa de desglaciación, lo que significa que los glaciares van a desaparecer inevitablemente, aunque esto nos parezca dramático;

sin embargo, la escala de tiempo de estos fenómenos son de decenas a cientos de miles de años. Adicionalmente, y producto del cambio climático global, se está produciendo un retroceso de estos glaciares a escala global a una velocidad mayor que la natural, debido obviamente, al aumento de la temperatura.

A nivel local, la velocidad del derretimiento de los glaciares puede aumentar, por efecto de la acción antropogénica directa, debido a los contaminantes que se emiten por actividades como las fuentes móviles (automóviles, buses y camiones), fuentes fijas (industrias varias), y diversos procesos de combustión (quema de biomasa), entre otras; contaminantes atmosféricos que son capaces de transportarse desde las grandes ciudades hasta los glaciares de montaña.

Estos contaminantes se depositan sobre la nieve, cambiando drásticamente sus propiedades fisicoquímicas, generando su derretimiento y por ende acelerando el retroceso de los glaciares aún más, deteriorando el albedo de esta parte de la criósfera, modificando el efecto invernadero de la Tierra e impactando sobre el clima, tanto a nivel local, regional como global.

Contaminación atmosférica y cambio climático

La contaminación atmosférica es un importante problema a nivel mundial. Las diversas actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, diversos procesos industriales y la disminución de la superficie de bosques, han producido niveles crecientes de contaminación, alterando el clima a nivel global. El Panel Intergubernamental para Cambio Climático (IPCC, 2001) estimó que la temperatura media mundial se elevará varios grados centígrados durante este siglo.

Esto se debe al aumento en la concentración de gases y aerosoles que tienen la capacidad de absorber la radiación solar y volver a emitir en forma de calor a la atmósfera, aumentando así la temperatura superficial del planeta (Seinfeld y Pandis, 2006).

Los contaminantes atmosféricos de origen antropogénico que contribuyen al cambio climático son gases como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), ozono troposférico (O_3), óxido nitroso (NO) y los hidrofluorocarbonos (HFC), entre otros (EPA, 2012), siendo el black carbon (carbono negro-BC) y el material particulado fino (MPF) los únicos que no son propiamente gases, sino aerosoles (AIDA y IEMA, 2016).

El cambio climático conlleva la alteración de los sistemas biofísicos y ecológicos de la Tierra (IPCC, 2001), lo que afecta de manera indirecta a la salud humana a través de la alteración del alcance de vectores y patógenos, calidad del agua y del aire, entre otros. Además, afecta de manera directa a la salud, como consecuencia del aumento de la superficie planetaria con temperaturas extremas, a través de pérdida de vidas, lesiones en inundaciones y tormentas, entre otras (OMS, 2003).

La mayoría de los gases de efecto invernadero (GEI) como el CO_2 (5-200 años o más) y NO (114 años o más), poseen vidas medias que varían entre años y siglos o más, dependiendo de la eficacia de los procesos de eliminación de la atmósfera (Seinfeld y Pandis, 2006; EPA, 2012); sin embargo, otro grupo de contaminantes tienen tiempos promedio de residencia más cortos, pero con iguales o incluso mayores efectos sobre el CC.

Estos contaminantes son denominados contaminantes de vida media corta (CVMC) y tal como su nombre lo indica, residen en la atmósfera durante un período que varía entre días y semanas a algunos años (Vallero, 2008). Entre los principales CVMC se encuentran los aerosoles, donde destacan el MPF y el BC (con tiempos de vida media entre horas, días, hasta una semana, dependiendo de las condiciones atmosféricas), CH_4 , O_3 troposférico y algunos HFC. El IPCC (2001) estimó que, en conjunto, los CVMC son responsables de más del 30% del calentamiento climático global, aunque otros estudios calculan que ese porcentaje sería aún mayor, entre 40 y 45% (IGSD, 2015).

Tanto el BC como el MPF son parte de los aerosoles atmosféricos que son emitidos por distintos procesos de combustión de combustibles fósiles o biomasa. El BC es emitido directamente a la atmósfera en forma de MPF, específicamente como $\text{MP}_{2.5}$ (EPA, 2012), y posee un alto potencial de efecto invernadero, posicionándolo en segundo lugar de importancia después del metano, respecto de sus efectos sobre el CC.

Su cuantificación y entendimiento es clave para poder evaluar los impactos de los aerosoles sobre el clima, siendo un tema de creciente interés sobre todo para las grandes ciudades, por sus adicionales impactos sobre la salud de la población y su transporte hasta los glaciares de montaña (Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis. Chapter 5. Aerosols, their Direct and Indirect Effects [IPCC]).

Transporte de contaminantes y su impacto en la cordillera de los Andes

Nuestro país posee la porción más extensa de esta parte de la criósfera andina, unos 90 glaciares que cubren 116 km² en la zona norte; en el centrosur se han inventariado sobre 1.320 glaciares que suman más de 900 km²; en la zona sur existen casi 400 km² de hielo distribuidos en cerca de 300 glaciares, y en la Patagonia chilena suman alrededor de 20.000 km², donde Campo de Hielo Sur es la segunda masa de hielo continua y extrapolarse más extensa del mundo. La evidencia científica indica que la criósfera de la cordillera de los Andes ha respondido al cambio climático manifestándose en un retroceso de los glaciares y de la capa de nieve, hecho que podría tener grandes implicaciones en la disponibilidad de recursos hídricos en el corto plazo (Molina *et al.*, 2015).

Existen variados estudios que han permitido relacionar la deposición de aerosoles asociados a fuentes de quema de biomasa, y de origen urbano-industrial y sus efectos sobre el retroceso de glaciares, los cuales muestran que el transporte de BC y partículas, desde largas y cortas distancias, es capaz de llegar hasta los glaciares de montaña (Cereceda-Balic *et al.*, 2012; Longo *et al.*, 2009; Mena-Carrasco *et al.*, 2014).

En este sentido, el BC ha demostrado tener una gran influencia sobre el calentamiento climático del planeta mediante su influencia en el balance radiactivo atmosférico, tanto a escala regional como global (Bond *et al.*, 2013; Hansen y Nazarenko, 2004; Ramanathan y Carmichael, 2008).

Otro aspecto importante es el cambio en la reflectividad de la superficie del planeta y el consiguiente cambio en el albedo, ya que cuando el BC se deposita sobre la

Búsqueda de grietas en el glaciar Bello, cordillera de los Andes.

El Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM) de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) ha desarrollado desde el año 2003 un programa de monitoreo y caracterización fisicoquímica de aerosoles y nieve, así como meteorología y medición de albedo en glaciares de los Andes centrales de Chile hasta la Antártica. Esto ha permitido realizar campañas de monitoreo específicamente en La Parva, El Colorado y los glaciares Echaurren, Bello y Olivares Alfa (en las cercanías de la Región Metropolitana), además de los glaciares de los volcanes Nevados de Chillán y Villarrica (en la Octava y Novena Región), Mocho Choshuenco en Valdivia; el cerro Mirador en Punta Arenas; el glaciar Grey y Campos de Hielo Sur en los Andes Patagónicos y en la Plataforma de hielo Larsen C, el glaciar La Paloma y Laclavère, ubicados en la península antártica. Se trata de una investigación pionera en Sudamérica.



nieve y el hielo, genera un «oscurecimiento» de la superficie impactada y la conversión de la radiación solar absorbida adicional en radiación IR, lo que puede acelerar la fusión o sublimación de la nieve y el hielo, siendo el BC aproximadamente 50 veces más eficaz que el polvo y 200 veces más eficaz que la ceniza volcánica en la reducción del albedo de la nieve (Warren S., *et al.*, 1984). La deposición de BC en la nieve es una creciente preocupación en zonas de alta montaña y glaciares, principalmente debido al rol que juega en el balance de masa de estas zonas y la alteración de las propiedades de la nieve y el hielo (Bond *et al.*, 2013).

La evidencia científica indica que la criósfera de los polos y la mayoría de las grandes cordilleras del mundo han respondido al CC evidenciando un retroceso de los glaciares y la capa de nieve, afectando la disponibilidad de recursos hídricos (Menon *et al.*, 2010; Molina *et al.*, 2015). Parte de esta pérdida de masa glaciar está relacionada con altos niveles de contaminación regional y local, identificándose la presencia de aerosoles atmosféricos, donde el BC ha jugado un rol importante en este fenómeno climático [Menon *et al.*, 2010; Menegoz *et al.*, 2013 y 2014]. Muchos de estos contaminantes, incluidos el BC, pueden ser atribuidos a una fuente específica. Por ejemplo, algunos iones como nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) pueden asociarse a la quema de combustibles fósiles del tráfico y la industria; el amonio (NH_4^+) puede ser atribuido a la actividad agrícola y pecuaria (Schwikowski, *et al.*, 2010); el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}) pueden ser usados como trazadores de aerosoles crustales; el Potasio (K^+) puede ser trazador tanto de aerosoles crustales como de quema de biomasa (Schwikowski, *et al.*, 1999, Kaspari, D., 2011).

Algunos metales pesados, como el Cu, As, Pb, Cd, Sn, Sb (Alastuey, 2006), entre otros, pueden ser atribuibles a la minería metálica (típicamente fundiciones de cobre), Ni y Va pueden ser usados como trazadores de refinerías de petróleo y Hg como trazador de termoelectricas a carbón, entre otros. Todos estos antecedentes demuestran que al igual que en el resto del mundo, en Chile hay un número importante de centros urbanos, con parques industriales de diversos tamaños, cuyas emisiones pueden alcanzar potencialmente los glaciares de montaña. Sin embargo, el impacto potencial de los aerosoles y del BC en la capa de nieve de los glaciares de los Andes, y en especial de Chile, ha sido explorado sólo en forma muy escasa por medio de mediciones directas (Molina *et al.*, 2015).



Profesor Dr. Francisco Cereceda (a la derecha) y su equipo, en el glaciar Grey, en el Parque Nacional Torres del Paine, Región de Magallanes y de la Antártica chilena.

El equipo del Dr. Cereceda-Balic demostró por primera vez, en el año 2012, la presencia de elementos traza de origen antropogénico en precipitaciones de nieve en el área de cerro Colorado (CCo), ubicado en los Andes centrales a 3.000 msnm y a unos 40 km a NE del área de la Región Metropolitana, indicando que se ve afectada por las emisiones atmosféricas urbanas de Santiago de Chile, encontrándose un enriquecimiento significativo para distintos elementos traza (Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Ni, V, Mn, Co, Ba, Mo y Sb), relacionados con fuentes antropogénicas, como el tráfico, procesos de fundición, incineración de basura y quema de biomasa y carbón (Cereceda-Balic *et al.*, 2012). Por otra parte, se tomaron muestras de nieve entre 1.500 y 1.700 m.s.n.m. en Nevados de Chillán (NCH), cordón montañoso ubicado a 500 km al sur de la ciudad de Santiago de Chile, tomando este punto de monitoreo como lugar de referencia, por estar mucho más lejos de fuentes importantes de tipo urbano industrial y como contraste con relación al sector de CCo. Los resultados mostraron que las concentraciones de elementos traza medidos en CCo son muy superiores a los encontrados en otras partes de la criósfera del mundo y descritas en la literatura. Las diferencias fueron especialmente significativas en los casos de As, Pb, Cd, Mn, Co, Ba, Cu, Zn y Mo, mientras que las concentraciones de Ni y V fueron sólo ligeramente más altas que las reportadas en la literatura.

Las concentraciones de Cr y Sb en la nieve de CCo fueron similares o inferiores a los valores informados previamente en áreas de fondo regional (*background*).

Estos resultados demuestran que existe un significativo impacto de las fuentes de emisión de la ciudad de Santiago de Chile en el área, pero también reflejan el impacto de las actividades de extracción minera y de funciones de minería metálica. La proximidad de las operaciones de extracción de cobre en Los Bronces (40 km al noroeste del área de muestreo de CCo) probablemente esté relacionada con los altos valores de Cu y de otros metales asociados con este elemento observado en las muestras de nieve recolectadas. La mina El Teniente y la fundición de cobre de Caletones (95 km SW) también pueden estar relacionadas con los altos niveles de enriquecimiento de algunos elementos en la nieve de CCo, como resultado del transporte de material particulado hasta esta zona de la criósfera de los Andes. Niveles elevados de Cu, Zn y As fueron medidos por Romo-Kröger *et al.* (1994) en material particulado recolectado en los alrededores de El Teniente y Caletones.

Las muestras de nieve tomadas en Nevados de Chillán presentaron rangos de concentración similares para elementos antropogénicos como los valores descritos en la literatura para la mayoría de los elementos, excepto por valores algo elevados de Pb, Cd, Cu y Mo. Nevados de Chillán fue seleccionado como referencia regional en nuestro estudio, sin embargo, los datos experimentales muestran que este sitio también presenta un grado significativo de impacto antropogénico.

Esto puede deberse a las actividades del centro de esquí que se encuentra en las cercanías, pero no se puede descartar el transporte desde fuentes regionales de tipo urbano-industriales, incluidas las emisiones de Chillán (60 km NO) y Concepción (130 km W). En nuestro país, el comportamiento de la dinámica atmosférica local y regional contribuye al transporte de contaminantes desde los sectores urbano-industriales, ubicados generalmente en la costa y/o en los valles centrales de



NUNATAK-CHILE, primer laboratorio móvil para estudios de la criósfera en Portillo, sector de la Escuela de Alta Montaña del Ejército de Chile.

El Centro de Tecnologías Ambientales de la Universidad Técnica Federico Santa María (CETAM) ha desarrollado un laboratorio móvil autónomo que actúa además como refugio, bajo el proyecto «NUNATAK-CHILE, Primer Laboratorio Natural sobre Contaminación Glaciar y Cambio Climático: Levantamiento de Línea de Base para el Cambio Climático».

Está concebido para usarlo como laboratorio-refugio en zonas extremas, como las de montaña. Este laboratorio cuenta con un sistema de energía limpia basada en paneles fotovoltaicos y con todas las condiciones para ser usado como habitáculo para los investigadores y la instalación de instrumentos de monitoreo de contaminantes atmosféricos, incluyendo meteorología, albedo, BC, MPF y química de nieve).

nuestra geografía y en donde las masas de aire del SW se transportan desde la costa hacia las laderas de la cara oeste de los Andes, pudiendo llegar hasta sus glaciares, especialmente bajo condiciones sinópticas favorables con elevada turbulencia atmosférica.

Finalmente, y para evaluar la comparación entre ambos sitios de muestreo se utilizaron los valores promedios de las concentraciones de los elementos medidos en las muestras de nieve y se calcularon los cocientes entre la (concentración de elementos en CCo) / (concentración de elementos en NCH). Según esto, los cocientes más altos fueron los encontrados en cerro Colorado respecto de los Nevados de Chillán, con cocientes de concentración que varían de entre 2,2 (Cd) y 108,1 (V).

Los cocientes de concentración promedio se calcularon para grupos de elementos vinculados a fuentes específicas, con el cociente promedio más alto encontrado para las fuentes de tráfico (30,4), seguido de la quema de biomasa y carbón (17,0), asociados a fundiciones de cobre (16,8) e incineración de basura (6,3). Estos resultados preliminares confirman el impacto predominante de las fuentes de emisión de tráfico urbano sobre la composición de la nieve recolectada en el cerro Colorado, con una contribución significativa de actividades asociadas a fundiciones de cobre y combustión. Esta investigación pudo demostrar por primera vez la presencia de contaminantes atmosféricos en muestras de nieve tomadas en la cordillera de los Andes en Chile, así como la asignación de las fuentes más probables de esta contaminación, indicando que la nieve es además un excelente medio para poder observar el transporte de contaminantes por medio de la atmósfera y su posterior deposición sobre la nieve de la criósfera andina.

Otros resultados que confirman la importancia de la contaminación en la cordillera de los Andes son las campañas de monitoreo desarrolladas por CETAM en los glaciares Bello (GB, 33° 31' 56" S; 70° 13' 15" O) y Olivares Alfa (GOA, 33° 11' 37" S; 70° 13' 15" O), ubicados en la alta montaña de la Región Metropolitana, entre los 4.280 y 4.500 msnm, respectivamente.

El GB se considera, por su ubicación geográfica y su lejanía con las fuentes de emisión antropogénicas, como control (lugar limpio); por el contrario, el GOA se considera como posiblemente más impactado, primero por su mayor cercanía con fuentes antropogénicas como la ciudad de Santiago (47 km desde el centro de la ciudad),

por estar en la dirección de los vientos predominantes de esta ciudad hacia la cordillera y finalmente por tener muy cerca megaproyectos de extracción minera a tajo abierto, perteneciente a las empresas mineras Codelco División Andina y Anglo American (7,2 km hasta la estación de monitoreo que se instaló en el glaciar para esta investigación).

Las campañas se desarrollaron durante septiembre y octubre del 2014, instalándose una estación de monitoreo de aerosoles atmosféricos y meteorología, directamente sobre la superficie glaciar, donde se midieron parámetros meteorológicos (T° , P° , %HR, velocidad y dirección del viento), albedo, la concentración y distribución por tamaños de material particulado atmosférico, BC y deposición total, además de recolectar muestras de nieve superficial y calicatas de hasta unos 3-4 m de profundidad en el glaciar. Respecto de la concentración de material particulado, se midió PM10, PM2,5 y PM1,0. Con relación a la distribución de partículas, se midió el número de partículas en 31 tamaños aerodinámicos distintos entre 0,27 y 34 μm . Los resultados muestran que el 98% de las partículas medidas en ambos glaciares se encuentra en el rango de 0,265 a 0,425 μm (partículas finas), mientras que sólo el 2% se encuentra entre 0,475 y 34 μm . Esto indica que el material particulado atmosférico medido en ambos glaciares tiene perfiles de distribución por tamaños similares, indicando un posible origen común y de origen antropogénico, por su pequeño tamaño.

La concentración de BC en el GOA fue casi el doble que la observada en el GB. Esto puede tener explicación por la cercanía del GOA a la zona de explotación minera de cordillera antes mencionada, relacionada con el tráfico de maquinaria pesada en el rajo de la mina y su posterior deposición sobre el glaciar. Existe correlación significativa ($>0,6$) entre BC y partículas hasta 0,615 μm , indicando que el BC observado en el GOA está asociado a partículas finas. Este hecho es un indicativo de que las fuentes de BC corresponderían principalmente a fuentes de combustión, lo que, sumado a que tanto el BC como las partículas provendrían de la misma fuente (actividad minera extractiva en cordillera), hace presumible que el BC observado en el GOA pudiese ser producido por la maquinaria que utiliza motores de combustión interna en la faena minera, ya que es la fuente de partículas y BC más cercana que se puede observar en esta zona de alta montaña.

La concentración de BC observada en los glaciares en estudio fue comparada con las registradas en otros lugares remotos del mundo, como la Antártica y en la cordillera de los Alpes. Tomando como referencia el 100% de la concentración de BC obtenida en el glaciar Olivares Alfa (la más alta de todas), se calculó su diferencia porcentual respecto del glaciar Bello y de otros sitios en el mundo, y los resultados muestran que el glaciar Bello presentó una concentración de BC 63,3% menor que el glaciar Olivares Alfa. Asimismo, la estación McMurdo, ubicada en la costa antártica, presenta concentraciones de BC 51,3% menores a las registradas en el glaciar Olivares Alfa, y por último, la región de Sonnblick, ubicada en los Alpes austriacos, presenta valores de BC 18,4% menores a la concentración del glaciar Olivares Alfa. Estos resultados ponen en contexto la alta concentración de BC observada en el glaciar Olivares Alfa, cuya fuente cercana observada más importante la constituye la actividad minera cordillerana antes mencionada.

Es importante volver a recordar que el material particulado que contiene BC es capaz de depositarse en los glaciares, oscureciendo su superficie. Este fenómeno provoca que el glaciar absorba mayor cantidad de radiación solar, acelerando su derretimiento y modificando, en consecuencia, su albedo. Tomando esto en consideración, un buen parámetro para evaluar el impacto de la deposición de material particulado, en especial BC sobre los glaciares, es la medición de su capacidad de reflexión de radiación solar (albedo), ya que mientras más blanca sea la superficie del glaciar (más limpia), su albedo será mayor. Para esto se utilizó un radiómetro capaz de medir la radiación solar incidente y reflejada (Net Radiometer CNR4, Kipp & Zonen), determinándose la capacidad de reflexión de radiación solar de ambos glaciares estudiados. Este instrumento se instaló, obviamente, en las mismas estaciones donde se midieron todos los parámetros anteriores en paralelo.

Los resultados indicaron que en el glaciar Olivares Alfa, el 60% de la radiación solar es reflejada, mientras que en el glaciar Bello, el 80% de la radiación es reflejada hacia la atmósfera. En otras palabras, el GOA absorbe el doble de radiación incidente respecto del GB, calentándose más rápidamente y por ende incidiendo directamente en su derretimiento de la misma forma. En términos de albedo, se puede entonces deducir que el albedo del GB es 33% mayor que el del

GOA, indicando en palabras simples que este último está más «sucio» que el GB. Estos resultados, junto con la concentración atmosférica de material particulado y BC, indicaron que el glaciar Olivares Alfa se encuentra más impactado por la deposición de contaminantes, presumiblemente debido a la actividad minera cercana al glaciar.

Con la finalidad de tener mayor evidencia sobre el fenómeno antes descrito, se realizaron análisis adicionales, como la caracterización química de la nieve de ambos glaciares, determinándose iones mayoritarios (NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , Na^+) y metales pesados (Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb, Fe, Al y Hg), especies químicas características de fuentes antrópicas y naturales. Para ello, durante las campañas de monitoreo de los glaciares Bello y Olivares Alfa se llevó a cabo la toma de muestras de nieve tanto superficial (1m^2 y 5 cm de profundidad), así como profunda (pozos de nieve de 3 a 4 m de profundidad con muestras tomadas cada 50 cm).

Las muestras obtenidas de nieve superficial se sometieron a análisis de iones inorgánicos Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , los cuales se determinaron y cuantificaron en un cromatógrafo iónico 850 Profesional IC de Metrohm, Suiza.

Con las concentraciones de iones en las muestras de nieve se calcularon los factores de enriquecimiento (FE) sobre la superficie de los glaciares de estudio, entendiendo por enriquecimiento la presencia de iones en cantidades por sobre lo que debería haber naturalmente (R. Sutherland, *et al*, 2000).

Los resultados indican que el GB recibe aportes antrópicos mayores que el GOA, pero de naturaleza muy distinta a la de este último, muy probablemente asociados a fuentes de fundiciones metálicas (SO_4^{2-}) o quema de leña (K^+). Sin embargo, y como se ha visto, este tipo de contaminación no afecta importantemente su albedo, dado que el albedo del GB es 33% mayor que el del GOA, indicando en palabras simples que este último está más «sucio» que el GB, por las razones antes mencionadas.

Al comparar los FE de los glaciares estudiados respecto de otros glaciares del mundo, los resultados muestran que el GOA y GB poseen niveles de enriquecimiento para sulfato que son menores al encontrado en el glaciar Esmeralda, en el cerro el Plomo, lugar claramente mucho más cerca de la ciudad de Santiago, en la Región Metropolitana, lo que es una clara evidencia de



Vista en helicóptero de la cordillera de los Andes en la Región Metropolitana, en vuelo en dirección a los glaciares Olivares Alfa y Bello, que despegó del aeropuerto de Cerrillos, en Santiago.

su origen antropogénico. Por el contrario, en el glaciar Marinelli, en Tierra del Fuego, prácticamente no hay enriquecimiento de iones, en especial sulfato, lo cual es una evidencia de su condición de prístino, sin fuentes antrópicas cercanas.

Las muestras de nieve superficial también fueron sometidas a análisis de especiación química, determinando la concentración de elementos traza mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), utilizando un equipo ELAN DRC II, Perkin Elmer, USA.

Se determinó la concentración Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb, Fe, Al y Hg, lo que permitió calcular su tasa de deposición anual por metro cuadrado en cada glaciar estudiado cuyos resultados muestran la presencia y deposición de elementos asociados a actividades antropogénicas, como Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Sb y Hg. Éstos corresponden a elementos típicamente asociados a la extracción de minería metálica y presentaron una mayor tasa de deposición anual en el GOA en comparación al GB. Por otro lado, los elementos crustales Fe y Al mostraron un comportamiento opuesto, siendo mayor su deposición en el GB, lo que es concordante con el importante enriquecimiento del ion Ca^{2+} encontrado

en este glaciar, reforzando el origen crustal del material particulado depositado en la nieve del GB.

Estos resultados son concordantes con las respectivas fuentes cercanas a ambos glaciares. Mientras el glaciar Olivares Alfa se encuentra próximo a la zona de explotación minera de cordillera, el glaciar Bello está ubicado 45 km más al sur, recibiendo un menor impacto del material particulado generado en las cercanías del GOA. Por otra parte, en el GOA, dado el perfil de elementos que presenta en la nieve, podría afirmarse que la mayor tasa de deposición de elementos antropogénicos observada en este glaciar se debería a la influencia de la actividad minera cordillerana cercana a éste.



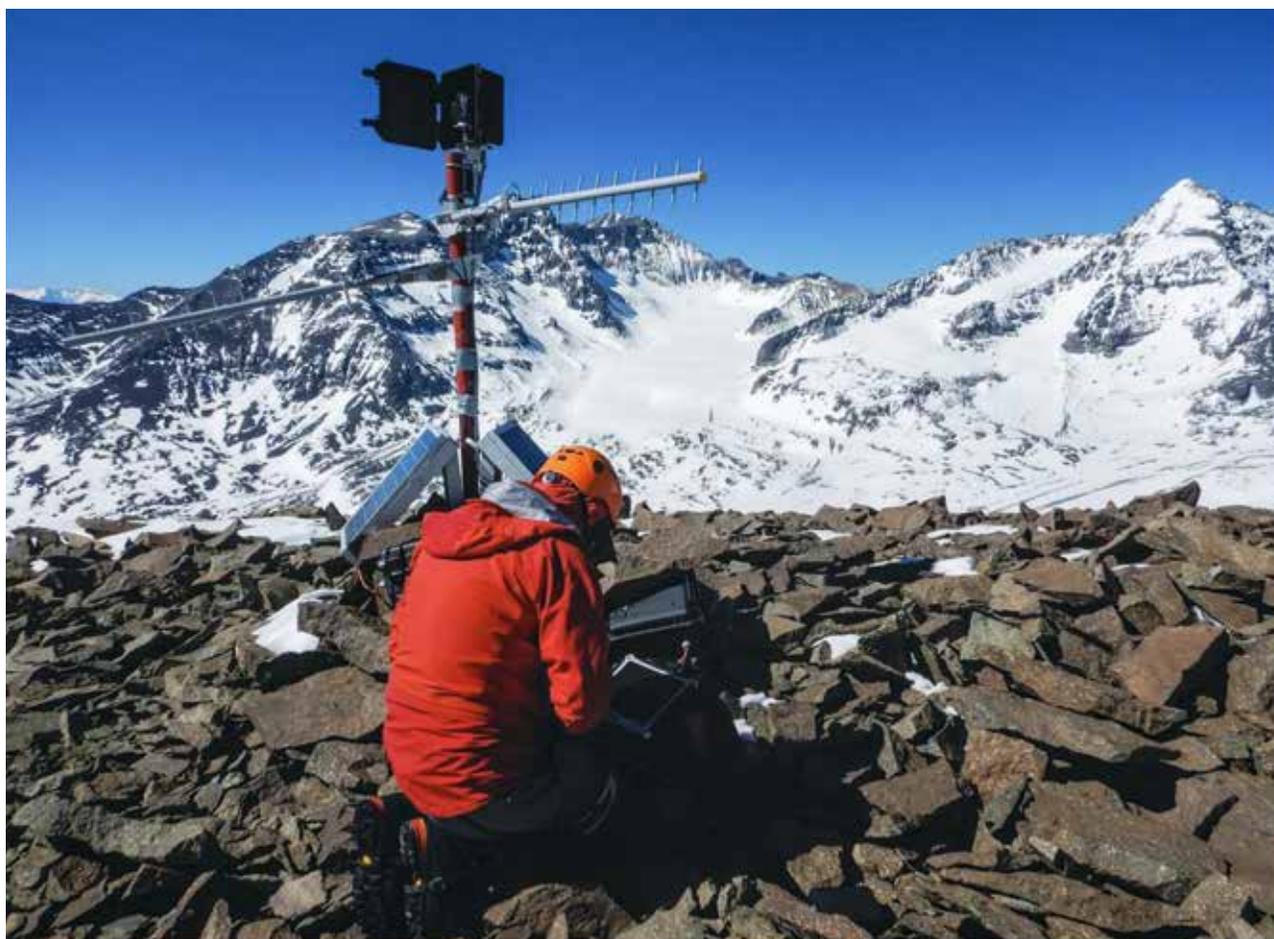
La evidencia científica obtenida por el profesor Francisco Cereceda y su equipo del CETAM indica que las emisiones de material particulado y BC provenientes de los mayores centros urbanos del país han alcanzado a los glaciares cercanos depositándose sobre la nieve, influyendo en la pérdida de estas masas de hielo.

Los glaciares de Chile central, a seis décadas de los trabajos de Louis Lliboutry

Andrés Rivera / Laboratorio de Glaciología, Centro de Estudios Científicos, CECs, Valdivia, Chile. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.

Hace 62 años que Louis Lliboutry publicó *Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología*, texto insigne que sigue siendo un tratado imprescindible en habla castellana para todos aquellos interesados en glaciología teórica y la exploración de los Andes. Este texto surgió al alero de la Universidad de Chile, donde Lliboutry trabajó por varios años estudiando glaciares a partir de antecedentes históricos, mapas, fotografías y, según sus propias palabras, «un conocimiento directo de la

Alta Cordillera Central donde hizo unas 10 expediciones ligeras de 5 a 10 días». El fruto de su trabajo tiene plena validez teórica y práctica, conteniendo además un excelente registro del estado de los glaciares de los Andes, en particular de Chile a mediados del siglo XX. Es precisamente el objetivo de este capítulo comparar estos registros históricos con imágenes y datos modernos, con el fin de verificar los cambios acaecidos y valorar la contribución del sabio francés a la glaciología de Chile y el mundo.



Trabajos del CECs en la cuenca alta del río Olivares. Instalación de cámara fotográfica con transmisión en línea apuntando a los glaciares Olivares y Alfa.

A mediados del siglo XX la cordillera de los Andes de Chile central (Figura 1) «era poco conocida fuera de los círculos andinísticos», lo que no ha cambiado sustancialmente en nuestros días. Si bien los glaciares están a pocos kilómetros de Santiago y algunos se pueden ver desde la ciudad, el acceso a los mismos es difícil, y para llegar a los más grandes de la cuenca del Maipo es necesario organizar expediciones similares a las realizadas por Lliboutry hace más de medio siglo.

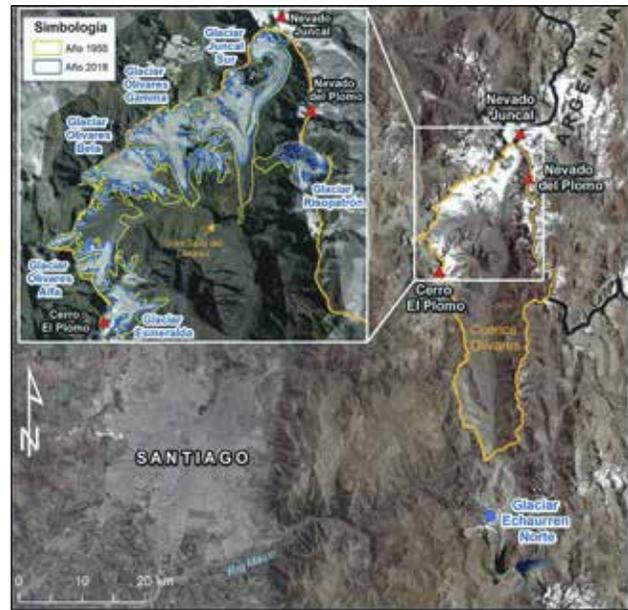
La alternativa moderna es subir en helicópteros que demoran por ejemplo unos 40 minutos hasta el Nevado Juncal, desde donde se desprenden algunos de los mayores glaciares de Chile central. Es precisamente al sur del Nevado Juncal donde está la cuenca alta del río Olivares, una de las zonas englaciadas mejor descritas por Lliboutry y que tiene los dos glaciares más grandes de la cuenca del Maipo: el Juncal Sur, de 20,63 km² el año 2018, y el Olivares Gamma, de 11,62 km², también en el año 2018.

Las exploraciones del Club Alemán Andino

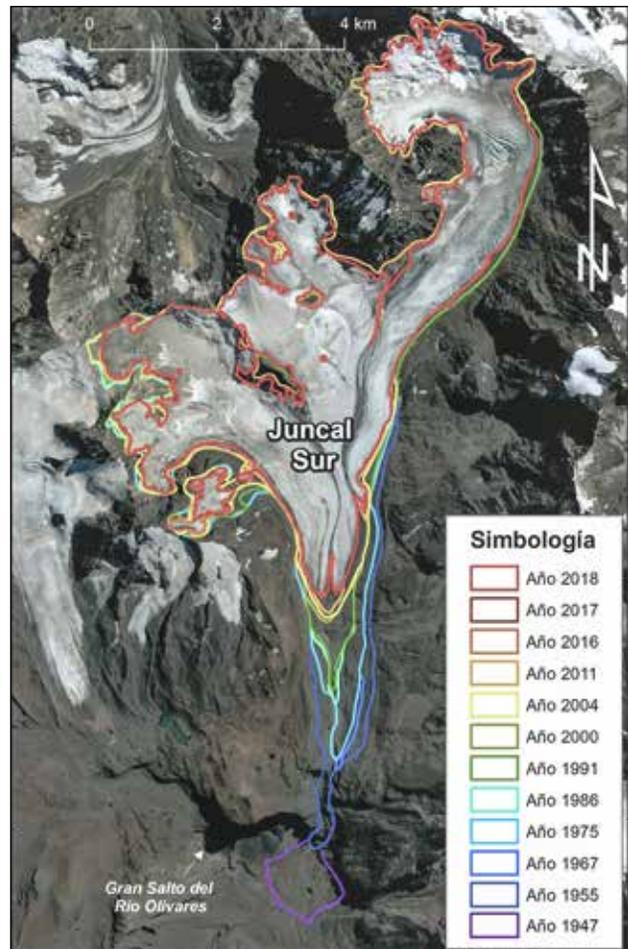
En las primeras décadas del siglo XX la cartografía oficial de la región andina de Santiago era muy básica, no mostraba los glaciares que allí existían y tenía notables errores topográficos. Si bien Klatt y Fickenscher en 1929 habían publicado su carta de Excursionismo de la cordillera central con nuevos antecedentes y muchos detalles, en especial de las cumbres de la región obtenidos durante sus propias expediciones, persistían muchas incógnitas sobre los ríos, cuencas y, particularmente, sobre los glaciares de esta parte de los Andes.

Gracias a la exploración de ellos y otros andinistas de la época, por ejemplo del Club Alemán Andino (DAV, por su sigla en alemán), se obtuvieron excelentes fotos de sus ascensiones, con las que Lliboutry comenzó a interiorizarse en sus glaciares, lo que después coronó con sus propias expediciones, permitiéndole dibujar el primer mapa escala 1:150.000 de la zona, que comparado con la cartográfica previa, significó un avance notable que recopila mucha información topográfica, toponímica y glaciológica inédita.

Este mapa es el primero donde se delinean los polígonos glaciares de todo Chile central, incluyendo ventisqueros con penitentes (glaciares descubiertos), así como glaciares recubiertos, subterráneos o de escombros (glaciares de roca o rocosos como se les llama hoy en Chile), lo que permitió estimar áreas totales, largos,



1. Mapa de ubicación con los principales topónimos mencionados en este capítulo y polígonos glaciares de los años 1955 y 2018 en la cuenca alta del Olivares.



2. Variaciones areales del glaciar Juncal Sur desde 1947 a 2018.

alturas máximas y mínimas de hielo. Es destacable además que lo hizo con fotos de andinistas, información cartográfica limitada y sus propias observaciones, sin contar con fotografías aéreas verticales, que ya eran comunes y de amplio uso en el Hemisferio Norte para fines cartográficos gracias al gran avance experimentado en fotogrametría durante la Segunda Guerra Mundial.

Las primeras fotos de este tipo obtenidas en la cordillera de Chile central son las del vuelo Hycon tomadas en el verano de 1955 y 1956, con las que se hizo el primer inventario de glaciares de la cuenca del Maipo el año 1979 y con las que el Instituto Geográfico Militar de Chile hizo su cartografía regular escala 1:50.000 años después. En otras palabras, el mapa de Lliboutry fue la mejor cartografía de la zona por al menos 25 años. Tampoco contó con imágenes satelitales, que sólo comenzaron a obtenerse en la década de 1960 y que sólo se hicieron comunes a partir de 1970, cuando se inició la serie de satélites Landsat.

La cuenca alta del Olivares

No obstante el gran avance que representó el mapa de glaciares elaborado por Lliboutry, éste no tuvo un nivel de detalle suficiente como para que se pudiera hacer una comparación precisa con la extensión actual del hielo. Sin embargo, esta comparación puede hacerse gracias a la calidad de sus descripciones, las fotos terrestres que usó y los numerosos detalles que entregó, particularmente en la cuenca alta del Olivares, una de las subcuencas principales del río Maipo, donde los retrocesos glaciares han sido muy destacados.

Se llama cuenca alta del Olivares a la porción de esta cuenca que está ubicada por encima del Gran Salto del Olivares (Figura 1), una pared rocosa de cientos de metros de altura por donde en la actualidad caen en cascada las aguas provenientes del glaciar Juncal Sur y Risopatrón ubicados al norte, y desde el conjunto de glaciares Olivares Alfa, Paloma Norte, Beta y Gamma, entre otros menores ubicados al oeste.

La región superior al Gran Salto del Olivares era prácticamente desconocida antes de Lliboutry, porque superar esos farellones era y sigue siendo una travesía difícil que requiere un gran esfuerzo físico y técnico, por lo que siempre ha constituido una barrera para exploradores. Por ejemplo, Fickenscher (1930) realizó una expedición por el río Olivares en 1915 y 1924, sin poder subir esta barrera, lo que explica que al publicar

su Carta de Excursionismo del año 1929, sólo incluyó el glaciar Juncal Sur y Risopatrón que vio a gran distancia, dibujando hacia el oeste del Gran Salto del Olivares, una cuenca sin hielo y con un río que erróneamente fluía al norte. Sin embargo, en la parte oeste de la cuenca alta del Olivares estaba el Ventisquero Olivares mencionado vagamente por Reichert y Hebling, de la Comisión Argentina de Límites, cuando escalaron el Nevado del Plomo, en 1910, y el Nevado Juncal, en 1912. Este ventisquero era una gran masa de hielo en aquella época, pero sólo fue descrita en detalle por primera vez por Barrera (1937), quien lo exploró en 1935 cuando subió a la cordillera Morada desde el río Blanco. A los pocos años cuando Piderit (1943) hizo una travesía en la zona vio que este gran ventisquero tenía algunas morrenas mediales y que se había separado en dos, a los que llamó Alfa y Beta. En 1951, el Beta se había vuelto a dividir en dos cuerpos de hielo a lo largo de una morrena medial vista el año 1935, los que se denominaron Beta y Gamma. Posteriormente se identificó una nueva división, esta vez entre el Alfa y Alfa prima (Lliboutry, 1954).

En otras palabras, entre 1935 y 1956 el gran ventisquero Olivares se dividió al menos en 4 glaciares, con un retroceso frontal del Beta de 1 km entre 1943 y 1956, y con la formación de una morrena de ablación entre el Alfa y el Beta, donde el hielo experimentó una importante «estagnación» y «desaparición». Estos retrocesos rápidos fueron explicados porque los glaciares eran poco escalonados en altitud, lo que los hacía muy sensibles a toda variación del clima.

La cascada de hielo del Gran Salto del Olivares

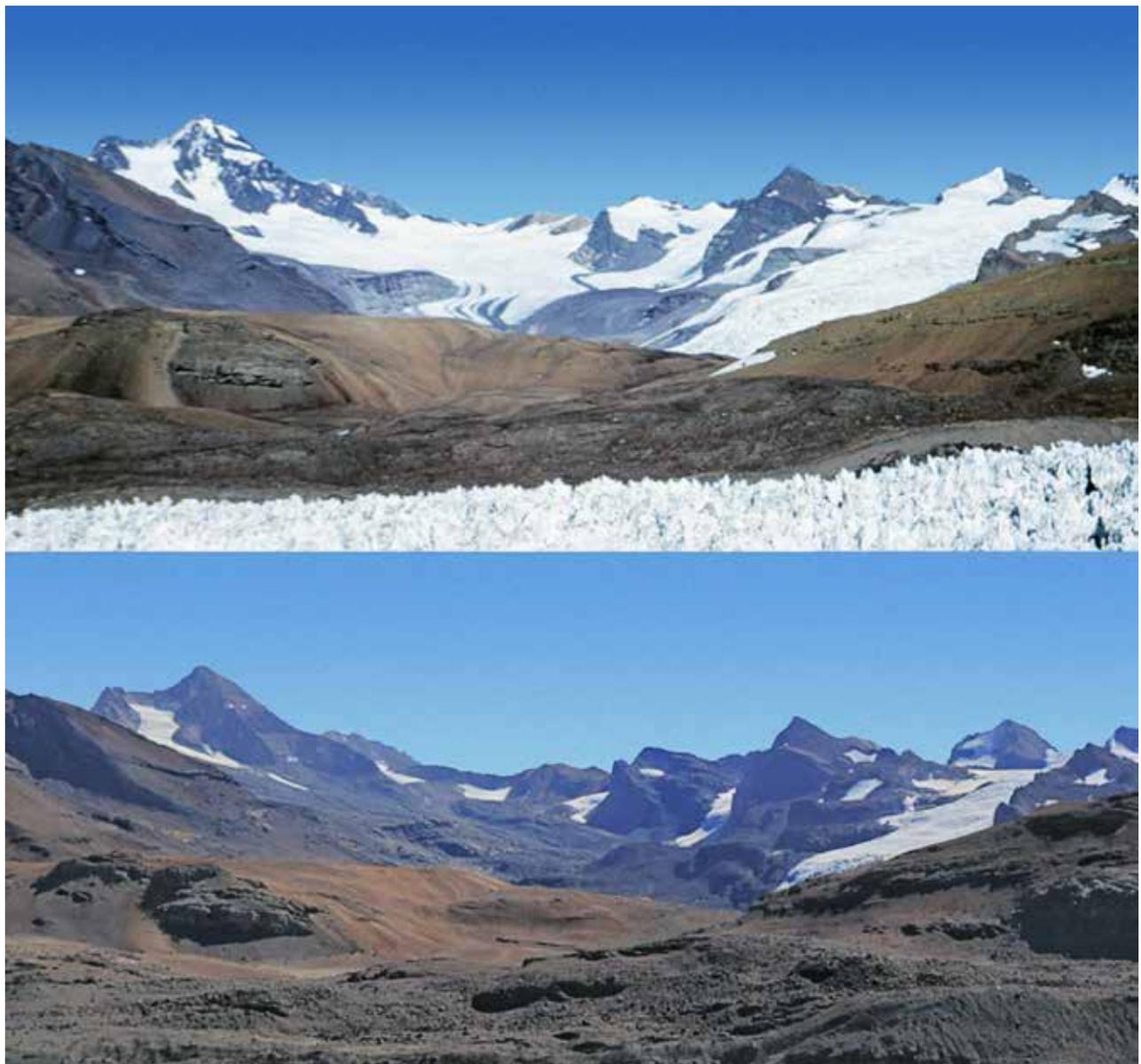
En el sector norte de la cuenca alta del Olivares se ubica el glaciar Juncal Sur, el más grande de Chile central, que en el año 1924 (Fickenscher, 1930) estaba confinado por encima del Gran Salto del Olivares, desde donde estrepitosamente bajaban sus aguas hasta el fondo del valle del río Olivares. En 1935 seguía confinado a las partes altas (Barrera, 1937), pero luego, en el año 1947, según Lliboutry (1956), este glaciar experimentó un fuerte avance que generó una gran cascada de hielo con un caos de seracs que bajó unos 500 m por el Gran Salto del Olivares hasta formar un glaciar pedemontano de cerca de 1 km² de superficie ubicado en el fondo del valle, represando el río proveniente del oeste (con aguas desde los glaciares Alfa, Beta y Gamma) y formando una lagunita. En 1954, siempre siguiendo a Lliboutry, esta

lagunita se había vaciado y el hielo prácticamente había desaparecido del fondo del valle. Este repentino avance fue adjudicado por Lliboutry a la serie de años húmedos de 1898-1905 y a la sequedad de los años posteriores que permitieron al hielo aumentar de temperatura.

De acuerdo a estos antecedentes y estudios de Lliboutry a mediados de los 1950's, los glaciares ya evidenciaban una importante reducción areal desde la Pequeña Edad del Hielo, período que se caracterizó por ser la última expansión de glaciares a lo largo de todos los Andes, el cual tuvo varios pulsos, siendo el más

reciente el que terminó aproximadamente a mediados del siglo XIX (Espizúa y Pitte, 2009). Esta expansión de glaciares generó una serie de cordones morrénicos laterales y algunos frontales, los que no pasaron inadvertidos para Lliboutry, quien pudo medir diferencias de altura de 100-150 m entre el hielo en los 1950's y la *trim line* generada por los hielos de la cuenca alta del Olivares en el último avance glacial.

Este proceso de deglaciación ha continuado hasta el presente, con cada vez mayores retrocesos, adelgazamientos y fragmentaciones, lo que ha llevado a que en el



3. Arriba, foto de la parte oeste de la cuenca alta del Olivares tomada en 1950 desde el margen oriental del Juncal Sur por Eberhard Meier, del Club Andino Alemán (DAV). Abajo, foto de Sebastián Cisternas, del CECs, tomada en 2018 desde aproximadamente la misma posición.



4. Midiendo balance de masa glaciar con balizas y GPS a los pies del cerro Fickenscher.

año 2018 el área que cubrían los 4 grandes glaciares mejor descritos por Lliboutry (Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur), hoy esté dividida en más de 20 glaciares de menor tamaño.

La reconstrucción de las variaciones de los glaciares desde la época de Lliboutry se ha facilitado enormemente por la disponibilidad de fotografías aéreas verticales y, más recientemente, por las cada vez más frecuentes imágenes satelitales de alta resolución espacial y espectral. Con estas imágenes es posible delinear en detalle los contornos glaciares de las zonas más inaccesibles y con una precisión que puede llegar a ser submétrica.

Los programas computacionales actuales permiten proyectar, georreferenciar, analizar e interpretar dichas imágenes en forma rápida, precisa y sencilla, por lo que la calidad de los mapas y datos no tiene comparación con los producidos hace más de medio siglo. Por ello, para determinar los cambios de áreas glaciares, en este trabajo se han comparado las fotografías aéreas Hycon de 1955 con todos los datos disponibles desde entonces, confirmando un retroceso frontal significativo (de varios km en algunos casos), una importante reducción de áreas englacadas (-32% de superficie) y una progresiva fragmentación de los cuerpos de hielo principales de la

cuenca alta del Olivares (en 2018 se observa un aumento en el número de glaciares 37% mayor que en 1955).

En la Figura 1 pueden verse las posiciones frontales de 1955 y 2018 para toda la cuenca alta del Olivares y glaciar Esmeralda. En la zona destaca el Juncal Sur, que ha perdido 25% de su superficie desde 1955 (Figura 2), así como el glaciar Olivares Beta, que pasó de 12,8 km² en 1955 a tener un área de 8,4 km² distribuida en 8 fragmentos en 2018, lo que representa una pérdida de un 34%.

En el caso del Olivares Alfa, el retroceso y pérdida de superficie es aún mayor, puesto que el área de 1955 era de 17,5 km² mientras que en el 2018 se ha fragmentado en 9 partes, que totalizan 5,9 km², lo que representa una pérdida del 66% de superficie. En este glaciar, al igual que lo observado por Lliboutry en los 50's, no toda la pérdida de área del Alfa es por retroceso, puesto que parte del hielo ha quedado sepultado por material morrénico debido al adelgazamiento experimentado.

Esto demuestra que este glaciar ha estado en desequilibrio con el clima en niveles mayores que el resto de los glaciares de la cuenca, incluso desde mediados del siglo XX, debido a su escaso desarrollo altitudinal y una orientación predominantemente norte. Este glaciar también es uno de los que tienen más material morrénico cerca de su frente, según lo observado por Lliboutry desde principios del siglo XX.

El glaciar Echaurren

Estas reducciones de área generalizadas se deben a que los glaciares no están en equilibrio con las condiciones climáticas observadas en las últimas décadas, las que se han caracterizado por mostrar una tendencia de calentamiento atmosférico en altura (Falvey y Garreaud, 2009). Este desequilibrio tiene una expresión concreta en la medición anual de balance de masa glaciar, método que determina la cantidad de masa que entra y sale de un glaciar en un año hidrológico, lo que depende de las condiciones meteorológicas anuales y, en el mediano plazo, de los cambios del clima (Rivera y otros 2016).

Este tipo de mediciones se llevan a cabo desde 1975 por la Dirección General de Aguas (DGA) en el glaciar Echaurren Norte, ubicado en la cuenca del río Maipo (Figura 1), unos 50 km al sur del glaciar Juncal Sur. En la serie de datos del Echaurren Norte entre 1975 y 2017 se puede ver que el balance de masa acumulado fue de -20 m equivalentes de agua, un valor alto comparado

con otros glaciares a nivel mundial, aunque no excepcional, lo que confirma que Chile central está experimentando fuertes pérdidas de masa de hielo.

Esta serie de balances de masa mostró cierta estabilidad entre 1975 y principios de la década de 1990, y entre 1999 y 2009, pero a partir de esa fecha y hasta el presente los valores han sido negativos, en consonancia con la megasequía que ha afectado a esta parte del país en estos años (Garreaud y otros, 2017).

Comparación de documentos históricos

Una forma gráfica de visualizar los cambios ocurridos en los glaciares de la zona desde los tiempos de Lliboutry es comparar fotografías obtenidas por andinistas de la época con fotos modernas tomadas desde los mismos puntos. Un ejemplo de ello está en la Figura 3, donde se ve la foto tomada por Eberhard Meier, del DAV, durante su ascensión en febrero de 1950 al Nevado del Plomo, que se compara con una foto tomada por Sebastián Cisternas desde aproximadamente el mismo punto el año 2018, durante la realización de tareas de investigación glaciológica del CECs en la zona (Figura 4). En el primer plano de la Figura 3 se ve que la superficie de la lengua del glaciar Juncal Sur se movía de derecha a izquierda (norte-sur) en dirección del Gran Salto del Olivares en 1950. Al fondo de la foto se ve el Olivares Alfa con sus morrenas medias y a la derecha está el Olivares Gamma cayendo en cascada hacia la izquierda (sur). En la foto del 2018 se ve que la lengua del Juncal Sur ha desaparecido completamente, se ven algunos fragmentos de lo que era el Olivares Alfa y se ve cómo el Olivares Gamma ha adelgazado, reducido su área y retrocedido desde 1950. El retroceso frontal del Olivares Gamma desde el año 1955 al 2018 es de 1,1 km lineal.

Otra forma de evaluar gráficamente los cambios glaciares de las últimas décadas es comparar fotos antiguas con imágenes satelitales modernas de alta resolución, las que deben ser ortorectificadas con modelos digitales de elevación obteniéndose proyecciones tridimensionales, que pueden visualizarse desde aproximadamente el mismo punto desde donde se tomó la foto histórica. En la Figura 5 se ve un ejemplo de este procedimiento, donde hay una foto del Juncal Sur capturada por Eberhard Meier en 1950 comparada con una imagen de satélite del año 2018.

El retroceso medido desde la posición frontal del Juncal Sur en 1950 y el 2018 es de aproximadamente



5. Arriba, foto del glaciar Juncal Sur tomada en 1950 por Eberhard Meier, del Club Andino Alemán (DAV). Abajo, imagen de satélite Digital Globe del 22 de febrero del 2018.

5 km lineales. En términos altimétricos, en 1950 el glaciar bajaba hasta el fondo del Gran Salto del Olivares a una cota aproximada de 2.810 m. En el 2018, el frente del Juncal Sur llega hasta 3.810 m sobre el nivel del mar.

En síntesis, a más de 60 años de los pioneros trabajos glaciológicos de Louis Lliboutry, se puede afirmar con certeza que sus publicaciones siguen siendo referencias fundamentales para entender los glaciares de Chile y evaluar sus cambios.



Revisar los trabajos de Lliboutry provoca nostalgia por una época en que casi todo era desconocido sobre los glaciares de Chile y cuando cada dato se obtenía con un inmenso esfuerzo humano y técnico. Vaya por todo ello nuestra admiración y agradecimiento por su contribución a Chile.

La función hidrológica de glaciares en los Andes de Chile central

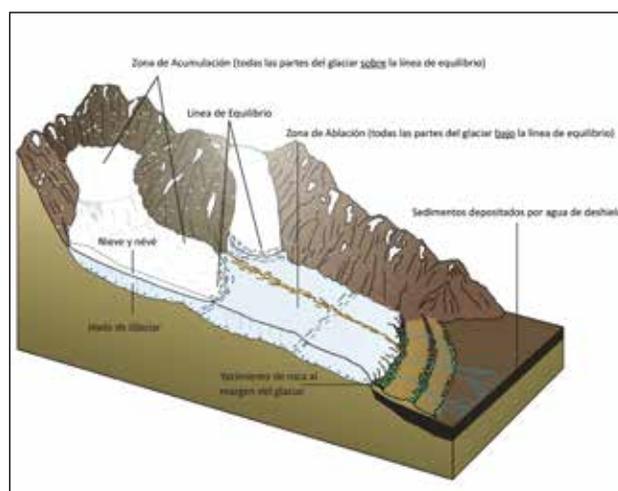
James McPhee / Profesor titular, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Este artículo da cuenta de investigaciones recientes que, a partir de observaciones de campo y modelamiento matemático, han contribuido a cuantificar de manera más precisa el estado de los glaciares en cuanto a su función hidrológica y a proveer perspectivas sobre su evolución futura.

El ciclo del agua en la Tierra es una de las expresiones de cómo la energía solar alimenta una «máquina», que mueve una enorme cantidad de masa y energía a través del planeta. En su fase terrestre, este mecanismo mueve agua desde los trópicos hacia los polos y desde los océanos hacia las masas continentales, desde donde fluye a través de ríos, lagos y acuíferos subterráneos, hasta volver a incorporarse a los océanos.

De manera muy simplificada, el ciclo hidrológico se puede concebir como una sucesión de flujos que conectan «estanques» de almacenamiento, donde el agua reside por tiempos variables hasta pasar mediante algún mecanismo de flujo hasta el siguiente estanque. Los glaciares son elementos muy especiales en este sistema, puesto que en ellos el agua convive en distintas formas o fases, incluyendo sólido, líquido y gas, y que por su naturaleza física el agua puede residir en ellos, en alguno de esos estados, durante tiempos variables, que van desde algunas horas hasta cientos o miles de años.

Existen innumerables tipos de glaciares, pero el modelo más familiar comprende un «río de hielo», que fluye desde una zona de acumulación hasta una zona de ablación o derretimiento (figura 4). En la zona de acumulación, los aportes de nieve exceden en magnitud los procesos de ablación, de tal manera que en promedio el balance neto de masa es positivo. Es decir, en la zona de acumulación la cantidad de nieve entrante sobrepasa la suma de procesos que contribuyen al derretimiento de nieve y hielo. Al permanecer acumulada por períodos largos, la nieve en la zona de acumulación va mutando, haciéndose cada vez más densa, debido a procesos de compactación y ciclos de derretimiento-recongelamiento. De este modo, la nieve se



1. Esquema de un glaciar de montaña. Adaptado de Christopherson (2010).

convierte en neviza y, eventualmente, en hielo sólido. Por fuerzas gravitacionales, el hielo fluye hacia zonas más bajas, donde los procesos de ablación superan, en masa, a la acumulación.

Estas zonas comprenden, en agregado, lo que se conoce como «zona de ablación». Entre la zona de acumulación y la de ablación existe una línea imaginaria, denominada «línea de equilibrio», donde la masa acumulada es balanceada de manera exacta por la masa perdida por procesos de ablación.

Almacenamiento de agua y rol hidrológico

En general, es sencillo pensar en el cauce de hielo como la única forma en que el agua puede viajar por el sistema. Sin embargo, lagunas, canales y túneles en las superficies del glaciar, en su cuerpo y en la interfaz entre hielo y roca basal también constituyen subsistemas hidrológicos

por donde el agua puede fluir. Asimismo, es posible encontrar agua líquida en los poros de la nieve y neviza depositadas en la superficie del glaciar, sobre todo en su zona de acumulación.

El agua líquida puede ser retenida durante horas o días en los canales supra o subglaciales, demorando la salida de agua de derretimiento o de precipitaciones líquidas ocurridas sobre la superficie del glaciar. El agua retenida en los poros de la neviza puede tardar meses en salir del glaciar, así como el agua acumulada en forma de nieve sobre su superficie.

El hielo que alcanza la línea de equilibrio puede tardar meses o años en llegar finalmente a derretirse y salir del glaciar hacia los cauces superficiales alimentados por éste, y finalmente el hielo incorporado a la masa glaciar podría demorar decenas o centenas de años en fluir hasta el frente del mismo. En los casos más extremos, como casquetes polares, el hielo podría tener edades de varios miles de años.

En la zona cordillerana de Chile central, la presencia de glaciares en las cuencas hidrográficas está relacionada muy fuertemente con la producción de agua de las mismas durante los meses de estiaje. En la figura 2 se ve que el caudal que fluye, expresado por unidad de superficie de la cuenca, durante los meses de septiembre a febrero aumenta considerablemente a medida que el área cubierta por glaciares de las cuencas estudiadas se incrementa.

Balance de masa glaciar

La existencia de un glaciar queda determinada fuertemente por la combinación de elementos que dan origen a una zona donde la nieve invernal se deposita en cuantía tal, que el derretimiento natural es incapaz de derretir la totalidad del volumen, produciéndose entonces un «acarreo» de nieve desde un año al siguiente. Los procesos hidrológicos que participan en este exceso de acumulación incluyen la precipitación de nieve directa sobre el sitio y el transporte de nieve desde zonas aledañas ya sea por avalanchas o por viento.

La mayoría de los glaciares de Chile central presentan esta configuración geométrica, con zonas de acumulación que son, en términos de superficie, importantes en relación a la superficie total del glaciar. Conceptualmente, entonces, la nieve que logra ser transportada desde zonas adyacentes hacia el glaciar pasa a formar parte de un sistema con una capacidad mucho mayor de

almacenamiento, y será capturada por períodos mayores que aquellos que hubieran transcurrido en caso de no formar parte de la masa de hielo.

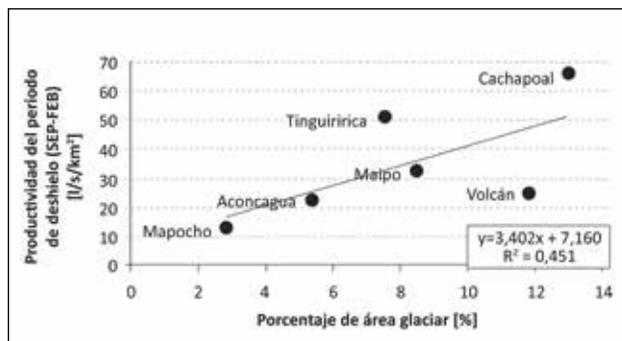
Se entiende como ablación el conjunto de procesos que contribuyen a la desaparición del hielo glaciar, fundamentalmente el derretimiento y la evaporación y sublimación. Todos estos procesos ocurren en la superficie del glaciar, y dependen del intercambio de energía entre el glaciar y la atmósfera. La energía absorbida por el hielo contribuye a su derretimiento, toda vez que el exceso de energía es utilizada para aumentar la temperatura del hielo hasta los 0°C.

Dado que la radiación solar es la principal fuente de energía para la ablación, este proceso tiene un marcado ciclo estacional, por lo que es más intenso en los meses de primavera y verano. A su vez, usualmente en los primeros meses de primavera los glaciares se encuentran cubiertos por la nieve caída durante el invierno, la que «protege» el hielo de los elementos. Por esta razón, el derretimiento de hielo glaciar en Chile central es más intenso en los últimos meses del verano, cuando la nieve estacional ya se ha derretido.

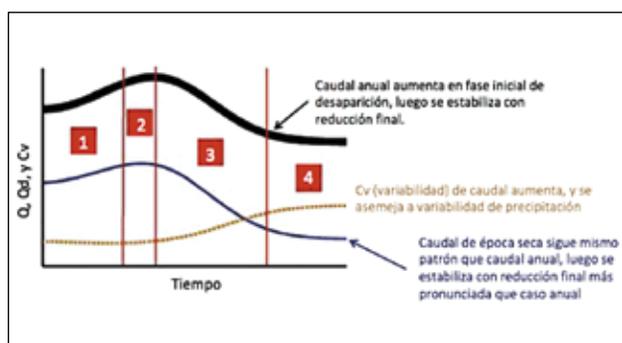
Cuando se suceden años en que el balance de masa es negativo, esto se traducirá en una disminución progresiva del volumen glaciar. Si este proceso se enmarca dentro de un cambio persistente del clima, tal que el balance entre acumulación y ablación es alterado definitivamente, diversos autores han planteado que debe producirse lo que se denomina el fenómeno de *peak water* (figura 3). Según esta hipótesis, en la fase inicial de la transición climática, el glaciar contribuye cada vez con más caudal a medida que el derretimiento de la zona de ablación se hace más acelerado. En esta fase, la variabilidad de los caudales se mantiene por debajo de la variabilidad de la precipitación.

En una segunda fase, los caudales tanto de verano como anuales llegan a un máximo, cuando se produce la combinación óptima entre tasas de derretimiento acelerado y una superficie glaciar todavía suficientemente amplia. En una tercera fase, la contribución de agua desde el glaciar comienza a disminuir, puesto que si bien las tasas de derretimiento continúan siendo altas, la disminución de área glaciar trasunta en un menor volumen total de esorrentía de derretimiento.

Finalmente, el glaciar adquiere un nuevo estado de equilibrio, generando caudales de verano y anuales menores que aquellos observados en la fase inicial



2. Relación entre cobertura de superficie glaciar y rendimiento hídrico de primavera-verano para algunas cuencas cordilleranas de Chile central.



3. Impacto hidrológico del retroceso glaciar. Adaptado de Baraer y otros (2012).

(debido a la disminución de superficie), y con variabilidad interanual mayor, similar ahora a la variabilidad de las precipitaciones, debido a la disminución del volumen de hielo.

Balance de masa histórico en Chile central

Como se ha reportado en diversos estudios, los glaciares de Chile central han experimentado un progresivo retroceso y disminución de volumen durante las décadas finales del siglo XX e inicios del siglo XXI. Las evidencias más antiguas corresponden a registros fotográficos de la década de 1950, obtenidos, entre otros, por miembros del Club Andino Alemán, así como por las primeras expediciones de Louis Lliboutry. No fue sino hasta la década de 1970 que la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile comenzó el que se constituiría en el programa de medición de balance de masa de mayor duración en América Latina, en el glaciar Echaurren.

Este programa ha permitido comprender la dinámica fundamental de la interacción entre el clima y el balance de masa, si bien el Echaurren, por su tamaño y ubicación, podría no ser representativo de otros glaciares en la región.

Masiokas y otros (2016) mostraron que la variación interanual de las precipitaciones invernales explica en gran medida la variación del balance de masa del glaciar en las últimas décadas, y que sólo secuencias de años sucesivos con precipitaciones por sobre el promedio climático permitirían pausar, o revertir, la tendencia a la desaparición de este glaciar. La última vez que se observó una tendencia similar fue en el período 1975-1990.

En años recientes, la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile ha colaborado con otros actores del medio nacional e internacional para aumentar la información y el conocimiento respecto del rol hidrológico de los glaciares de Chile central.

Hemos enfocado nuestro trabajo en glaciares ubicados en la cabecera del río Yeso, que abastece de agua al embalse del mismo nombre y que a su vez constituye una reserva de agua importante para la ciudad de Santiago.

En esta cuenca hemos instalado estaciones meteorológicas, hemos medido el balance de masa de tres glaciares (Bello, Yeso y Pirámide), la descarga en cauces superficiales, y construido modelos numéricos del balance de masa y de la escorrentía de las cuencas en las que se encuentran estos cuerpos de hielo.

Al ejecutar un modelo numérico que toma en cuenta los datos meteorológicos observados en la zona, además de las características de la superficie glaciar y su balance de energía, observamos que en el caso de los glaciares Bello y Yeso, de tamaño pequeño y ubicados a gran altitud, el balance de masa anual acumulado se hace negativo sólo a partir de 2010, año de inicio de la megasequía de Chile central.

En el caso del glaciar Pirámide, cubierto por detritos, la dinámica es similar, pero el descenso es más pronunciado a partir del año 2011.

Durante la sequía, el balance de masa glaciar evoluciona en función de la altitud, determinando para esta zona una línea de equilibrio en torno a los 4.000 msnm, aproximadamente. Esta línea es variable año a año, porque depende de la magnitud de la acumulación de nieve sobre el glaciar.



Medición de balizas de ablación en el glaciar Bello, Región Metropolitana, marzo de 2018. Se aprecian dos secciones de 1,5 m de longitud de la baliza de pvc color naranja, que al momento de su instalación, en octubre de 2017, estaban completamente hundidas en la nieve y hielo.

En algunos casos no existe una zona de acumulación, sino que el glaciar completo presente balance de masa anual negativo. Esto implica, entre otras cosas, que durante la sequía los glaciares representan un aporte neto de agua en esta cuenca hidrográfica. Este aporte puede en algunos casos representar hasta el 50% del total de agua producida durante los meses de verano.

Necesidades de información y perspectivas futuras

La investigación respecto del rol hidrológico de glaciares en Chile central continúa siendo un «trabajo de detective», por cuanto no se cuenta con mediciones sistemáticas de caudales en cauces alimentados exclusivamente por glaciares. Es muy difícil construir y mantener operativas estaciones de medición de caudal en los sitios donde se encuentran los glaciares, por lo que seguramente esta situación de falta de información continuará en el futuro próximo.

Los modelos numéricos hidroglaciológicos ofrecen una buena alternativa para entender de mejor manera estos complejos sistemas naturales, tanto en relación con su comportamiento pasado como con su sensibilidad ante el cambio climático global.

Para construir modelos confiables es necesario mejorar nuestra capacidad para observar algunas variables clave, tales como la precipitación y acumulación de nieve en zonas remotas e inaccesibles y las propiedades reflectivas de la nieve y el hielo.

Asimismo, es necesario mejorar nuestro conocimiento de la ubicación y extensión de masas de hielo cubiertas por detritos, que son difíciles de observar, pero que pueden transformarse en reservas de gran importancia cuando los glaciares descubiertos hayan llegado a un nuevo equilibrio.



Los glaciares, en sus diversas formas, existentes en la cordillera de los Andes forman parte de un sistema interconectado que abastece de agua a los valles de Chile central. Dicha contribución cambia en el tiempo y en el espacio, y está determinada por las condiciones climáticas, así como por la configuración de formas criosféricas en cada cuenca.

La importancia de los glaciares de la cuenca del río Maipo para los recursos hídricos y el abastecimiento de agua potable

Sandra Andreu / Directora de Desarrollo Sostenible-Aguas Andinas.



Sandra Andreu, en el glaciar Pirámide, noviembre 2018.

Cuando descubrí, tres años después de llegar a Chile, el libro *Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de glaciología* y empecé a conocer la vida de Louis Lliboutry gracias al trabajo biográfico minucioso que estaba realizando el historiador y periodista Marc Turrel, me di cuenta de que existía un trabajo de investigación que no tenía el reconocimiento que se merecía, decidiendo plantear el apoyo por parte de Aguas Andinas en la publicación de este libro en Chile y ayudar a difundir y valorar en el país todos los archivos y fotografías, tesoros de los primeros estudios de los glaciares.

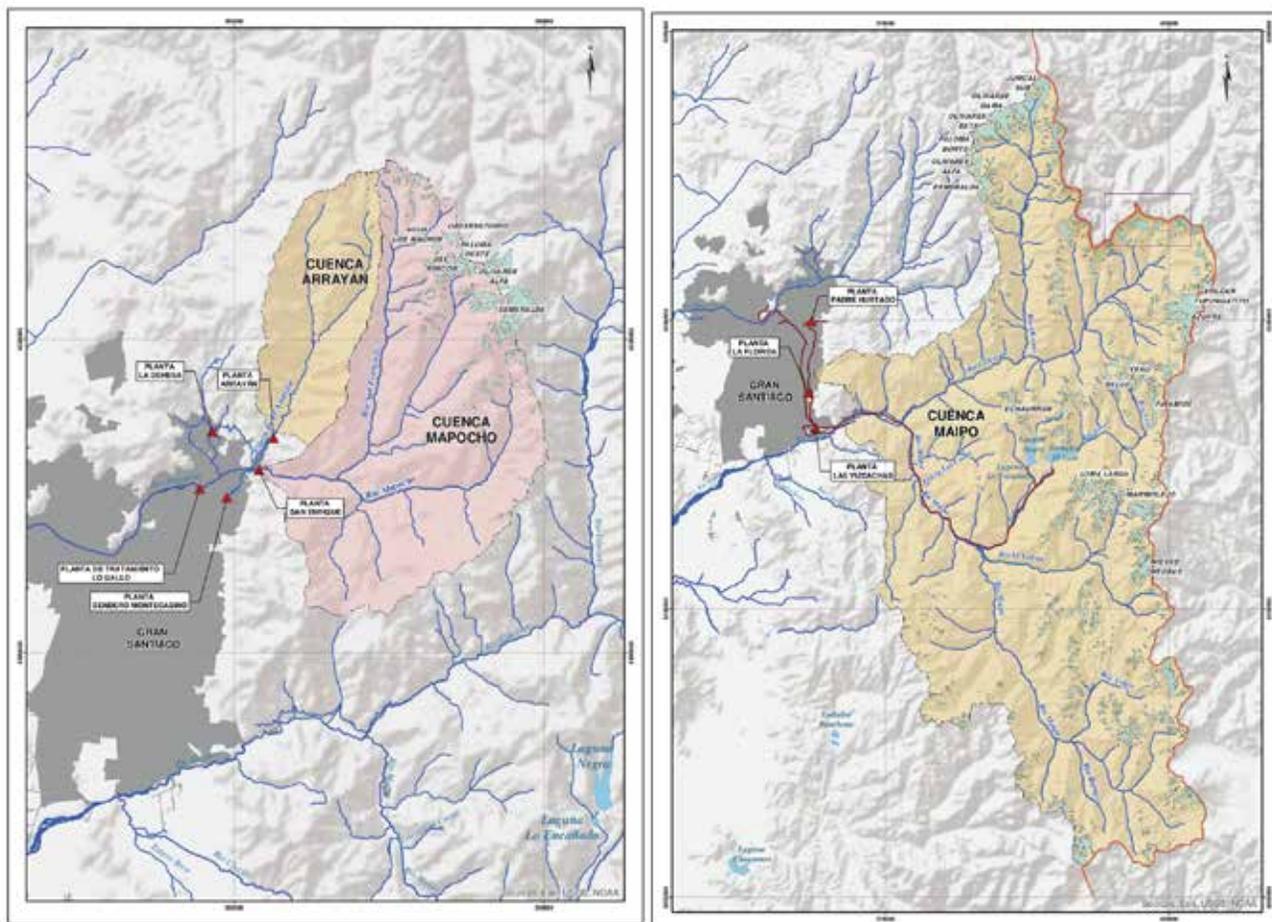
Existían, además, demasiadas coincidencias de la vida que me motivaban a hacer un homenaje al aporte de Louis Lliboutry. Estudié en Grenoble en Francia, en la Escuela de Mecánica e Hidráulica, decidiendo especializarme en hidrología, hidráulica y recursos hídricos, al mismo tiempo que me iniciaba en el alpinismo, esquí y esquí de montaña, descubriendo con fascinación los secretos de la montaña, de sus glaciares, de sus esteros y ríos. Trabajé luego varios años en Francia en el estudio geomorfológico de ríos de los Alpes, como por ejemplo

el Giffre, que me fascinó, por sus cascadas de hielo y sus impresionantes aluviones de rocas, el establecimiento de planes de prevención de riesgos de inundación en muchas cuencas, la gestión integrada de los ríos para favorecer un correcto desarrollo de los ecosistemas, planes directores de gestión por cuenca, junto con estudios de adaptación al cambio climático.

Pasé luego varios años, lejos de las montañas, al lado de París trabajando para Francia y para algunos otros países en el mundo en estos temas y en los asociados a recursos subterráneos y oceanografía, antes de llegar hasta los ciudadanos a través de la gestión sanitaria. Descubriendo la vida de Louis Lliboutry, me di cuenta de que hice un camino inverso al suyo al llegar de París a Grenoble, pero también para llegar a la ciudad de Santiago de Chile.

Llegando a este acogedor país, en el año 2015, tuve el mismo llamado por parte de las montañas que rodean la ciudad, pudiendo recorrerlas en familia durante muchos fines de semana, descubriendo así la inmensidad de la cordillera de los Andes que impresiona tanto a los propios chilenos como a los turistas que la visitan. Da respeto y cansa por sus largos caminos hasta llegar a las cumbres y glaciares que contribuyen a sustentar la vida en la ciudad.

Al llegar tuve la oportunidad de apoyar el proceso de transformación de Aguas Andinas desde una empresa sanitaria hacia una empresa de servicios ambientales, lo que implicaba un cambio de toda la organización territorial, y la reorganización gerencial, privilegiando el valor compartido con el ciudadano, el desarrollo sostenible y la evolución cultural de la empresa, basando el liderazgo en las fortalezas de los equipos, como lo hacen los guías de alta montaña. Pero, asimismo, el presidente y el gerente general aceptaron que pudiese involucrarme también en el desarrollo de la investigación e innovación ante la necesidad de la



Cuenca de los ríos Maipo y Mapocho. Esquicio de Chile.

empresa de adquirir mayor conocimiento, dados los desafíos ambientales que ya se podían vislumbrar.

Entre otras temáticas, se tenía un interés estratégico desde Aguas Andinas en profundizar el conocimiento sobre los glaciares, porque son reservorios que contribuyen a la escorrentía de los ríos Maipo y Mapocho, fuentes de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Santiago y en general en el desarrollo agrícola e industrial en la cuenca del Maipo. En verano, por el aporte directo por derretimiento: en invierno, por su aporte en el llenado del embalse del Yeso. Ese aporte tiene también un rol importante en la recarga de acuíferos que aún no ha sido muy estudiada.

En el campo de la investigación, en el año 2016 logramos crear la Corporación Chilena de Investigación del Agua, denominada Cetaqua Chile, un centro de investigación y desarrollo tecnológico en agua y medio ambiente a través del cual pudiésemos abordar dentro de las líneas que le fueron definidas, la temática de glaciares.

Cetaqua Chile, tiene como característica principal el hacer de puente entre las necesidades operativas de las empresas y el sector público, con la investigación realizada en los centros de investigación de las universidades, trabajando con un modelo colaborativo único. En menos de dos años, ha llegado a constituirse como centro Conycit y Corfo, al mismo tiempo que ha logrado incorporarse a la red de centros del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo-CNID.

Así fue como dada la cantidad de glaciares existentes en la cuenca Maipo-Mapocho y ante el hecho comprobado de lo que está ocurriendo con ellos en el mundo entero, uno de los tres primeros proyectos que decidimos lanzar fue el *Estudio del aporte glaciar a la cuenca del río Maipo*. La megasequía que nos estaba afectando y el aumento en el desarrollo de las actividades antrópicas de la ciudad como directamente en la cuenca nos obligaban a conocer de su comportamiento y la sostenibilidad de su aporte a los recursos hídricos.

Tanto para Aguas Andinas como para el país en general, el aporte hidrológico de las zonas de montaña en los Andes central es de gran importancia, debido a que de ella depende más de la mitad de la población de Chile y representa una proporción importante del PIB nacional, cuantificado para el año 2015 en el 44,6% del total.

Este estudio se centró en la cuenca del río Maipo, ubicada en la Región Metropolitana, al oriente de la ciudad de Santiago, y que contiene un área de montaña de alrededor de 5.000 km² con altitudes entre los 800 y los 6.500 msnm. En el contexto climático, ésta se encuentra dentro de una zona de clima templado, con precipitaciones medias de 320 mm concentradas en su mayor parte en una estación muy corta de invierno, y con una prolongada y seca estación de verano. El caudal medio del río Maipo, medido en la estación fluviométrica de El Manzano, tiene máximos y mínimos históricos de 234,8 m³/s y 37,1 m³/s, respectivamente (Aguas Andinas; 2010), con una media anual del orden de los 115 m³/seg. El régimen hidrológico del río es de carácter nivo-pluvial y se caracteriza por una gran variabilidad estacional de caudales, teniendo un máximo anual en el mes diciembre. El régimen de precipitaciones y la topografía de montaña permiten la acumulación de una cubierta nival que favorece un considerable aumento en los caudales durante el período estival producto del deshielo que coincide con la temporada de máxima demanda de recursos hídricos.

Estudios enfocados en el análisis de escenarios climáticos futuros han coincidido en que para fines del siglo XXI habrá un aumento sostenido de la temperatura media del aire, con mayores valores en altitudes sobre los 3.000 msnm durante los meses de verano austral (diciembre-marzo); dicho aumento de la temperatura del aire durante tormentas de invierno causarían mayores eventos de precipitación en sectores de alta montaña; no obstante ello, la precipitación media anual se vería reducida a un 75 y 90% respecto de la condición actual, con la consiguiente reducción en la escorrentía superficial en la zona central de Chile (BID y Universidad de Chile, 2009).

Esto impactará fuertemente la dinámica glaciar en términos de volumen, área y aporte glaciar a la escorrentía superficial durante la época de ablación (primavera-verano), afectando al sector agrícola y al abastecimiento de agua potable principalmente en años hidrológicos secos y muy secos (IPCC, 2014). Este esce-

nario de menor disponibilidad de recursos hídricos motivó el desarrollo del Proyecto MAPA, Maipo: Plan de Adaptación, teniendo como objetivo central el desarrollar un plan de adaptación con respecto a la variabilidad y el cambio climático en la cuenca del río Maipo a partir del análisis de las vulnerabilidades de los diferentes tipos de usuarios del agua. Dentro de los resultados se destaca el esfuerzo por modelar la hidrología de alta montaña incluyendo un ejercicio de modelación de los glaciares como fuente de recurso hídrico.

Proyecto con la Universidad de Chile

El estudio considera una modelación hidrológica desarrollada directamente por el equipo de Cetaqua Chile y la glaciológica a través de UNTEC, centro tecnológico de la Universidad de Chile con el equipo liderado por el Dr. James McPhee. Conviene señalar, a propósito de la Universidad de Chile, que fue en esa casa de estudios donde Louis Lliboutry enseñó y creó el primer laboratorio de glaciología en Chile. Ha sido el primer estudio con serie de caudales continuos durante el período de deshielo de octubre a marzo. Se instrumentaron 4 glaciares, los glaciares descubiertos Bello, Yeso, Pirámide, y el glaciar rocoso D073, con mediciones meteorológicas y de balance de energía. Se realizaron mediciones de caudal de cinco esteros y un análisis isotópico en ellos que permite evaluar el origen de sus aguas.

A través de esta campaña de terreno se pudo demostrar que en el verano 2017-2018, el aporte nival comienza al inicio de la fase de deshielo y se extiende hasta febrero-marzo, con un aporte máximo relativo de 40% en noviembre-diciembre. Por su parte, el aporte glaciar se inicia en diciembre y se extiende hasta mayo, con un máximo relativo de 40% durante enero.

Aunque se tiene la campaña solamente de un año, se constata que el aporte glaciar, junto con el aporte nival, son esenciales para satisfacer la demanda de agua de noviembre a mayo. Es un estudio que tiene que continuar en lo sucesivo monitoreando otros glaciares para tener mayor aproximación al aporte glaciar, el que permitirá una mejor calibración del modelo hidrológico actualmente en desarrollo. A su vez, la elevación de la isoterma 0°C junto con las actividades antrópicas que podrían acelerar el derretimiento de los glaciares tendría como consecuencia una disminución de los recursos hídricos disponibles en verano junto con un desfase entre el máximo de demanda y el máximo



El glaciar Pirámide con el glaciar del Yeso, en los Andes centrales.

de caudal (por el adelanto del deshielo). Louis Lliboutry ya lo había anticipado trabajando en la exploración de los glaciares en una época en la cual el embalse El Yeso no existía y la población de Santiago se limitaba a menos de 1,5 millones de habitantes, a diferencia de los 7 millones con que hoy en día cuenta.

Previendo estos pronósticos, Aguas Andinas ha elaborado un plan de adaptación para garantizar que las generaciones futuras puedan seguir viviendo con una seguridad hídrica. Así, la menor oferta hídrica en las fuentes del Grupo Aguas, como consecuencia del cambio climático, fue abordada utilizando modelos climáticos globales y modelos hidrológicos regionales. El análisis se realizó generando series de caudales mensuales para el período 1971 a 2060, en cada cuenca, usando el modelo hidrológico VIC forzado por series de temperatura y precipitación obtenidas de un conjunto de 99 simulaciones de modelos de circulación general (GCM) provenientes de las bases de datos de CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

Los resultados de las modelaciones señalan que en el caso del río Maipo, que representa el 80% del agua para el suministro de agua potable de Santiago, la proyección más probable es una disminución del 8% en el caudal medio anual para el futuro cercano (año 2030) respecto del caudal histórico y de un 12% para el período 2030-2045. Para la cuenca del río Mapocho, que representa el 8% de agua para el suministro, ambos valores fueron de -9% y -14%.

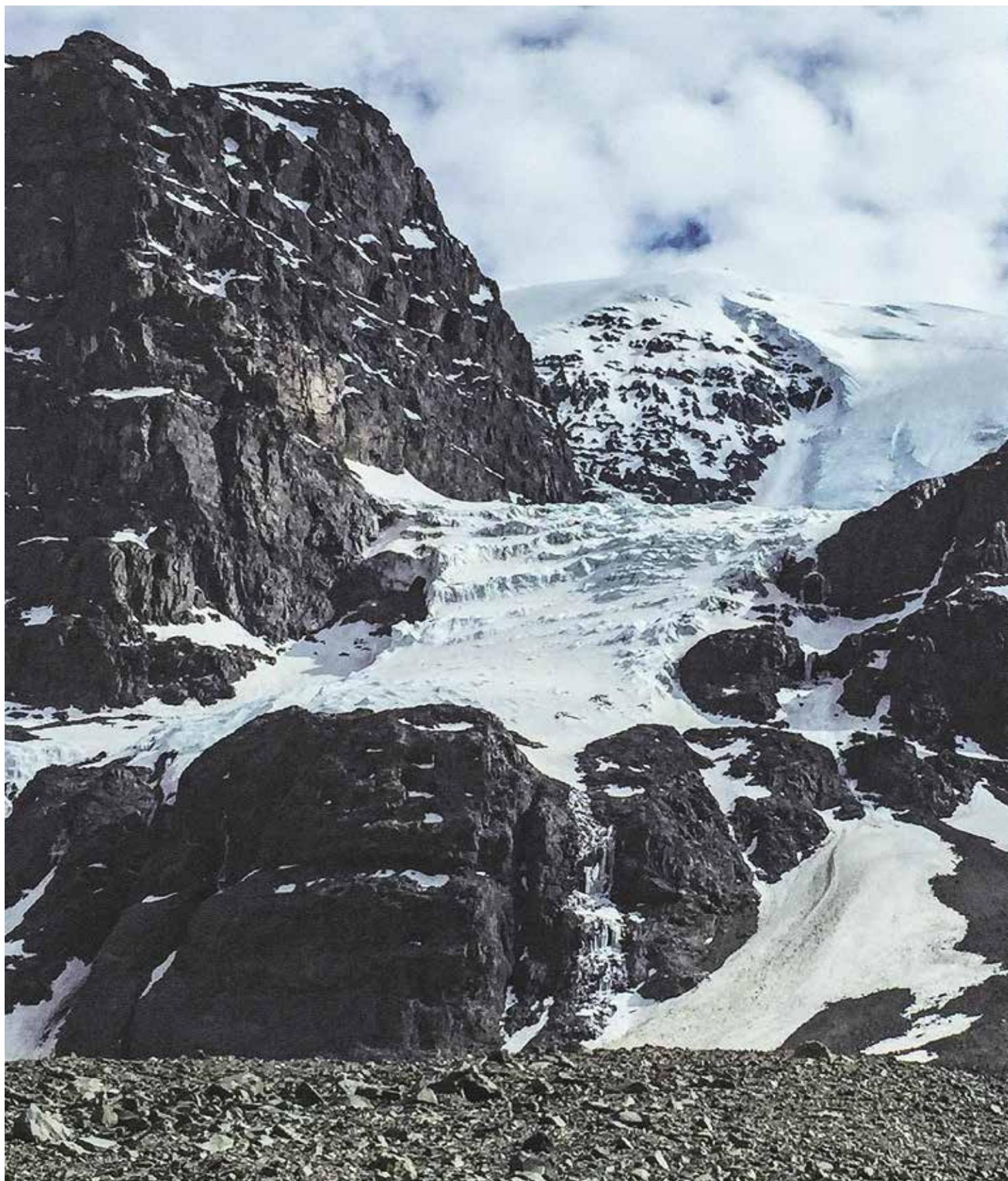
Respecto del ciclo estacional mensual, se espera una disminución fuerte durante el verano y otoño, la cual se

agudizaría en años más secos (por ejemplo, 95 y 98% de probabilidad de excedencia) y un leve aumento durante el invierno y la primavera. Además, se observa un adelantamiento al mes de noviembre del caudal máximo, a diferencia del mes de diciembre, en que ocurre actualmente.

A pesar de la disminución de la precipitación que se proyecta, los episodios de precipitación intensa en invierno seguirán siendo comunes, y es probable que generen mayores problemas de aluviones y/o arrastre de sedimentos debido a las proyecciones al alza de las temperaturas en alta cordillera, dejando mayor superficie expuesta a la caída de lluvia.

Un primer análisis señala también que, de acuerdo a la modelación numérica del último Estudio de Fuentes Subterráneas (2013) actualizada con motivo del presente plan, la oferta subterránea disponible para el Gran Santiago en un contexto de sequía y cambio climático podría reducirse en iguales proporciones a las fuentes superficiales.

Frente a estos déficits, Aguas Andinas trabajó en un plan de adaptación que considera, por el lado de la oferta, la captación de agua superficial en esteros afluentes del acueducto Laguna Negra, el cierre del embalse del Yeso de noviembre a marzo en caso de probabilidad de excedencia de 85%, nuevos pozos de aguas subterráneas, mayor eficiencia en las redes de agua potable disminuyendo las pérdidas de un 30 a un 20% (estándar OCDE) y gestión integrada con los demás usuarios de la cuenca, privilegiando el uso del agua para el abastecimiento humano. Se trabaja en capacitación escolar y





público promoviendo un uso responsable del agua. El apoyo a la edición de este libro relativo a glaciares forma parte de esta campaña de capacitación, en la que se quiere relevar la importancia que tienen estas grandes masas de hielo para la sustentabilidad de la cuenca del Maipo.

Cada año, para el Día Mundial del Agua, el 22 de marzo, Aguas Andinas normalmente organiza eventos en los que asisten, junto a autoridades gubernamentales, expertos en recursos hídricos, climatología y glaciología con el objeto de debatir respecto a los efectos del cambio climático y las necesidades de adaptación y mitigación. Al mismo tiempo, nos permite dar a conocer los avances de la empresa tanto en infraestructura (obras de seguridad y biofactoría) como en gestión (planes de continuidad de negocio, plan de eficiencia hidráulica).

Hoy nos hemos dado cuenta de que ello no es suficiente, puesto que en tales eventos nos encontrábamos entre conocedores de la materia, pero no llegaba a todos los tomadores de decisión y toda la población. Se determinó apoyar la edición de libros con temas específicos, como lo es este sobre glaciares, el cual permitirá una divulgación más amplia.

Louis Lliboutry constituyó el primer centro de glaciología en Chile, disciplina que requiere un mayor desarrollo y posiblemente la creación de un gran laboratorio o una red asociativa potente de los centros de investigación de glaciología existentes en el país. ¿Por qué este anhelo? Porque los glaciares cumplen dos funciones relevantes: la de reguladores climáticos y como grandes reservorios de agua dulce del planeta. En el caso de la Región Metropolitana, contribuyen al abastecimiento de agua potable de los más de 7 millones de habitantes que viven en la capital y sus alrededores, como así también al desarrollo humano y económico de la región.



Dada su gran capacidad para reflejar la luz solar, los glaciares contribuyen a que la temperatura del planeta se mantenga relativamente constante, y como reservorios de agua dulce contribuyen a sustentar la vida humana y los ecosistemas en las cuencas en que son aportantes.

◀ Glaciar La Paloma, diciembre 2015. Uno de los glaciares más vulnerables de los Andes, ubicado cerca de Santiago.

El rol trascendental de los glaciares como proveedores de agua

Edson Landeros / Gerente de Cetaqua Chile.

La Corporación Chilena de Investigación-Cetaqua Chile define como una de las líneas principales de investigación aplicada y desarrollo tecnológico el contribuir a generar soluciones y herramientas que permitan una mejor gestión de los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático.

Con esta mirada estratégica, colabora con los diversos centros científicos e investigadores para ir consolidando el trabajo y transferirlo a la sociedad en aplicaciones concretas, siendo los glaciares y su rol hidrológico un componente esencial de este desafío en el contexto de la zona central de Chile.

El desarrollo social y económico de Chile se encuentra estrechamente vinculado a los recursos hídricos. Una gran proporción de los sectores productivos que han sostenido el crecimiento del país, tales como los sectores de minería, forestal o agrícola, presentan una fuerte dependencia de este recurso y representan un porcentaje significativo del PIB nacional. Dado este contexto, el poder comprender el estado actual de los recursos hídricos y proyectar su evolución a medio y largo plazo resulta de gran relevancia para los intereses estratégicos del país, así como el desarrollo de tecnología que permita gestionar y operar en escenarios hídricos adversos.

Es por ello que, en los últimos años, los sectores público, privado y académico han incrementado los recursos e iniciativas tendientes a comprender mejor, por una parte, los distintos procesos hidrológicos que caracterizan los recursos hídricos a lo largo de la variada geografía de Chile y, por otro, a desarrollar e implementar proyectos e iniciativas orientadas a gestionar de una manera más eficiente en calidad y cantidad los recursos. Dentro de las iniciativas a destacar por su orientación estratégica se encuentra la creación, al amparo del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo CNID, de la Red de Investigación en Recursos Hídricos, que integra a más de 25 entidades de investigación de todo el país con el objetivo de coordinar esfuerzos y recursos para la ejecución conjunta de proyectos de investigación, desarrollo e innovación.

Un estudio encargado por el CNID a la Consultora Cameron Partners Innovation Consultants el año 2015 denominado Capacidades de investigación, desarrollo e

innovación en recursos hídricos de Chile, da cuenta de una tendencia creciente de publicaciones científicas en materia de recursos hídricos entre los años 2010 y 2015. Si bien ésta es una buena noticia respecto al interés en profundizar el conocimiento, la misma publicación indica que considerando la base de investigadores asociados a estas publicaciones, la producción por investigador es de menos de una publicación al año, lo cual es considerado bajo. Por otra parte, el financiamiento público en I+D en materia de recursos hídricos se ha incrementado notoriamente, lo que da cuenta de la creciente priorización que se le está asignando a este recurso dado su rol estratégico para el país.

Dentro de los aspectos en los cuales se debe profundizar el conocimiento están, sin duda, el rol de los glaciares en la hidrología superficial y subterránea de la cuenca. En Chile existen más de 1.700 glaciares de distinto tipo (DGA, 2011); el agua almacenada en estas masas de hielo es sin duda una reserva estratégica a futuro, por su gran volumen. En la zona de los Andes centrales los glaciares juegan un rol fundamental en la disponibilidad de recursos actual de las regiones IV, V, Metropolitana y VI, zona geográfica que concentra más de la mitad de la población de Chile y representa una proporción importante del PIB nacional cuantificado para el año 2015 en el 44,6% del total (Sofofa 2016), en particular para la zona central de Chile que se caracteriza por su clima semiárido, con un prolongado período seco (DGA 2009).

El estudio de glaciares es en sí una actividad compleja y que requiere una gran cantidad de recursos, en correspondencia con ello. La cantidad de glaciares

estudiados en la cuenca del Maipo es muy baja en comparación con los 768 glaciares catastrados con una superficie total de 372,72 km (DGA, 2011). No obstante ello, se observa un aumento en el número de estudios realizados en los últimos años en la cuenca del río Maipo, centrados mayoritariamente en los glaciares San Francisco, Pirámide, Echaurren Norte, Juncal Sur y Olivares (Alfa, Beta y Gamma), los que abarcan gran parte de los estudios y mediciones. En la mayoría de ellos se han observado tanto retroceso frontal como adelgazamiento y reducción de superficie.

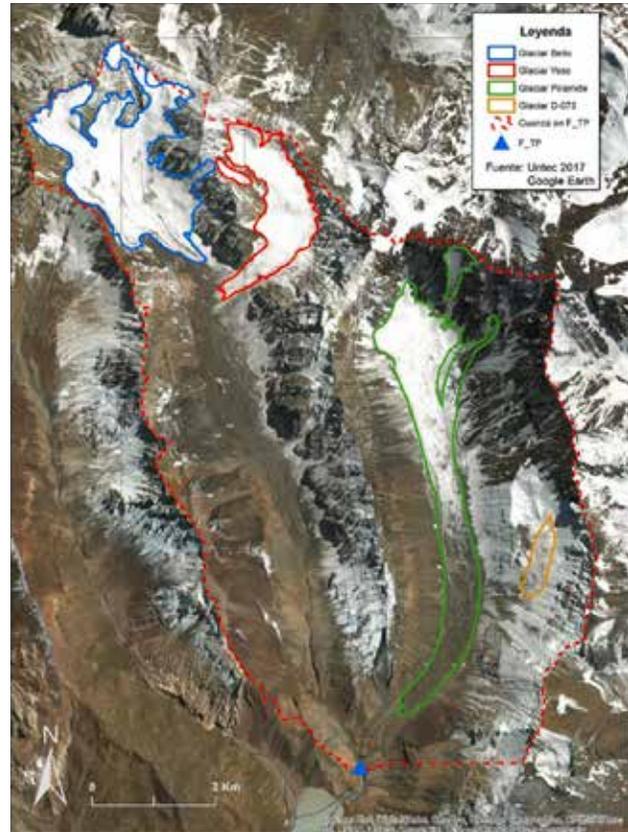
El aporte de los glaciares a la escorrentía del río Maipo varía de acuerdo con el tipo de año hidrológico. De los estudios realizados al respecto se ha señalado que éste es poco significativo en los años de abundancia y proporcionalmente significativo en los años secos, lo que da cuenta de su rol de almacenamiento y regulación natural.

Mediciones fluviométricas de glaciares

Además de las variables climáticas que inciden en el aporte glaciar a la escorrentía del río Maipo, ésta también depende fuertemente de la tipología de glaciar. Un glaciar descubierta tiene un comportamiento diferente a un glaciar cubierto o de roca, y entender estas diferencias es clave a la hora de proyectar escenarios futuros de cambio climático. Al respecto, durante los últimos años se han comenzado a realizar estudios que buscan comprender y simular estas diferencias, utilizando para ello una gran diversidad de recursos.

Cetaqua Chile, apoyado por Aguas Andinas, la Sociedad del canal de Maipo y la Junta de Vigilancia del Río Maipo, en conjunto con AMTC-Universidad de Chile, ha estado desarrollando mediciones fluviométricas, meteorológicas e isotópicas de glaciares de distinto tipo ubicadas en la cuenca superior del río Yeso, identificando un aporte para el período de ablación 2017-2018 de los glaciares del 40% en promedio. Los aportes directos del derretimiento de glaciares aparecen de forma considerable en diciembre, asociado al aumento de los caudales. Tanto los caudales como la fracción de aporte correspondiente a esta fuente alcanzan sus mayores valores en enero. Posteriormente, durante marzo, tienden a disminuir, a la vez que los caudales totales disminuyen.

Los resultados obtenidos van en línea con estudios previos, como los de Peña & Nazarala (1987), que indi-



Estudios realizados en los glaciares de la cuenca del río Maipo, Yeso, Bello, Pirámide y D-073. 2018.

can que en el año hidrológico más seco registrado en la cuenca, período 1968/69, el aporte glaciar de acuerdo a su metodología fue aproximadamente del 67% de la descarga total registrada en dicho verano. Por su parte, para el período 1985/86, que fue un año seco, el aporte glaciar habría alcanzado el 24,3% en verano.

Para un año catalogado como normal los porcentajes son menores, alcanzando el 11,3% en verano y un 6,8% anual. En otro estudio, Álvaro Ayala el año 2016 concluyó que durante años muy secos la contribución glaciar a la escorrentía corresponde a un 67% en verano y un 42% del caudal anual. Para un año normal los porcentajes son menores, alcanzando un 30% en verano y 10% como aporte anual. Yuri Castillo en el año 2015, indica que, en años hidrológicos normales, el aporte glaciar puede llegar a ser el 44% del caudal total en verano y 25% del caudal total anual. Para un año seco los porcentajes alcanzan el 48 y 27%, y para uno muy seco, de un 81 y 45%, respectivamente, como aportes de verano y anual (Maipo en el Manzano).



Las mediciones realizadas durante la campaña 2017/2018 muestran el rol de las unidades geológicas en la zona, identificándose una proporción importante de agua cuyo origen pueden ser glaciares rocosos o cubiertos y cuya descarga ha interactuado con el acuífero de la zona. Esta relación es un fenómeno que aún es necesario estudiar con mayor profundidad.

Los datos de las mediciones fluviométricas, meteorológicas, topográficas, químicas obtenidos durante el período de ablación 2017/2018 en 4 glaciares de distinto tipo son posiblemente únicas en su tipo, y su análisis, por una parte, nos está permitiendo comprender de mejor manera el complejo funcionamiento hidrológico de la cuenca que se está conceptualizando en un modelo numérico.

A partir de estos estudios están apareciendo nuevos desafíos y la necesidad de continuar replicando el trabajo realizado en otras zonas de la cuenca para validar los resultados obtenidos.

Existiendo diferencias en los resultados, es evidente la importancia que poseen los glaciares en la escorrentía de sus cuencas, aumentando drásticamente su aporte relativo a medida que aumenta la escasez hídrica.

El camino iniciado por Louis Lliboutry en la década de 1950 ha sido clave en la formación de capacidades de investigación en Chile, donde su legado de conocimiento e información es válido hasta el día de hoy, permitiéndonos más allá de los avances en la téc-



nicas y metodologías para entender el funcionamiento de un glaciar, tener un registro visual de su estado hace más de medio siglo.

Muchos de los actuales especialistas en glaciología de Chile han continuado sus pasos bajo el amparo de su legado. El desafío de hoy en día es poder generar información relevante del comportamiento de los



Arriba, el glaciar Pirámide, fotografiado por Louis Llibotry en 1954. Abajo, la misma perspectiva tomada desde otro ángulo en 2018.

glaciares y su contribución hidrológica y ambiental para proyectar su evolución a futuro bajo los distintos escenarios de cambio climático posibles, cuya tendencia para la zona de los Andes centrales es desfavorable para la conservación de los glaciares.



Los requerimientos de recursos hídricos en la cuenca del río Maipo, complementados por las condiciones climáticas semiáridas, ponen de manifiesto el rol trascendental de los glaciares como proveedores de agua, en especial en la temporada estival.

Ley de glaciares en Chile: el tortuoso camino para protegerlos

Sara Larraín / Programa Chile Sustentable, Fundación Sociedades Sustentables, Santiago, Chile.

Los glaciares representan un bien público esencial y estratégico para la sociedad, como reservas naturales de agua dulce en el contexto del calentamiento global, permitiendo niveles básicos de seguridad hídrica en este contexto adverso. Los pronósticos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), ya en 2007 identificaron a Chile central como una «zona crítica» donde «la disponibilidad de agua y la generación hidroeléctrica se verán mermadas seriamente debido a la reducción de los glaciares» (IPCC, 2007b: p.606). Años después, el IPCC alertó sobre el estado de los glaciares en regiones de montaña, y concluyó que la tendencia de deterioro sería

particularmente pronunciada en los Andes y la Patagonia, donde algunas regiones de cordillera perderían la mayoría de sus glaciares durante este siglo (IPCC, 2013: FAQ4.2, pp.345-346).

Chile semiárido, glaciares y cambio climático

Esta situación se calificó como un riesgo crítico a mediano y largo plazo (años 2030-40 y 2080-2100) por «la reducción de disponibilidad de agua en zonas semiáridas y dependientes del derretimiento de glaciares», lo cual provocará el colapso de economías de subsistencia basadas en la agricultura, además de inestabilidad económica generalizada (IPCC, 2014: pp.79, 119).



Con respecto a las reservas urbanas de agua, el IPCC afirma que «la disminución de la escorrentía derivada del derretimiento de glaciares y nieves presenta un importante desafío de adaptación para muchas ciudades, como por ejemplo Santiago de Chile» (IPCC, 2014: pp.1531-1532), y por esta razón destacó la necesidad de reevaluar las prácticas de gestión del agua e implementar «reformas constitucionales y legales», tomando en cuenta la vulnerabilidad frente a la escasez hídrica (IPCC, 2014: p.1543).

Además de los aspectos adversos del cambio climático sobre los glaciares, en el caso de Chile hay que agregar los efectos de la actividad minera, cuyas prácticas provocan impactos directos en los glaciares, los cuales han sido ampliamente descritos por la literatura científica (Contreras, A., y Illanes, J. L. (1992); Apablaza *et al.*, (2001) p.174; Valenzuela (2004) p.471; Brenning y Azócar (2010) p. 151-152, 155). En particular, investigadores y académicos como Brenning y Azócar han caracterizado y cuantificado estos impactos en Chile central (Brenning (2008); Azócar y Brenning (2008); Brenning y Azócar (2010)). En base al estudio de 26

faenas mineras, han descrito tres prácticas destructivas: la remoción completa o parcial de glaciares, la creación de depósitos de lastre y desechos sobre glaciares; y la construcción de caminos e infraestructura encima de glaciares (Brenning y Azócar (2010), pp.145-147).

Estas prácticas, además de provocar pérdida de reservas de agua dulce, han intensificado los riesgos de deslizamientos de tierra, fenómenos aluvionales y la desestabilización de los servicios ecosistémicos en las cuencas que poseen glaciares en sus cabeceras.

Por esta razón, resulta obvio destacar que a nivel de la regulación nacional, «es más fácil contrarrestar los efectos adversos de la minería que los del cambio climático» (Berland, 2016). Actualmente, la inexistencia de leyes específicas para proteger los glaciares perpetúa su desprotección y aumenta la vulnerabilidad humana, ecológica y económica frente al cambio climático.

Es por ello que durante la última década, la sociedad chilena ha puesto el tema de la preservación de los glaciares en el debate nacional (Bórquez *et al.*, (2006); Conama, (2009); Chile Sustentable (2013); Berland (2016). Como se presenta a continuación en este

Nevero en el valle de la Engorda, Chile central.



artículo, está por verse si los ciudadanos y parlamentarios logran superar los obstáculos políticos para avanzar en esta urgente legislación.

Iniciando la ruta en defensa de los glaciares

El desarrollo de las propuestas regulatorias para la protección de los glaciares en Chile nace en 2004, en el contexto del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto Pascua Lama, de la minera canadiense Barrick Gold, en la cuenca del río Huasco, en la Región de Atacama. Dado el hecho de que dicha explotación minera incluía la remoción de glaciares en operaciones de rajo abierto, un conjunto de organizaciones ecologistas y académicas, además de oponerse al proyecto, iniciaron un proceso de incidencia ciudadana para avanzar hacia una normativa de protección de los glaciares. Ello incluyó revisión de la información científica sobre los glaciares chilenos y los servicios ambientales que proveen a la sociedad y los ecosistemas, además de las fórmulas de protección de estas masas de hielo en la legislación internacional.

En 2005, en el contexto de las campañas presidenciales, con el fin de visibilizar el tema en la agenda política, los ecologistas integraron la protección de los glaciares como una de sus demandas a los candidatos a la presidencia de la República (Agenda Ambiental 2005). Lo que lograron con la entonces candidata Michelle Bachelet fue un acuerdo programático, el cual incluyó el compromiso de «Proteger los glaciares y no

aprobar su remoción y/o destrucción», como parte de la plataforma «10 Compromisos para la Sustentabilidad Ambiental del Desarrollo Nacional» (conocido como el Acuerdo de Chagual), y oficializado el 21 de noviembre de 2005, en virtud del cual un conjunto de líderes ecologistas concedieron su apoyo político a dicha candidata.

Posteriormente, en 2006, se acordó con el gobierno electo que la meta de cumplimiento respecto de este acuerdo en particular sería una Ley para la Protección de Glaciares, la cual sería formulada por las organizaciones ecologistas y entregada al gobierno para su patrocinio y envío a tramitación al Congreso Nacional.

Para tal efecto, Chile Sustentable, al que las organizaciones del Acuerdo de Chagual encomendaron coordinar la tarea, estableció un grupo de trabajo interinstitucional, el cual concluyó e hizo entrega de la propuesta «Proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares» a la Secretaría General de la Presidencia, el 30 de octubre de 2006.

A continuación se inició, a solicitud del gobierno, una ronda de presentaciones del Proyecto de Ley a diversos ministerios e instituciones públicas, como la Dirección General de Aguas (31.10.06), Ministerio de Agricultura (14.12.06), Ministerio de Minería y Energía (3.01.2007) y Ministerio de Defensa Nacional (22.01.2007), entre otros (Bórquez *et al.*, 2006). En una segunda etapa, Chile Sustentable desarrolló talleres de difusión sobre la iniciativa de ley en diversas

Ruta de acceso al cerro Marmolejo. Vista del campamento 1 a 4.100 m.



regiones del país, para fortalecer las demandas ciudadanas de proteger los glaciares como patrimonio nacional y público, y como reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad y los territorios.

El contenido del Proyecto de Ley

El Proyecto de Ley planteó como objetivo regular la protección de los glaciares como objetos de seguridad estratégica en la provisión de agua dulce a las cuencas hidrográficas, el mantenimiento de los ecosistemas, el abastecimiento de las poblaciones humanas y sus actividades productivas; la preservación de los valores ambientales, escénicos y los servicios ambientales que prestan para la conservación de la biodiversidad; y al mismo tiempo prevenir las acciones antrópicas que puedan afectarlos. La propuesta incluyó una clasificación de los glaciares y su protección, independiente de su denominación y del área donde se encuentren; la creación de

un Registro Nacional de Glaciares en base al inventario realizado en 2000 por la Universidad de Chile (U. de Chile-CECs (2002), Rivera (2002)), que consideró los trabajos científicos existentes a la fecha; y la definición de actividades permitidas, restringidas y prohibidas en glaciares.

En referencia a la terminología, se utilizaron los conceptos y definiciones provenientes de los estudios científicos, priorizando la entregada por Llibourty (1956), que contaba con mayor consenso entre los especialistas (con elementos de Marangunic (1979^a), Garín (1986) y Rivera (1990)), y los términos empleados normalmente en la legislación ambiental chilena. En cuanto al tipo de protección, aunque en la legislación comparada existen fórmulas de protección de glaciares vinculados a regímenes de protección de otros bienes jurídicos como recursos hídricos, nevados o parques nacionales, para el Proyecto de Ley se optó

El glaciar del Marmolejo en los Andes Centrales. El cerro Marmolejo, de 6.108m, es el seis mil más austral del mundo. Lleva el nombre del primer historiador de Chile, Alonso de Góngora Marmolejo, conquistador y soldado de Pedro de Valdivia.



Intervención de glaciares por faenas mineras, zona central de Chile

Fuente: DGA 2009

Cuenca del río Huasco: Mina Pascua Lama, de Barrick (29° 19' S; 70° 02' W), ubicada en la subcuenca del río Carmen. El lugar proyectado para el botadero Nevada Norte ubicado en la cabecera del río Estrecho cubrirá un glaciar de roca.

Cuenca del río Choapa: Mina Los Pelambres, de Antofagasta Minerals (31.6° S; 70,5° W). Varios glaciares de roca afectados por remoción, depósitos de estériles y construcción de caminos.

Cuenca del río Aconcagua: Mina Sur Sur, División Andina de CODELCO (33° 10' S; 70° 15' W). Varios glaciares de roca intervenidos por remoción, botaderos, construcción de instalaciones mineras y caminos.

Cuenca del río Maipo: Mina Los Bronces, de Anglo American (33° 09' S; 70° 17' W). Excavación de 2 glaciares de roca, construcción de caminos y depósitos de estériles.

por regular directa y exclusivamente la protección de los glaciares como un objeto particular de tutela, independiente de su forma o denominación (Chile Sustentable (2006), Grupo de Trabajo de Conservación de Glaciares (2006)). Esta fórmula de protección directa es semejante a la regulación establecida para la protección de los glaciares de los Pirineos en España, y del enorme glaciar Columbia, en la frontera entre Estados Unidos y Canadá (Chile Sustentable, 2006).

Como referencias legales y reglamentarias se integraron principalmente la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente; la Ley 18.362, que crea el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado; la Ley 17.288, sobre Monumentos Nacionales; el Código de Aguas; el Código de Minería; la Convención Washington de 1940; la Convención de Cambio Climático de 1992 (ratificada en 1994), y el DFL N° 1 del Ministerio del Interior, de julio de 2006 (Chile Sustentable, 2007), entre otros.

En la elaboración del Proyecto de Ley también se consideraron las mociones del diputado Leopoldo Sánchez (Boletín 3947-12 de 2005) y del senador Antonio Horvath (Boletín 4205-12 de 2006), ingresadas al Congreso Nacional mientras sesionaba el Grupo de Trabajo de Conservación de Glaciares.

Número de glaciares y superficie glaciar en Parques Nacionales

Fuente: Segovia, A. (2015)

Nombre Región	Nº de glaciares y superficie glaciar en Parques Nacionales	Superficie (km ²) de glaciares en Parques Nacionales	Nº total de glaciares	Sup. (km ²) Total de glaciares	% de glaciares en Parques Nacionales	% de Superficie glaciar en Parques Nacionales
Arica-Parinacota	104	13,0	327	30,4	31,8 %	42,8 %
Tarapacá	13	0,8	91	6,4	14,3 %	13,1 %
Antofagasta	7	0,9	139	7,2	5 %	12,6 %
Atacama	0	0	749	87,9	0 %	0 %
Coquimbo	0	0	836	48,3	0 %	0 %
Valparaíso	0	0	715	135,8	0 %	0 %
Metropolitana	0	0	999	388,3	0 %	0 %
O' Higgins	0	0	683	292,3	0 %	0 %
Maule	0	0	218	38,2	0 %	0 %
Bio-Bío	16	7,7	194	39,8	8,2 %	19,3 %
Araucanía	92	45,6	140	64,5	65,7 %	70,7 %
Los Ríos	17	17,3	50	36,8	34,0 %	46,9 %
Los Lagos	756	382,3	3.225	928,9	23,4 %	41,2 %
Aysén	2.857	8.169,4	8.943	10.214,7	31,9 %	80,0 %
Magallanes	4.096	10.130,5	6.805	11.321,9	60,2 %	89,5 %
Total	7.958	18.767,5	24.114	23.641,4	33,0 %	79,4 %

La ruptura del acuerdo político

A pesar del compromiso del gobierno electo de patrocinar el Proyecto de Ley, no lo hizo, debido a la influencia de las empresas mineras agrupadas en la Sociedad Nacional de Minería y el Consejo Minero; entre ellas, la estatal Codelco y las privadas Barrick, Anglo American y Antofagasta Minerals, que a la fecha (2006) estaban interviniendo glaciares.

Entre las razones argumentadas por los mineros se destacó que los glaciares se sobreponían a las concesiones mineras; que los resguardos de la legislación ambiental de la época eran suficientes para proteger los glaciares «caso a caso», y que «declarar los glaciares como bienes nacionales de uso público... era una materia compleja que puede afectar el derecho de propiedad...» (Consejo Minero, 2007).

Como moneda de cambio, el gobierno de Bachelet ofreció a las organizaciones ciudadanas formular una Política y una Estrategia Nacional de Glaciares, crear una Unidad de Glaciología dentro de la institucionalidad pública y realizar un inventario público de los glaciares existentes en el territorio nacional.

Con el objetivo de revertir el bloqueo político de las mineras, las organizaciones ecologistas y gremios agrícolas miembros del Grupo de Trabajo para Conservación de Glaciares presentaron la propuesta de Ley en el Senado, donde el senador Antonio Horvath (RN) había ingresado una moción (Boletín 4205-12) con el mismo fin, patrocinada por los senadores Rodolfo Stange (RN) Alejandro Navarro (PS), y Guido Girardi (PPD). La moción, incluyendo las propuestas del Grupo de Trabajo, se aprobó en general por unanimidad en la Comisión de Medioambiente y Recursos Naturales y en la Sala del Senado en 2007.

No obstante, como la iniciativa era fuertemente resistida por el gremio minero, e incluía algunas atribuciones regulatorias e institucionales privativas del Ejecutivo, y éste no la patrocinó, la tramitación en particular del proyecto de ley no prosperó, siendo luego archivado.

Como sucedáneo a las pretensiones de ciudadanos y parlamentarios, en los dos años siguientes, el gobierno de Bachelet avanzó en las instancias administrativas comprometidas: el Consejo de Ministros de la Comisión Nacional de Medio Ambiente (Conama) aprobó el 28 de mayo de 2008 un Plan de Trabajo para la Política Nacional de Glaciares (Acuerdo N° 379/2008),

vigente desde 2009; una modificación al Reglamento del SEIA de la Ley 19.300, para obligar el ingreso al SEIA mediante estudio de aquellos proyectos que puedan intervenir o impactar glaciares (Acuerdo N° 380/2008), hoy vigente; una modificación del Catastro Público de Aguas DS. N° 1220 del 30/12/1997, para incluir un Inventario de Glaciares (Acuerdo N° 381/2008). Asimismo, creó la Estrategia Nacional de Glaciares en 2009, y aprobó 600 millones de pesos para que la Dirección General de Aguas iniciara el año 2008 el estudio y monitoreo de los glaciares del territorio nacional, lo cual permitió al gobierno publicar el Primer Inventario Público de Glaciares el año 2009.

El año 2012, en el contexto de las denuncias sobre túneles realizados por la minera Anglo American bajo glaciares sin autorización en la comuna de Lo Barnechea y San José de Maipo, en la cordillera de Santiago (*La Segunda*, 2011), y la expansión de faenas mineras denominada Andina 244, de Codelco (Codelco-GAC, 2013), con extensa intervención sobre glaciares en la cuenca del río Aconcagua, los senadores desarchivaron el proyecto de ley del Boletín N° 4205-12 y reanudaron su tramitación.

Durante 2013, la Comisión de Medio Ambiente del Senado inició audiencias públicas, y abrió un período de indicaciones; pero la moción no logró ser votada en particular, debido a la gran oposición de las mineras (Anglo 2013), (Codelco 2013), (Sonami 2013).

Oficialmente, el gobierno de Sebastián Piñera se negó a patrocinar el proyecto, argumentando que la reforma del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (DS. N°122 de 2008 que modifica el DS N°40) era garantía suficiente para la protección de glaciares, pues obligaba a ingresar al Sistema de Evaluación Ambiental a aquellos proyectos de inversión que pudieran alterar las características de los glaciares incorporados en el Inventario Público a cargo de la Dirección General de Aguas (MMA, 2013).

Apertura, congelamiento y cierre de la segunda iniciativa en defensa de los glaciares

Iniciado un nuevo gobierno y renovado el Parlamento en 2014, se presentó una nueva moción parlamentaria para la protección de los glaciares, esta vez desde la Cámara de Diputados. La propuesta, titulada «Ley de Protección y Preservación de Glaciares, Ambientes Glaciares y Peri Glaciares (Boletín N° 9364-12),





fue impulsada por un grupo transversal de parlamentarios, liderados por el diputado Melo (PS), junto a Girardi (PPD), Molina (UDI), Vallejo (PC), Jackson (Ind), Soto (PS), Lemus (PS), Mirosevic (Ind) y Vallespin (DC).

El enfoque y contenidos de la moción eran coherentes con la anterior iniciativa del Senado, destacándose la protección de todos los glaciares del territorio nacional; una mayor precisión en las definiciones y ámbito de aplicación; coincidencia en las actividades permitidas, restringidas y prohibidas; y la entrega de mayor rango legal al Inventario de Glaciares como un registro público, además de establecer auditorías ambientales a los proyectos en operación que estuvieran interviniendo glaciares, a objeto de exigirles eventuales reparaciones y prevención de nuevos impactos.

En su primer mensaje a la Nación el 21 de mayo de 2014, la Presidenta Bachelet (en su segundo mandato) anunció su voluntad política de apoyar dicha iniciativa parlamentaria para la protección de glaciares. Ello desencadenó una rápida tramitación del proyecto en la Comisión de Medio Ambiente de la Cámara de Diputados, iniciándose en junio las audiencias públicas en espera del patrocinio del gobierno, el cual llegó casi un año después, en marzo de 2015, mediante indicación sustitutiva de la moción parlamentaria.

La indicación del Ejecutivo eliminó la protección general de los glaciares, restringiendo la protección general sólo a los glaciares ubicados dentro de Parques Nacionales o Regiones Vírgenes, y todos aquellos que la autoridad decretara como Reservas Estratégicas de Agua (artículo 5°). Ello contradujo el enfoque objetivo de la moción parlamentaria, que planteaba la protección general de todos glaciares; y reforzaba dicha protección a través de la herramienta de prohibiciones, en aplicación del principio precautorio para la sustentabilidad y seguridad hídrica, tal como recomienda el IPCC en las políticas de adaptación al cambio climático.

La propuesta del gobierno fue criticada por los autores del proyecto de ley, pues si bien la mayor superficie de los glaciares (88%) en Chile está en la zona austral (al sur de Aysén), donde coinciden con áreas protegidas, no ocurre lo mismo en la zona norte (Arica a Choapa), donde se ubica el 1% de la superficie glaciar, ni en la zona centro (Aconcagua a Maule) donde se localiza solo el 4% de la superficie glaciar (DGA, 2018).

Expresaron preocupación adicional, porque entre Atacama y Maule, donde se ubican las regiones que sufren mayor estrechez hídrica, sólo el 11% de los glaciares está en áreas protegidas (SNASPE), pero ninguno localizado en Parques Nacionales (Segovia, 2014; Chile Sustentable, 2015).

Por esta razón, el proyecto tuvo una tensa y tortuosa tramitación en la Comisión de Medio Ambiente de la Cámara, donde se evidenciaron los desacuerdos entre la Dirección General de Aguas (ente a cargo de los glaciares), el Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Hacienda, que siempre se opuso a la moción, —parafraseando el argumento del Consejo Minero— de que «cualquier protección de glaciares generaría incertidumbre para la inversión minera», cuyas concesiones se sobreponen a las áreas donde se localizan los glaciares. Por esta misma razón, una vez aprobado el proyecto en la Comisión de Medio Ambiente, el Ministerio de Hacienda bloqueó su tramitación en la Comisión de Hacienda (donde debían votarse los artículos referidos a presupuesto de la ley, antes de ser votado por la Sala de la Cámara), donde el Proyecto pasó dos años, sin ser puesto en tabla para su votación.

Una evaluación completa del texto aprobado por la Comisión de Medio Ambiente permite objetivamente valorar un avance en relación a la actual situación de inexistencia jurídica y desprotección de los glaciares del territorio nacional. Entre estos avances cabe destacar las definiciones de a) Glaciar y su entorno, b) Cuenca glaciar, c) Funciones ecosistémicas, d) Subsuelo, e) Reserva estratégica glaciar, g) Prohibición y restricción de actividades en los glaciares y su entorno, lo cual, sin duda, constituye un aporte frente a la línea de base paupérrima existente al momento de la evaluación de «Pascua Lama» y «Andina 244». Por esta razón, organizaciones ciudadanas y parlamentarios concluyeron que era necesario desbloquear la tramitación del proyecto de ley en la Comisión de Hacienda y reponer en Sala el texto de la indicación parlamentaria al artículo 5°, que permitía recuperar el mandato de proteger todos los glaciares (Chile Sustentable, 2018).

El escenario en que estamos

Pero a pocos meses de asumido el segundo mandato de Sebastián Piñera, el 20 de junio de 2018, la ministra de Medio Ambiente de la nueva administración, Marcela Cubillos, retiró de la Comisión de Hacienda

las indicaciones del gobierno anterior (que patrocinaban y financiaban el proyecto de Ley de Protección y Preservación de Glaciares, Ambientes Glaciares y Peri Glaciares (Boletín N° 9364-12). Esta acción significó la muerte del proyecto de ley, y por tanto la perpetuación de la situación vigente, donde la deficiente línea de base jurídica sobre los glaciares posibilita perpetuar su intervención y destrucción por causa de las faenas mineras, las que justamente se concentran en la cordillera de la zona norte y centro del país, las más afectadas por la restricción hídrica agravada por el cambio climático.

Esta acción del gobierno fue interpretada como una declaración de guerra por los parlamentarios impulsores de la iniciativa, los cuales habían aprobado días antes (el 6 de junio) una nueva moción parlamentaria que «Modifica el Código de Aguas para impedir la constitución de derechos de agua sobre glaciares» (Boletín 11.597-12) presentada por los diputados Melo, Lemus, Ciciardini, Pacheco, Saldívar y Espinoza (PS), Carvajal y Girardi (PPD) y Vallejo (PC) en enero de 2018.

Para contrarrestar el retiro del proyecto de Protección y Preservación de Glaciares, Ambientes Glaciares y Peri Glaciares (Boletín N° 9364-12), los diputados incluyeron en la nueva moción una definición de glaciares; y también actividades prohibidas, a objeto de asegurar la protección y prevenir la destrucción de los glaciares, (Comisión de Medio Ambiente, 2018).

Esta moción, cuyo texto no requiere el patrocinio del gobierno, fue votada a favor, y en forma unánime (142 votos), por el Pleno de la Cámara, y constituye una excelente alternativa para mejorar la protección de los glaciares, mientras no exista una ley especial para ello. La ruta de esta moción requiere votación en particular en la Comisión de Medio Ambiente y Sala de la Cámara, para luego tramitarse en el Senado.

El retiro del gobierno de la moción de 2014 (Boletín N° 9364-12) también detonó la reacción legislativa del Senado, donde un conjunto de senadores, compuestos por Allende (PS), Ossandón (RN), Ordoñez (PPD), Prohens (UDI) y Girardi (PPD), liderados por este último, presentaron el 4 de julio de 2018 una moción parlamentaria, denominada «Ley sobre Protección de Glaciares» (Boletín N° 11.876-12).

Dicho proyecto, a pesar de ser boicoteado por el gobierno, quien logró el 22 de agosto que los senado-

res oficialistas (Ossandón y Prohens), que inicialmente apoyaron el proyecto, retiraran su firma de patrocinio, actualmente continúa su tramitación en la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales del Senado, donde se desarrolla un período de audiencias públicas.

El avance en la tramitación de estas leyes para la protección de los glaciares en Chile está por verse, dado el enorme desbalance de poder entre los sectores interesados en su conservación y aquellos interesados en perpetuar su desprotección.

No obstante, la mayor conciencia de la sociedad chilena sobre la función estratégica de los glaciares para su subsistencia y la seguridad hídrica, en el contexto del cambio climático, ha empezado a inclinar la balanza hacia políticas públicas que priorizan su protección.

En zonas semiáridas, como Chile central, que representa el núcleo demográfico, político y económico del país, y donde los glaciares son un importante respaldo hídrico tanto en verano como en períodos de sequía, el valor estratégico de los glaciares ha dejado de ser un concepto académico y se los visualiza como activos económicos y de seguridad más cruciales que el mismo cobre (Berland, 2016), en nombre del cual hasta hoy se continúan destruyendo.



Los estudios muestran que casi dos tercios de todas las intervenciones sobre glaciares documentadas no han sido declaradas en las Evaluaciones de Impacto Ambiental presentadas por las empresas mineras, lo cual evidencia la necesidad de mayor regulación y fiscalización de esta actividad extractiva para garantizar la protección de los glaciares.

Páginas 276 y 277: La operación de la minera Andina podría afectar los glaciares Paloma Norte y Olivares Alfa.

GLOSARIO

Albedo

Es el porcentaje de la radiación solar incidente que es reflejada por la superficie del glaciar. Las superficies claras, como la nieve, tienen un mayor albedo, mientras que las superficies oscuras, como los bosques, rocas u océanos, tienen un albedo menor.

Balance de masa

Corresponde a la variación de la masa de un glaciar durante un periodo definido, que puede ser una estación, por ejemplo un verano o un año o varios años.

Dinámica de un glaciar

Es el movimiento o flujo de la masa de hielo. El hielo fluye debido a la fuerza de gravedad y gracias a dos mecanismos principales: la deformación del hielo y el deslizamiento sobre la base de la roca o sedimento sobre la que se encuentra el glaciar.

Glaciar

Es una masa perenne de agua terrestre en estado sólido con evidencia de flujo actual o pasado, cualquiera sea su forma geométrica, ubicación y dimensión (glaciares descubiertos y cubiertos, glaciares rocosos glaciogénicos).

Masa de un glaciar

Corresponde a la cantidad de hielo, nieve y neviza que forman el glaciar, lo que se mide en unidades de masa; por ejemplo, gigatoneladas.

Modelación de flujo

Es el uso de herramientas computacionales para resolver las ecuaciones matemáticas que describen la física de los glaciares. Al resolver estas ecuaciones se pueden obtener las velocidades de desplazamiento del hielo.

Sublimación

Es el proceso por el cual un sólido pasa al estado de vapor. En el caso del hielo, la sublimación requiere mucha energía, más de ocho veces más que la fusión. La sublimación es sólo activa por tiempo frío, seco y ventoso.

Zona de acumulación

Corresponde a la parte alta del glaciar donde el balance de masa superficial es positivo al final del año hidrológico. Es decir, la cantidad de masa que recibe la superficie del glaciar principalmente por las nevadas, es mayor a la cantidad de nieve perdida por el derretimiento y otros fenómenos de ablación en un período determinado; por ejemplo, un año.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía no exhaustiva de Louis Lliboutry

Libros

Lliboutry Louis, «Aimantation des aciers dans les champs magnétiques faibles, effets du temps, des tensions, des chocs, des champs magnétiques transversaux», tesis presentada a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Grenoble, para la obtención de un doctorado en ciencias, París, Masson y Cie, 1950.

Lliboutry Louis, Estudio cartográfico, geológico y glaciológico de la zona del Fitz Roy, Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Filosofía y Letras, Instituto de Geografía, 1952.

Lliboutry Louis, Nieves y glaciares de Chile, Fundamentos de glaciología, Santiago, Ediciones de la Universidad de Chile, 1956.

Lliboutry Louis, Physique de base pour biologistes, médecins, géologues, Alençon, Masson y Cie, 1960.

Lliboutry Louis, Traité de glaciologie 1: glace, neige, hydrologie nivale, París, Masson, 1964.

Lliboutry Louis, Traité de glaciologie 2: glaciers, variations du climat, sols gelés, París, Masson, 1965.

Lliboutry Louis, Grandes glaciations et recul des glaciers, Alençon, Conférence donnée au Palais de la Découverte le 27 février 1965, imprimerie alençonnaise, 1965.

Lliboutry Louis, Régime thermique et déformation de la base des calottes polaires, S. L., 1965.

Lliboutry Louis, Tectonophysique et géodynamique. Une synthèse, géologie structurale, géophysique interne, París, Masson, 1982.

Lliboutry Louis, Very slow flows of solids, Dordrecht, M. Nijhoff, 1987.

Lliboutry Louis, Sciences géométriques et télédétection, París, Masson, 1992.

- Lliboutry Louis, *Géophysique et Géologie*, París, Masson, 1998.
- Lliboutry Louis, *Grandeur et décadence de la recherche pure*, Grenoble, editado por L. Lliboutry, 1999.
- Lliboutry Louis, *Les glaciers furent mes frères*, editado por L. Lliboutry, Grenoble, 1999.
- Lliboutry Louis, *Quantitative geophysics and geology*, Londres, Springer, 2000.

Cartografía

- Lliboutry Louis, *Andes de Chile central Norte Carta preliminar al 1:250.000 del Instituto Geográfico Militar de Chile*, Santiago de Chile, 1956.
- Lliboutry Louis, *Andes de Chile central Sur Carta preliminar al 1:250.000 del Instituto Geográfico Militar de Chile*, Santiago de Chile, 1956.
- Lliboutry Louis, *Hielo patagónico Sur*, Santiago de Chile, 1956. Lliboutry Louis, *Hielo patagónico Norte*, Santiago de Chile, 1956. Lliboutry Louis, *Tierra del fuego S.-O.*, Santiago de Chile, 1956.

Artículos

- Lliboutry Louis, «La région du Fitz Roy (Andes de Patagonie)», *Revue de géographie alpine*, vol. 41, n° 4, 1953a, p. 667-694. Lliboutry Louis, «More about Advancing and Retreating Glaciers in Patagonia», *Journal of Glaciology*, vol. 2, n° 13, 1953b, p. 168-172.
- Lliboutry Louis, «The origin of penitents», *Journal of Glaciology*, vol. 2, 1954, p. 331-338.
- Lliboutry Louis, «Le Massif du Nevado Juncal (Andes de Santiago): Ses pénitents et ses glaciers», *Revue de géographie alpine*, vol. 42, n° 3, 1954, p. 465-495.
- Lliboutry Louis, «Studies of the shrinkage after a sudden advance, blue bands and wave ogives on glacier Universidad», *Journal of Glaciology*, vol. 3, n° 24, 1958, p. 261-270.
- Lliboutry Louis, «Ondes cinématiques sur un glacier et glissement sur le lit», *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.*, vol. 247, n° 2, 1958b, p. 114-116.
- Lliboutry Louis, «Frottement sur le lit et mouvement par saccades d'un glacier», *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.*, vol. 247, n° 2, 1958b, p. 228-230.
- Lliboutry Louis, «Contribution à la théorie du frottement du glacier sur son lit», *C. R. Hebd. Séances Acad. Sci.*, vol. 247, n° 3, 1958c, p. 318-320.
- Lliboutry Louis, Vallon Michel y Vivet Roland «Étude de trois glaciers des Alpes françaises», publication n° 58 de l'AIHS (colloque d'Obergurgl), 1962, p. 145-159.
- Lliboutry Louis, «Idées actuelles concernant les grandes glaciations», *Bulletin de l'association française pour l'étude du quaternaire*, 3-4, p. 257-265.
- Lliboutry Louis, «Propriétés de l'atmosphère déduites du soulèvement post glaciaire et application possible aux ondes de surrection», *C. R. Ac. Sci.*, París, 260, 1965, p. 3121-3124.

- Lliboutry Louis, «Sea-floor spreading, continental drift and lithosphere sinking with an asthenosphere at melting point», *Journal of Geophysical Research*, vol. 74 (27), 1969, p. 6525-6540.
- Lliboutry Louis, «Glacier theory», *Advances in hydrosciences*, 7, 1971, p. 81-167.
- Lliboutry Louis, «Plate Movement Relative to Rigid Lower Mantle», *Nature*, vol. 250, n° 5464, 1974, p. 298-300.
- Lliboutry Louis, «Rheological properties of lithosphere», *Tectonophysics*, vol. 24 (1-2), 1974, p. 13-29.
- Lliboutry Louis, «Glaciological Problems set by the Control of Dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of a Covered Glacier Embedded within a Rock Glacier», *Journal of Glaciology*, vol. 18, n° 79, 1977, p. 255-273.
- Lliboutry Louis, Morales Benjamín, Pautre André y Schneider Bernard, «Glaciological Problems set by the Control of Dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Perú. I. Historical Failure of Morainic Dams, their Causes and Prevention», *Journal of Glaciology*, vol. 18, n° 79, 1977a, p. 239-254.
- Lliboutry Louis, Morales Benjamín y Schneider Bernard, «Glaciological Problems set by the Control of Dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Peru. III. Study of Moraines and Mass Balances of Safuna», *Journal of Glaciology*, vol. 18, n° 79, 1977b, p. 275-290.

Otros libros y artículos

- Abir-Am Pnina G., *La Mise en mémoire de la science*, París, Éditions des archives contemporaines, 1998.
- Ames Alcides y Francou Bernard, «Cordillera Blanca. Glaciares en la historia», *Bull. Inst. Fr. Études andines (Lima)*, vol. 24, no 1, 1995.
- Azéma Marc-Antoine, *La Conquête du Fitz Roy*, París, Flammarion, 1954.
- Collectif, «La Terre», París, Gallimard, coll. *Encyclopédie de la Pléiade*, 1959.
- Bruhat Georges, *Cours de physique générale-Électricité* (1ª edición. 1924), París, Masson, 8ª edición. (revisada por G. Goudet), 1963, 912 p.; *Thermodynamique* (1ª edición. 1926), París, Masson, 6ª edición. (revisada y aumentada por A. Kastler, Premio Nobel de física 1966), 1968, 912 p.; *Optique* (1ª edición. 1930), París, Masson, 6ª edición. (revisada y aumentada por A. Kastler), 1965, 1026 p., rééd. Dunod, 2004; *Mécanique* (1ª edición. 1934), París, Masson, 6ª edición. (d'après son cours donné à l'École normale supérieure de jeunes filles, revue par A. Foch.), 1967, 726 p.
- Cagnac Bernard, *Les Trois Physiciens*, París, Éditions Rue d'Ulm, Presses de l'École normale supérieure, 2009.
- Char René, *Placard pour un chemin des écoliers*, GLM, 1937.
- Coulomb Jean, *La Constitution physique de la Terre*, París, Albin Michel, 1952.
- Coulomb Jean, *Traité de géophysique interne*, vol. 1: 1973, vol. 2: 1976, París, Masson.

- Finó José Federico, Pequeño glosario andino, 1947.
- Fowler A. C. Weertman, «Lliboutry and the development of sliding theory», *Journal of Glaciology*, vol. 56, n° 200, 2010, p. 965-972.
- Franco Bernard y Vincent Christian, *Les glaciers à l'épreuve du climat*, París, IRD Éditions Belin, 2007.
- Gagliardini O., D. Cohen, P. Råback y T. Zwinger, Corrección a «Finite-element modeling of subglacial cavities and related friction law». *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, (F4), F04009, 2007a, (10.1029/2007JF000911).
- Iken A., «The effect of the subglacial water pressure on the sliding velocity of a glacier in an idealized numerical model», *Journal of Glaciology*, vol. 27, n° 97, 1981, p. 407-421.
- Israël Stéphane, *Les études et la guerre. Les normaliens dans la tourmente (1939-1945)*, París, Éditions rue d'Ulm, 2005.
- Jouzel Jean, Lorius Claude y Raynaud Dominique, *Planète blanche*, París, Odile Jacob, 2008.
- Kinzl Hans, «Los glaciares de la Cordillera Blanca», *Revista de Ciencias*, Lima, n° 432, 1940.
- Lorius Claude, *Mémoires sauvées des glaces*, París, Arthaud, Flammarion, 2016.
- Moreau Luc, Reynaud Louis, Six Delphine y Vincent Christian, *Dans les secrets de la Mer de Glace*, Chamonix, Edition Esope, 2015.
- Mougin Pierre, *Études glaciologiques*, vol. 7, París, Imprimerie nationale, 1934.
- Néel Louis, *Un siècle de physique*, París, Odile Jacob, 1991.
- Paul F. et al., 2005
- Péguy Charles-Pierre, «Le développement actuel des études glaciologiques dans le Monde», *Revue de géographie alpine*, vol. 50, n° 2, 1962, p. 213-227.
- Perez Marcel, Lionel Terray, *l'inoubliable conquérant*, Grenoble, Glénat, 2016.
- Pestre Dominique, *Physique et physiciens en France dans les années de l'entre-deux-Guerres 1918-1940*, París, Éditions des archives contemporaines, 1982.
- Pestre Dominique, Louis Néel et le Magnétisme à Grenoble. *Récit de la création d'un empire dans la province française 1940-1965*.
- Cahiers pour l'histoire du CNRS, 1990. Petit Jean-Robert, Vostok, París, Paulsen, 2013.
- Ramanathan Veerabhadran y Carmichael Gregory, «Global and regional climate changes due to black carbon», *Nature Geoscience*, vol. 1, n°4, 2008, p. 221-227.
- Reichert Friedrich, *Patagonia*, Buenos Aires 1917.
- Rémy Frédérique, *Histoire de la glaciologie*, París, Vuibert, ADAPTSNES, 2007.
- Rouzé Michel, *Les Nobel scientifiques français*, París, La Découverte, coll. «Histoire des sciences», 1988.
- Saint-Exupéry Antoine, *Terre des Hommes*, París, Gallimard, 1937.
- Schoof C. The effect of cavitation on glacier sliding, *Proceedings of the Royal Society, London, Ser. A*, 461(2055), 2005, p. 609- 627.
- Turrel Marc, *Carnets des Andes*, Frédéric et Dorly Marmillod, Genève, Slatkine, 2015.
- Vallon Michel, *Chronique des missions du Laboratoire de glaciologie*, 1970.
- Weertman J., «On the sliding of glaciers», *Journal of Glaciology*, vol. 3, n° 21, 1957b, p. 33-38.
- Yun et al., 2009
- Zryd Amédée, *Glaciers Passé-présent du Rhône au Mont-Blanc*, Genève, Slatkine, 2010.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS DE «EN LAS HUELLAS DE LLIBOUTRY»

Azócar, Guillermo

- Arenson, L., Hoelzle, M., & Springman, S. (2002). «Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland». *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(2), 117-135. doi:10.1002/ppp.414
- Azócar, G. (2013). *Modeling of permafrost distribution in the semiarid Chilean Andes*. Faculty of Environment, Geography Department. Waterloo, Canada: University of Waterloo.
- Azócar, G., & Brenning, A. (2010). Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1), 42-53.
- Azócar, G., Brenning, A., & Bodin, X. (2017). Permafrost Distribution Modeling in the Semi-Arid Chilean Andes. *The Cryosphere*, 11, 877-890. doi:10.5194/tc-2016-100.
- Barcaza, G., Nussbaumer, S., Tapia, G., Valdés, J., García, J.-L., Videla, Y.,... Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58, 166-180.
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Berlin, Germany: Springer.
- Berthling, I. (2011). Beyond confusion: rock glaciers as cryo-conditioned landforms. *Geomorphology*, 131, 98-106.
- Birkeland, P. W. (1973). *Use of relative age-dating methods*

- in a stratigraphic study of rock glacier deposits, Mt. Sopris, Colorado. *Arctic and Alpine Research*, 5(4), 401-416.
- Brenning, A. (2005a). Climatic and geomorphological controls of rock glacier in the Andes of central of Chile. Doctoral thesis, Humboldt-Universität, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Berlin, Germany.
- Brenning, A. (2005b). Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of central Chile (33-35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(3), 231-240. doi:10.1002/ppp.528
- Burger, K., Degenhardt, J., & Giardino, J. (1999). Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology*, 31, 93-132.
- Capps Jr, S. (1910). Rock glacier in Alaska. *The journal of Geology*, 18(4), 359-375. 7
- Clark, D., Eric, S., Noel, P., & Alan, G. (1998). Genetic variability of rock glaciers. *Geografiska Annaler*, 80(3-4), 175-182.
- Dirección General de Aguas [DGA]. (2009a). Inventario de glaciares descubiertos de las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (2009b). Estrategia nacional de glaciares. Estudio realizado por: Centro de Estudios Científicos. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (2010). Dinámica de glaciares rocosos. Realizado por: Unidad de Gestión de Proyectos del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección General de Aguas (2011). Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central. Realizado por Geostudios Ltda. Cuencas del Aconcagua, Maipo, Rapel y Maule. Santiago, Chile: Dirección General de Aguas.
- Falaschi, D., Tadono, T., & Masiokas, M. (2015). Rock glacier in the Patagonian Andes: An inventory for the Monte San Lorenzo (Cerro Cochrane) massif, 47° S. *Geografiska Annaler Series A Physical Geography*, 1-10.
- García, A., Ulloa, C., Amigo, G., Milana, J., & Medina, C. (2017). An inventory of cryospheric landforms in the arid diagonal of South America (high Central Andes, Atacama región, Chile). *Quaternary International*, 1-16.
- Gascoin, S., Kinnard, C., Ponce, R., Lhermitte, S., MacDonell, S., & Rabatel, A. (2011). Glacier contribution to streamflow in two headwaters of the Huasco River, Dry Andes of Chile. *The Cryosphere*, 5(4), 1099-1113.
- Giardino, J., Regmi, N., & Vitek, J. (2011). Rock Glaciers. In V. Singh, P. Singh, & U. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of snow, ice and glaciers* (pp. 943-948). Springer.
- Giardino, J., Vitek, J., & Demorett, J. (1992). A model of water movement in rock glaciers and associated water characteristics. In J. Dixon, & A. Abrahams (Eds.). Chichester: Wiley.
- Haerberli, W. (2000). Modern research perspectives relating to permafrost creep and rock glaciers: A discussion. *Permafrost and Periglacial Processes*, 11(4), 290-293.
- Haerberli, W., Brandova, D., Castelli, S., Egli, M., Frauenfelder, R., Käab, A., Dickau, R. (2003). Absolute and relative age dating of rock-glacier surfaces in alpine permafrost: concept, first results and possible applications. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, (pp. 343-348). Nice, France.
- Haerberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Käab, A., Vonder Mühll, D. (2006). Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(3), 189-214. doi:10.1002/ppp.561
- Hoelzle, M., Wagner, S., Käab, A., & Vonder Mühll, D. (1998). Surface movement and internal deformation of ice-rock mixtures within rock glaciers at Pontresina-Shaferberg upper engadin, Switzerland. Seventh International Conference on Permafrost (pp. 465-471). Yellowknife: University of Ottawa.
- Johnson, P. (1984). Rock glacier formation by high-magnitude low-frequency slope processes in the Southwest Yukon. *Annals of the association of American Geographers*, 74(3), 408-419.
- Kammer, K. (1998). Rock glaciers, Western Andes, Chile. Boulder, Colorado, USA. Retrieved from <http://nsidc.org/data/ggd282.html>
- Kuchment, L., Gelfan, A., & Demidov, V. (2000). A distributed model of runoff generation in the permafrost regions. *Journal of hydrology* (240), 1-22.
- Lliboutry, L. (1953). Internal moraines and rock glaciers. *Journal of Glaciology*, 2(14), 296.
- Mahaney, W., Miyamoto, H., Dohm, J., Baker, V., Cabrol, N., Grin, E., & Berman, D. (2007). Rock glaciers on Mars: Earth-based clues to Mars' recent paleoclimatic history. *Planetary and Space Science*, 55, 181-192.
- Milana, J. P., & Güell, A. (2008). Diferencias mecánicas e hídricas del permafrost en glaciares de rocas glaciogénicas y criogénicas, obtenidas de datos sísmicos en el Tapado, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(3), 310-325.
- Monnier, S., & Kinnard, C. (2017). Pluri-decadal (1955-2014) evolution of glacier-rock glacier transitional landforms in the central Andes of Chile (30-33°S). *Earth Surface Dynamics*, 493-509.
- Nicholson, L., Marín, J., López, D., Rabatel, A., Bown, F., & Rivera, A. (2009). Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*, 50(53), 111-118.
- Potter, N. J. (1972). Ice-cored rock glacier, Galena creek Northern Absaroka mountains, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 83(10), 3025-3028.
- Roer, I., Käab, A., & Dikau, R. (2005). Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 73-87.

- Schrott, L. (1998). The hydrological significance of high mountain permafrost and its relation to solar radiation: A case of study in high Andes of San Juan, Argentina. *Bamberger Geographische Schriften*(17), 71-84.
- Wahrhaftig, C., & Cox, A. (1959). Rock glacier in the Alaska range. *Geological society of America Bulletin*, 70(4), 383-436.
- Woo, M. (2012). *Permafrost Hydrology*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008.
- Bodin, Xavier y Brenning, Alexander**
- Azócar, G.F., Brenning, A., Bodin, X., 2017. Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. *The Cryosphere* 11, 877-890.
- Barsch, D., Hell, G., 1975. Photogrammetrisch Bewegungsmessungen am Blockgletscher Murtel I, Oberengadin, Schweizer Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 11, 11-42.
- Bodin, X., Echelard, T., Lacroix, P., Strozzi, T., 2018. Regional evaluation of rock glacier activity in the semi-arid Andes using optical and radar satellite imagery, in: 5th European Conference on Permafrost, Book of Abstract. Presented at the EUCOP5, Laboratoire EDYTEM, Chamonix, France, pp. 386-387.
- Bodin, X., Krysiecki, J. M., Iribarren Anacona, P., 2012. Recent collapse of rock glaciers: two study cases in the Alps and in the Andes, in: *Proceedings of the 12th Congress INTERPRAEVENT*. Grenoble, pp. 2-3.
- Bodin, X., Krysiecki, J. M., Schoeneich, P., Le Roux, O., Lorient, L., Echelard, T., Peyron, M., Walpersdorf, A., 2016. The 2006 collapse of the Bérard Rock Glacier (Southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 28, 209-223. <https://doi.org/10.1002/ppp.1887>
- Brenning, A., 2016. Glaciares en Chile semiárido: cambio climático, minería y seguridad hídrica. *Chile sustentable*.
- Brenning, A., 2008. The impact of mining on rock glaciers and glaciers. *Darkening peaks: glacier retreat, science, and society* 196.
- Brenning, A., Azócar, G.F., 2010. Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande* 143-158.
- Capus, C., 2016. Cartographie des impacts des activités minières de grande ampleur dans les Andes Centrales (Chili et Argentine) (Internship report). Université Nice Sophia-Antipolis.
- Corte, A., Espizua, L., 1981. Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza. IANIGLA-CONICET, Mendoza, Argentina.
- IANIGLA, 2010. Fundamentos y cronograma de ejecución. IANIGLA-CONICET, Mendoza, Argentina.
- Kääb, A., Frauenfelder, R., Roer, I., 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change* 56, 172-187. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.005>
- Kellerer-Pirklbauer, A., Delaloye, R., Lambiel, C., Gärtner-Roer, I., Kaufmann, V., Scapozza, C., Krainer, K., Staub, B., Thibert, E., Bodin, X., Fischer, A., Hartl, L., 2018. Interannual variability of rock glacier flow velocities in the European Alps, in: 5th European Conference on Permafrost, Book of Abstract. Presented at the EUCOP5, Laboratoire EDYTEM, Chamonix, France, pp. 396-397.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., 2012. About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105, 94-112.
- Lliboutry, L., 1961. Phénomènes cryoniveaux dans les Andes de Santiago (Chili). *Biuletyn Peryglacjalny* 209-224.
- Lliboutry, L., 1954. Le massif du Nevado Juncal (Andes de Santiago). Ses pénitents et ses glaciers. *Revue de géographie alpine* 42, 465-495. <https://doi.org/10.3406/rga.1954.1142>
- Lliboutry, L., 1953. Internal moraines and rock glaciers. *Journal of Glaciology* 14, 296.
- Marangunic, C., 1979. Inventario de glaciares. Hoya del río Maipo. Dirección General de Aguas, Santiago.
- Scotti, R., Crosta, G.B., Villa, A., 2017. Destabilisation of Creeping Permafrost: The Plator Rock Glacier Case Study (Central Italian Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 28, 224-236. <https://doi.org/10.1002/ppp.1917>
- Tailland, J.D., 2015. *Glaciers - The Politics of Ice*. Oxford University Press, New York.
- Villarroel, C., Tamburini Beliveau, G., Forte, A., Monserrat, O., Morvillo, M., Villarroel, C.D., Tamburini Beliveau, G., Forte, A.P., Monserrat, O., Morvillo, M., 2018. DInSAR for a Regional Inventory of Active Rock Glaciers in the Dry Andes Mountains of Argentina and Chile with Sentinel-1 Data. *Remote Sensing* 10, 1588. <https://doi.org/10.3390/rs10101588>
- Apaloo, J. B., X. Bodin & A. Brenning (2012). Interactions between seasonal snow, ground surface temperature and topography (Andes of Santiago, Chile, 33.5°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 23, 277-291.
- Arenson, L., M. Hoelzle & S. Springman (2002). Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13, 117-135.
- Berthling, I (2011) Beyond confusion: rock glaciers as cryo-conditioned landforms. *Geomorphology*, 131(3-4), 98-106.
- Bodin, X., E. Thibert, D. Fabre, A. Ribolini, P. Schoeneich, B. Francou, L. Reynaud & M. Fort (2009). Two decades of responses (1986-2006) to climate by the Laurichard rock glacier, French Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20, 331-344.
- Bodin, X., G.F. Azócar & A. Brenning (2010a). Recent (2004-2010) variations of surface displacements in an Andean permafrost-glacier environment (Chile, 33° S.). Abstracts, Third European Conference on Permafrost, 13-17 June 2010, Svalbard, Norway; p. 46.

- Bodin, X., F. Rojas & A. Brenning (2010b). Status and evolution of the cryosphere in the Andes of Santiago (Chile, 33.5 S.). *Geomorphology*, 118, 453-464.
- Boeckli, L., A. Brenning, S. Gruber & J. Noetzi (2012). A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges. *The Cryosphere*, 6, 125-140.
- Brenning, A. (2005). Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16, 231-240.
- Brenning, A. & G.F. Azócar (2010). Statistical analysis of topographic and climatic controls and multispectral signatures of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21, 54-66.
- Brenning, A., S. Long & P. Fieguth (2012a). Detecting rock glacier flow structures using Gabor filters and IKONOS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 125, 227-237.
- Brenning, A., M. A. Peña, S. Long, & A. Soliman (2012b). Thermal remote sensing of ice-debris landforms using ASTER: an example from the Chilean Andes. *The Cryosphere*, 6, 367-382.
- Contreras, A. & J. L. Illanes (1992). Depósito de lastre glaciar Infiernillo Sur Mina Los Bronces. En: 43a Convención del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, La Serena, octubre 1992.
- Crespo, S. A., Aranibar, J. N., Fernandoy, F., and Cara, L.: Mountain water cellars: a chemical characterization and quantification of the hydrological processes and contributions from snow, glaciers and groundwater to the Upper Mendoza River basin (~ 32° S), Argentina, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2018-212>, 2018.
- DGA-UGN (2010). Dinámica de glaciares rocosos en Chile semiárido. Informe técnico S.I.T. No. 234, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad Glaciología y Nieves. Autores: G. F. Azócar, A. Brenning, X. Bodin; 196 pág.
- Goetz, J., M. Marcer, X. Bodin & A. Brenning (2018). Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *Remote Sensing of Environment*, 210, 208-216.
- Harrington, J. S., A. Mozil, M. Hayashi & L. R. Bentley (2018). Groundwater flow and storage processes in an inactive rock glacier. *Hydrological Processes*, 32, 3070-3088.
- Hauck, C. (2013). New Concepts in Geophysical Surveying and Data Interpretation for Permafrost Terrain. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(2), 131-137.
- Lliboutry, L. (1955). Origine et évolution des glaciers rocheux. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, Paris*, 240, 1913-1915.
- Lliboutry, L. (1956). Nieves y glaciares de Chile: fundamentos de glaciología. Editorial Universitaria, Santiago.
- Lliboutry, L. (1957). Studia kripopedologiczne w Andach srodkowe-chilijskich. *Biuletyn Peryglacjalny*, 5, 5-10.
- Lliboutry, L. (1986). Rock glaciers in the dry Andes. En: *Proceedings of the International Symposium «Glacier mass balance, fluctuations and runoff»*, Alma-Ata, Sept. 30-October 5, 1985, pages 18-24, 139-144.
- Marangunic, C. (1976). El glaciar de roca Pedregoso, río Colorado, V Región. *Actas del Primer Congreso Geológico Chileno*. Santiago, Chile, Tomo I, D71-D80.
- Marcer, M., C. Serrano, A. Brenning, X. Bodin, J. Goetz & P. Schoeneich (2018). Inferring the destabilization susceptibility of mountain permafrost in the French Alps using an inventory of destabilized rock glaciers. *The Cryosphere Discussions*, <https://doi.org/10.5194/tc-2018-97>, in review.
- Milana, J.P. & A. Güell (2008) Diferencias mecánicas e hídricas del permafrost en glaciares de rocas glaciogénicas y criogénicas, obtenidas de datos sísmicos en El Tapado, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(3), 310-325.
- Monnier, S. & C. Kinnard (2015). Internal structure and composition of a rock glacier in the dry Andes, inferred from ground penetrating radar data and its artefacts. *Permafrost and Periglacial Processes*, 26(4), 335-346.
- Monnier, S. & C. Kinnard (2016). Interrogating the time and processes of development of the Las Liebres rock glacier, central Chilean Andes, using a numerical flow model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 1884-1893.
- Monnier, S. & C. Kinnard (2017). Internal structure and composition of a rock glacier in the Andes (upper Choapa valley, Chile) using borehole information and ground-penetrating radar. *Annals of Glaciology*, 54(64), 61-72.
- Wahrhaftig, C. & A. Cox (1959). Rock glaciers in the Alaska Range. *Bulletin of the Geological Society of America*, 70(4): 383-436.
- Williams, M. W., M. Knauf, N. Caine, F. Liu & P. L. Verplanck (2006). Geochemistry and source waters of rock glacier outflow, Colorado Front Range. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(1), 13-33.

Casassa, Gino

- Braun, M.H., P. Malz, C. Sommer, D. Farías Barahona, T. Sauter, G. Casassa, A. Soruco, P. Skvarca, T.C. Seehaus. 2018. Constraining glacier elevation and mass changes in South America between 2000 and 2011-15. *Nature Climate Change*, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>.
- Buscaini, G. y S. Metzeltin. 2001. Patagonia, terra magica per viaggiatori e alpinisti. Ed. Exploits/Corbaccio, 287 p.
- Casassa, G., J. Rodríguez, T. Loriaux. 2014. A new glacier inventory for the Southern Patagonia Icefield and Areal Changes 1986-2000. In *Global Land Ice Measurements from Space*, edited by J. S. Kargel, G. J. Leonard, M. P. Bishop, A. Kääb and B. H. Raup, pp. 639-660, Springer, Berlin, Germany.
- Hulton, N.R.J., R.S. Purves, R.D. McCulloch, D.E. Sugden, and M.J. Bentley. 2002. The Last Glacial Maximum and deglaciation in southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 21, 233-241.

- Lliboutry, L. 1956. Nieves y glaciares de Chile, fundamentos de glaciología (Snow and glaciers of Chile, fundamentals of glaciology). Universidad de Chile Ediciones, Santiago, Chile.
- Lliboutry, L. 1998. Glaciers of Chile and Argentina. In *Glaciers of South America*, Williams, R.S., Jr. and J.G. Ferrigno, Eds., *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*. USGS Professional Paper, 1386-I.
- Meier, W.J.-H., J. Griesinger, P. Hochreuther and M.H. Braun. 2018. An updated multi-temporal glacier inventory for the Patagonian Andes with changes between the Little Ice Age and 2016. *Front. Earth Sci.* 6:62. doi: 10.3389/feart.2018.00062.
- Pallin, H.N. 1933. Mountains and glaciers in West Patagonia. *Alpine Journal*, 45, 62-79.
- Rignot, E., A. Rivera, G. Casassa. 2003. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science*, 302(5644), 434-437, doi: 10.1126/science.1087393.
- Vimeux, F., M. de Angelis, P. Ginot, O. Magand, G. Casassa, B. Pouyaud, S. Falourd, and S. Johnsen. 2008. A promising location in Patagonia for paleoclimate and paleoenvironmental reconstructions revealed by a shallow firn core from Monte San Valentín (Northern Patagonia Icefield, Chile). *J. Geophys. Res.*, 113, D16118, doi:10.1029/2007JD009502.-
- Cereceda, Francisco**
- Bond, T. C.; Doherty, S. J.; Fahey, D. W.; Forster, P.; Berntsen M., De Angelo, T. B. J.; Flanner, M. G., Ghan, S.; Karcher, B.; Koch, D., Kinne, S.; Kondo, Y.; Quinn, P. K.; Sarofim, M. C.; Schultz, M. G.; Schulz, M.; Venkataraman, C.; Zhang, H.; Zhang, S.; Bellouin, N.; Guttikunda, S. K.; Hopke, P. K.; Jacobson, M. Z.; Kaiser, J. W.; Klimont, Z.; Lohmann, U.; Schwarz, J. P.; Shindell, D.; Storelvmo, T.; Warren, S. G. and Zender, C. S. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res.*, 118, 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171.
- Cereceda-Balic, F.; Palomo-Marín, M.; Bernalte, E.; Vidal, V.; Christie, J.; Fadic, X.; Guevara, J.; Miro, C.; Pinilla, E. 2012. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmospheric Environment*, 47, 51-57.
- Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis. Chapter 5. Aerosols, their Direct and Indirect Effects (IPCC).
- Hansen, J. and Nazarenko, L. 2004: Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 423-428, doi:10.1073/pnas.2237157100.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Beijing, 2001.
- Kaspari, D., Schwikowski, M. Gysel, G. Flanner, S. Kang, S. and Mayewski P. 2011. Recent increase in black carbon concentrations from a Mt. Everest ice core spanning 1860–2000 AD. *Geophysical Research Letters* 2011, 38, (L04703) doi:10.1029/2010GL046096.
- Longo, K. M.; Freitas, S. R.; Andreae, M. O.; Setzer, A.; Prins, E. and Artaxo P. 2010. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5785–5795.
- Mena-Carrasco, M.; Saide, P.; Delgado, R.; Hernández, P.; Spak, S.; Molina, L.; Carmichael, G. and Jiang X. 2014. Regional climate feedbacks in Central Chile and their effect on air quality episodes and meteorology, *Urban Clim.*, 10, 771-781, doi:10.1016/j.uclim.2014.06.006.
- Molina, L.; Gallardo, L.; Andrade, M.; Baumgardner, D.; Borbor-Córdova, M.; Bórquez, R.; Casassa, G.; Cereceda-Balic, F.; Dawidowski, L.; Garreaud, R.; Huneeus, N.; Lambert, F.; McCarty, J.L.; McPhee, J.; Mena-Carrasco, M.; Raga, G.B.; Schmitt, C. and J.P. Schwartz. 2015. Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere. *Earth's Future*, 3: 345-369.
- Ramanathan, V. and Carmichael, G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon, *Nat. Geosci.*, 1, 221-227, doi:10.1038/ngeo156.
- Schwikowski, M. Brutsch, S.; Gaggeler H.W. and Schotterer U. 1999. A high-resolution air chemistry record from an Alpine ice core: Fiescherhorn glacier, Swiss Alps *J. Geophys. Res.*, 104(D11), 13709-13719, doi:10.1029/1998JD100112.
- Schwikowski, M. and Eichler A. U. *Alpine Glaciers as Archives of Atmospheric Deposition*. In: Bundi Ed. U. *Alpine Waters*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag; 2010 PAG 141-150.
- Seinfeld, J. and Pandis, S. 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Second edition, 1232 pages. Jhon Wiley & Sons, Inc.USA.
- United State Environmental Protection Agency (EPA). 2012. Report to Congress on Black Carbon. Department of the Interior, Environment and Related Agencies Appropriations Act, 2010.
- Vallero, D. 2008. *Fundamentals of Air Pollution*. Fourth edition, 967 pages. Academic Press is an imprint Elsevier, London, UK.
- Francou, Bernard**
- (1) Sublimación, ver glosario.
 - (2) Francou, B. 2004, *Bull. Inst. Fr. ET AND*, Lima, 137-152.
 - (3) Lliboutry, L., 1977. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. 2. Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier. *J. Glaciology*, 18, 79.
 - (4) Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A. & Schneider, B., 1977a. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. 1. Historical

- failure of morainic dams, their causes and prevention. *J. Glaciology*, 18, 79.
- (5) Lliboutry, L., Morales Arnao, B., & Schneider, B., 1977b. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Perú. 3. Study of moraines and mass balances of Safuna. *J. Glaciology*, 18, 79.
- (6) Ames, A. & Francou, B. 1995, *Bull. Inst. Et. And.*, Lima, 37-64.
- (7) Institut de Recherche pour le Développement (Francia)
- (8) Estos métodos tratan de datar una gran cantidad de bloques ubicados sobre las morrenas. Unos utilizan una curva calibrada de crecimiento de una especie de líquen, otras recurren al decrecimiento de la radiactividad de isótopos cosmogénicos como el Berilio 10 (10Be), el Carbono 14 (14C), o el Cloro 36 (36Cl). Los resultados pueden ser cruzados con métodos históricos utilizando archivos documentales (escritos, pinturas, grabados, mapas, etc.).
- (9) Balance de masa, ver glosario.
- (10) Jomelli et al., 2009, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281, 3-4, 269-282.
- (11) Ramírez et al., 2001, *Journal of Glaciology* 47 (157), 187-194; Jordan et al., 2005, *Hydrological Sciences Journal* 50 (6), 949-961; Francou et al., 2007, *Proc. First International Conference on the Impact of Climate Change on High-Mountain System*, Bogota, 87-97; Soruco et al., 2008, *Geophysical Research Letters*, 36, L03502, doi:10.1029/2008GL036238
- (12) Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, J., Cáceres, B., Ceballos, J.L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galárraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménégos, M., Ramírez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M. & Wagnon, P., 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, 81-102, 2013, www.the-cryosphere.net/7/81/2013/doi/10.5194/tc7-81-2013.
- (13) Francou et al., 2003, *Journal of Geophysical Research*, 108, D5, 4154, doi: 10.1029/2002JD002959; Francou et al., 2004, *Journal of Geophysical Research*, 109, doi: 10.1029/2003JD004484.
- (14) Francou, B., Vuille, M., Favier, V. & Cáceres, B., 2004. New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'. *Journal of Geophysical Research*, 109, doi: 10.1029/2003JD004484.
- (15) Wagnon et al., 1999, *Journal of Geophysical Research*, 104, D4, 3907-3923; Favier et al., 2004, *Journal of Geophysical Research*, 109, D18105, doi:10.1029/2003JD004359 ; Sicart et al., 2005, *Journal of Geophysical Research* 110, D12106. doi:10.1029/2004JD0057329
- (16) Vuille et al., 2008, *Earth Science Reviews*, 89, 79-96.
- (17) Lejeune, 2009. PhD, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- (18) Mark et al., 2005. *Hydrological Science Journal* 50 (6), 975-987.
- (19) Soruco, 2008. PhD, Université Joseph Fourier, Grenoble
- (20) Francou & Vincent, 2007; *Les glaciers à l'épreuve du climat*, IRD Editions, 274p.
- (21) Francou, B., & Vincent, C., 2015. *Quoi de neuf sur la planète blanche? Comprendre le déclin des glaces et ses conséquences*. Glénat, Grenoble: 143 pp.

Larraín, Sara

Agenda Ambiental (2005)-Agenda Ambiental de ONG Ecologistas y Ambientalistas: prioridades ambientales para el período 2006-2010, octubre 2005.

Apablaza, R., Farías, E., Morales, R., Díaz, J. y Karzulovic, A. (2001) The Sur Sur mine of Codelco's Andina division. En: Hustrulid, W.A., McCarter, M.K. y Van Zyl, D.J.A., *Slope stability in surface mining*. Colorado: Society for Mining Metallurgy and Exploration.

AngloAmerican, (2013) *AngloAmerican-Cobre, Legislación de Protección y Valoración de Glaciares*, ppt presentación ante Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales, Senado, 13 de agosto 2013.

Apoyo de Ecologistas a Bachelet (2005)-10 Compromisos para la Sustentabilidad Ambiental del Desarrollo Nacional, lunes 21 de noviembre 2005.

Azócar, G.F. y Brenning, A. (2008) *Intervenciones en glaciares rocosos en Minera Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile*. Waterloo: University of Waterloo, informe técnico.

Barcaza, Gonzalo (2009). *Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas*, presentación ante la Comisión de Medio Ambiente del Senado, 24 de septiembre 2009.

Berland, Alexander (2016) *Glaciares Chilenos: reservas de agua estratégicas amenazadas*. (Un resumen de recientes resultados del IPCC, PNUMA y otras investigaciones), Chile Sustentable, marzo 2016

Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R. y Urquidí, J.C. (2006) *Glaciares chilenos: reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. Santiago: LOM Ediciones.

Boletín N° 11.876-12 (2018) -Girardi, G.- *Moción parlamentaria Ley sobre Protección de Glaciares*, Senado, 4 de julio 2018.

Boletín 11.597-12-(2018) -Melo, D.- *Moción parlamentaria que modifica el Código de Aguas para impedir la constitución de derechos de agua sobre glaciares*.

Boletín N° 9364-12 (2014) -Melo, D.- *Moción parlamentaria Ley de Protección y Preservación de Glaciares, Ambientes Glaciares y Peri Glaciares*

Boletín 4205-12 (2006). Horvath, A. -*Moción Proyecto de Ley sobre Valoración y Protección de Glaciares*.

- Boletín N° 3947-12,(2005) Sánchez, L. Moción Establece la prohibición de ejecutar proyectos de inversión en glaciares.
- Brenning, A. (2008) The impact of mining on rock glaciers and glaciers: examples from Central Chile. En: Orlove, B.S.; Wiegandt, E. y Luckman, B. (eds.) Darkening peaks: glacier retreat, science, and society. Berkeley: University of California Press, pp.196-205.
- Brenning, A. y Azócar, G.F. (2010) Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, 47, pp.143-158.
- Centro de Estudios Científicos y Universidad de Chile. S.A. Conceptos glaciológicos básicos (Chile). Laboratorio de glaciología. Disponible en: <http://www.glaciologia.cl/chile.htm>
- Chile Sustentable, (2018) Minuta Análisis del retiro del Proyecto de Ley de Protección de Glaciares (Boletín 9364-12) por parte del gobierno de Piñera y propuestas de acción. 22 de junio 2018.
- Chile Sustentable (2015a). Minuta Glaciares y Parques Nacionales. Proyecto de Ley de Preservación y Conservación de Glaciares. (Boletín 9364-12), 2 de octubre 2015.
- Chile Sustentable (2015) Observaciones a la indicación sustitutiva del Ejecutivo a la moción parlamentaria al Proyecto de Ley de Protección y Preservación de Glaciares (boletín 9364-12), presentación ante la Comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Cámara de Diputados, 22 de abril 2015.
- Chile Sustentable (2014). Ley de Protección y Preservación de Glaciares, Ambientes Glaciares y Peri Glaciares (Boletín 9364-12), presentación ante la Comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Cámara de Diputados, 30 de junio 2014.
- Chile Sustentable (2013) Glaciares y minería: continúa la destrucción de los glaciares. Informe disponible en <http://www.chilesustentable.net/glaciares-y-mineria/>.
- Chile Sustentable (2006a). «Naturaleza y valor de los Glaciares» para Grupo de Trabajo para la Conservación de Glaciares, mayo 2006.
- Chile Sustentable (2006b). «Glaciares Chilenos, Reservas Estratégicas de Agua Dulce» para Grupo de Trabajo para la Conservación de Glaciares, 15 de mayo 2006.
- Chile Sustentable (2006c). Rodrigo Polanco, «Informe Técnico Proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares» Grupo de Trabajo para la Conservación de Glaciares; 12 de septiembre, 2006.
- CODELCO-GAC (2013) Capítulo 4: evaluación de impactos ambientales (Rev.1). Evaluaciones de Impacto Ambiental de 'Proyecto Expansión Andina 244', por la Corporación Nacional del Cobre de Chile y Gestión Ambiental Consultores. Disponible en: <http://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=35/00/63be0dd-739b2f94 e69e6caaa9c3164412899>.
- Codelco, (2013) «Proyecto de Ley sobre Valoración y Protección de Glaciares, Boletín N°4205-12» ppt. presentación de Francisca Domínguez, directora de Asuntos Regulatorios, Vicepresidencia de Asuntos Corporativos y Sustentabilidad, ante la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales del Senado, agosto 2013.
- Comisión de Medio Ambiente, (2018) Cámara de Diputados, «Informe de la Comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales recaído en el proyecto de ley que Modifica el Código de Aguas para impedir la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas sobre glaciares». Boletín N° 11.597-12, junio 2018.
- Comité Nacional Asesor sobre Cambio Global (2006). Estrategia Nacional de Cambio Climático. Santiago, Chile. 8 p.
- Contreras, A., y Illanes, J.L. (1992). Depósito de lastre glaciar Infernillo Sur Mina Los Bronces, en 43a Convención del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, La Serena, octubre 1992. Santiago: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
- Consejo Minero, Sonami (2007). Carta del Consejo Minero y la Sonami al senador Antonio Horvath, con copia a la Ministra de Medio Ambiente, Ana Lya Uriarte. 23 de mayo de 2007.
- DGA (2009) Dirección General de Aguas- Presentación de la Unidad de Glaciología y Nieves, Ministerio de Obras Públicas, 24 de septiembre 2009.
- DGA (2013) Dirección General de Aguas, Opinión sobre Proyecto de Ley Sobre Valoración y Protección de Glaciares, ppt presentación ante la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales del Senado, 9 de junio de 2013.
- DGA (2018) Dirección General de Aguas, «Cambio Climático y Protección de Glaciares», presentación de Gino Cassaza, director de la Unidad de Glaciología y Nieves, ante Comisiones Unidas de Medio Ambiente y Bienes Nacionales y de Desafíos del Futuro, Ciencia Tecnología e Innovación del Senado, Santiago, septiembre de 2018.
- Grupo de Trabajo para la Conservación de Glaciares (2006) SNA, Chile Sustentable, IGM, DMAE, «Minuta Contenido Ley Protección de Glaciares» 27 de junio 2006.
- Grupo de Trabajo para la Conservación de Glaciares (2006a). Propuestas de Definición de Glaciares Informe Técnico Proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares, Chile Sustentable 12, septiembre 2006.
- Grupo de Trabajo para la Conservación de Glaciares (2006b) SNA, Chile Sustentable, IGM, Propuesta de Proyecto de Ley de Protección de Glaciares, septiembre 2006.
- Universidad de Chile-CECS (2002), Inventario de Glaciares de Chile, Chilean glacier inventory, 2002 , en <http://www.glaciologia.cl>
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)] Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to

- the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, y L.L.White (eds.)] Cambridge: Cambridge University Press.
- Lliboutry, L. (1956). Nieves y glaciares: fundamentos de glaciología. Ediciones Universidad de Chile, Santiago.
- Marangunic, C. (1979^a). Inventario de glaciares hoya del río Maipo. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- MMA-(2013) Ministerio de Medio Ambiente Proyecto de ley sobre valoración y protección de glaciares , ppt presentación de la Ministra Benítez ante la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales del Senado, 16 de mayo 2013.
- Ministerio de Relaciones Exteriores. 2001. Tratado de Integración y Complementación Minera entre las Repúblicas de Chile y Argentina. Disponible en la página del Ministerio de Minería: <http://www.minmineria.cl/img/Tratadominero.pdf>
- La Segunda (2011). Alcalde de Lo Barnechea y diputado Monckeberg denuncian excavaciones de Anglo American bajo el glaciar La Paloma. Reportaje Sebastián Zúñiga, 22 diciembre 2011.
- Rivera, Andrés (2002). Inventario de Glaciares de Chile 2002, en www.glaciologia.cl
- Segovia, Alexis (2015). Glaciares en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), Investigaciones Geográficas Chile, 49: pp. 51-68.
- Sociedad Nacional de Agricultura, (2006). Rol de los Glaciares para la Agricultura de Riego. Carvallo, Javier; Comisión de Riego, SNA, junio 2006.
- Sociedad Nacional de Agricultura (2006a). «Modelos Legales de Protección a los Glaciares a Nivel Internacional» Urquidí, J. Carlos; Comisión de Medio Ambiente, SNA.
- Sonami, (2013). Sociedad Nacional de Minería, «Proyecto de Ley sobre Valoración y Protección de Glaciares, Boletín N° 4205-12», ppt presentación de Alberto Salas, presidente Sociedad Nacional de Minería ante la Comisión de Medio Ambiente y Bienes Nacionales del Senado, Valparaíso, 13 de agosto 2013.
- Valenzuela, L. (2004). Stability issues in natural and man-made slopes in mining. En: Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fontoura, S.A.B. y Sayao, A.S.F. Landslides: evaluation and stabilization. Leiden: Balkema, pp. 467-473.
- McPhee, James**
- Ayala, A., F. Pellicciotti, S. MacDonell, J. McPhee, S. Vivero, C. Campos, and P. Egli. «Modelling the Hydrological Response of Debris-Free and Debris-Covered Glaciers to Present Climatic Conditions in the Semiarid Andes of Central Chile.» *Hydrological Processes*, January 1, 2016, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/hyp.10971>.
- Baraer, Michel, Bryan Mark, Jeffrey McKenzie, Thomas Condom, Jeffrey Bury, Kyung-In Huh, Cesar Portocarre-ro, Jesús Gómez, and Sarah Rathay. «Glacier Recession and Water Resources in Peru's Cordillera Blanca». *Journal of Glaciology* 58, no. 207 (February 2012): 134-50. <https://doi.org/10.3189/2012JG11J186>.
- «Geosystems: An Introduction to Physical Geography.» Accessed October 15, 2018. <https://www.pearson.com/us/higher-education/product/Christopherson-Geosystems-An-Introduction-to-Physical-Geography-8th-Edition/9780321706225.html>.
- Jansson, Peter, Regine Hock, and Thomas Schneider. «The Concept of Glacier Storage: A Review.» *Journal of Hydrology* 282, no. 1-4 (November 2003): 116-29. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00258-0).
- Masiokas, Mariano H., Duncan A. Christie, Carlos Le Quesne, Pierre Pitte, Lucas Ruiz, Ricardo Villalba, Brian H. Luckman, et al. «Reconstructing the Annual Mass Balance of the Echaurren Norte Glacier (Central Andes, 33.5° S) Using Local and Regional Hydroclimatic Data.» *The Cryosphere* 10, no. 2 (2016): 927-940.
- Ohlanders, N., M. Rodríguez, and J. McPhee. «Stable Water Isotope Variation in a Central Andean Watershed Dominated by Glacier and Snowmelt,» 2013. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/1035/2013/hess-17-1035-2013.pdf>.
- Rivera, Andrés / Los glaciares de Chile central**
- Barrera, H. (1937). Noticia geográfica sobre Cordillera Morada y el ventisquero Olivares. *Revista Chilena de Historia y Geografía* 91, 227-244.
- Espizúa, L., & P. Pitte (2009). The Little Ice Age glacier advance in the Central Andes (35°S), Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 345-350.
- Falvey, M., & R. Garreaud (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research*, 114(D4), 1-16.
- Fickenscher, F. (1930). Der «Gran Salto de Olivares». *Andina* 8(2), 41-45.
- Garreaud, R. y otros (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, doi.org/10.5194/hess-2017-191.
- Lliboutry, L. (1954). Le massif du Nevado Juncal (Andes de Santiago). Ses pénitents et ses glaciers. *Revue de géographie alpine*. 42(3), 465-495.
- Lliboutry, L. (1956). Nieves y glaciares de Chile: fundamentos de glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile, 471 pp.
- Piderit, J. S. (1943). El ventisquero Olivares. Su situación y características. *Revista Andina* 6(33), 24-29.

Rivera, A., F. Bown, F. Napoleoni, C., Muñoz & M. Vuille (2016). Balance de Masa Glaciar. (Ediciones CECs), Valdivia, Chile, 203 pp.

Rivera, Andrés / Campo de Hielo Sur

Aniya, M., H. Sato, R. Naruse, P., Skvarca & G. Casassa (1996). The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, 1361-1369.

De Angelis, H. (2014). Hypsometry and sensitivity of the mass balance to changes in equilibrium-line altitude: the case of the Southern Patagonia Icefield. *Journal of Glaciology*, 60(219), 14-28.

Foresta, L., N. Gourmelen, F. Weissgerber, P. Nienow, J.J. Williams, A. Shepherd, M.R. Drinkwater & S. Plummer (2018). Heterogeneous and rapid ice loss over the Patagonian Ice Fields revealed by CryoSat-2 swath radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 211, 441-455.

Gourlet, P., E. Rignot, A. Rivera & G. Casassa (2016). Ice thickness of the northern half of the Patagonia Icefields of South America from high-resolution airborne gravity surveys. *Geophysical Research Letters*, 43, doi:10.1002/2015GL066728.

Lenzano, M. G., E. Lannutti, C. Toth, L. Lenzano, A. Lo Vecchio, D. Falaschi & A. Vicha (2018). Analyzing the oscillations of the Perito Moreno Glacier, using time-lapse image sequences. *Cold Regions Science Technology*, 146, 155-166.

Malz, Ph., W. Meier, G. Casassa, R. Jaña, P. Skvarca & M. H. Braun (2018). Elevation and Mass Changes of the Southern Patagonia Icefield Derived from TanDEM-X and SRTM Data. *Remote Sensing of the Environment*, 10, 188, doi:10.3390/rs10020188.

Lliboutry, L. (1956). Nieves y glaciares de Chile: fundamentos de glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile, 471 pp.

Mouginot, J. & E. Rignot (2015). Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984-2014. *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2014GL062661.

Rignot, E., A. Rivera & G. Casassa (2003). Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science*, 302(5644), 434-437.

Rivera, A., M. Koppes, C. Bravo & J. Aravena (2012). Little Ice Age advance and retreat of Glaciar Jorge Montt, Chilean Patagonia, *Climate of the Past*, 8, 403-414.

Rivera, A., F. Bown, F. Napoleoni, C. Muñoz & M. Vuille (2016). Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile, 203 pp.

Sakakibara, D., & S. Sugiyama (2014). Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011, *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1002/2014JF003148.

Schaefer, M., H. Machguth, M. Falvey, G. Casassa & E.

Rignot (2015). Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield, *The Cryosphere*, doi:10.5194/tc-9-25-2015.

Villarroel, C., J. Carrasco, G. Casassa & M. Falvey (2013). Modeling near-surface air temperature and precipitation using WRF with 5-km resolution in the Northern Patagonia Icefield: A pilot simulation. *International Journal of Geosciences*, 4, 1193-1199.

Weidemann, S. S., T. Sauter, Ph. Malz, R. Jaña, J. Arigony-Nieto, G. Casassa & Ch. Schneider (2013). Glacier Mass Changes of Lake-Terminating Grey and Tyndall Glaciers at the Southern Patagonia Icefield Derived From Geodetic Observations and Energy and Mass Balance Modeling. *Frontiers in Earth Science*, 6 (81), doi: 10.3389/feart.2018.0081.

Wilson, R., D. Carrión & A. Rivera (2016). Detailed dynamic, geometric and supraglacial moraine data for Glaciar Pio XI, the only surge-type glacier of the SPI. *Annals of Glaciology*, doi:10.1017/aog.2016.32.

Willis, M. J., A. K. Melkonian, M. E. Pritchard & A. Rivera (2012). Ice loss from the Southern Patagonian Ice Field, South America, between 2000 and 2012. *Geophysical Research Letters*, DOI:10.1029/2012GL053136.

Se agradece al CECs y al proyecto Fondecyt 1130381. El CECs es financiado por CONICYT y su programa de financiamiento basal. Las figuras fueron preparadas con ayuda de Daniela Carrión.

Créditos fotográficos

American Air Force, Andreu Sandra, ANENA, Archivos Nacionales de París, Azócar Guillermo, Bodin Xavier, Boutron Claude, Buglio Franco, Casassa Gino, Cattán Alex, Cereceda Francisco, Cisternas Sebastián, DAV Chile, DGA Chile, Expedición francesa a los Andes de Patagonia /G. Strouvé, Favier Vincent, Fondo fotográfico de la Biblioteca de la École normale supérieure, Francou Bernard, Ginot Patrick, IGE, Klohn Erik, Lliboutry Louis y Familia Lliboutry, Familia Marmillod, Rado Claude, Rivera Andrés, Silva Alejandro, Turrel Marc, Universidad de Chile, departamento de Fotografía y Microfilm. C. 1970. Colección Archivo Fotográfico, Archivo Central Andrés Bello.



AGRADECIMIENTOS DEL AUTOR

Agradezco a los que han contribuido a la edición de este apasionante libro:

Claude, Olivier y Emmanuel Lliboutry, Patricio Aceituno, Sandra Andreu, Carlos Berroeta, Gino Casassa, Erik Klohn, Jorge Quinteros, Cedomir Marangunic, Ana-Maria y Beatriz Reichert, Angélica Romagnoli, René León, Alex y Cristóbal Cattán, Diego González, Juan Carlos Eyzaguirre, Alvaro Vivanco, Claude Lorius, Michel Vallon, Paul Duval, François Gillet, Claude Boutron, Bernard Francou, Daniel Donnou, Claude Rado, Michel Creseveur, Christian Vincent, Jérôme Chappelaz, Alain de la Casinière, Jean-Luc Jaffrezo, Antoine Rabatel, Daniel Lançon, Marie-Christine Bordeaux, Michel Dietrich, Christiane y Etienne Mercier-Marmillod, Pascal Desmaison, Jérôme Gensel, Jacques Debelmas, Antonio Sachs, Sandrine Iraci.

Mis agradecimientos a las empresas e instituciones presentes en este libro: Aguas Andinas, Universidad de Chile, Dirección General de Aguas, Suma Air, CNRS, UNESCO, Université Grenoble-Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE).



Marc Turrel. Nació en Lyon (Francia) en 1962. Es editor, autor e historiador. Licenciado en comunicación de la Universidad de París. Editor de la revista *Andes Magazine* (1999-2008).

Es el autor de varios libros sobre la historia de los Andes.

Louis Lliboutry Le Champollion des glaces. 288p, UGA Editions / CNRS, Grenoble 2017.

Frédéric y Dorly Marmillod Carnets des Andes. 191p, Slatkine, Ginebra 2015. Traducido al alemán *Tagebuch der Anden* 191p, AS Verlag, Zürich 2016.

Carnets des Andes recibió el premio René Desmaison en Francia (2016).



EL HOMBRE QUE DESCIFRÓ LOS GLACIARES: **LOUIS LLIBOUTRY**

La odisea de la glaciología moderna comienza con el explorador y físico francés Louis Lliboutry.

Desde las misteriosas cumbres de los Andes hasta los glaciares más emblemáticos de los Alpes, Louis Lliboutry ha descifrado los secretos y los enigmas de esta extraordinaria materia que es el hielo.

Su aporte desde Chile a esta disciplina científica ha sido fundamental para conocer la dinámica de los grandes desiertos blancos del mundo y la importancia de la preservación de los glaciares como reguladores climáticos y proveedores de agua dulce del planeta.

