

LIMNOLOGÍA DE LAS LAGUNAS GLACIALES EN EL PÁRAMO DEL CHIRRIPÓ, COSTA RICA¹

Sally P. Horn

Department of Geography, University of Tennessee,
Knoxville TN 37996, Estados Unidos de América
Correo electrónico: shorn@utk.edu

Kenneth H. Orvis

Department of Geography, University of Tennessee,
Knoxville TN 37996, Estados Unidos de América

Kurt A. Haberyan

Department of Biology, NW Missouri State University,
Maryville MO 64468, Estados Unidos de América

RESUMEN. Hay más de 30 lagos de origen glacial en el páramo de Chirripó en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Este capítulo describe los aspectos geomorfológicos y la limnología física y química de 19 lagos ubicados entre los 3.450 y 3.570 ms.n.m. en las cuencas superiores de cinco valles glaciados. El agua de todos los lagos es clara y diluida y aparentemente poli-míctica. Los datos acerca de la química del agua de los años 1998, 2000 y 2001 son semejantes para todos los lagos y años y consistentes con las pocas medidas previas hechas entre 1966 y 1991. Sin embargo, las temperaturas acuáticas medidas por nosotros en los lagos son mucho más altas que aquellas registradas por investigadores en el pasado, lo cual posiblemente indica un cambio en el clima del páramo.

-
1. Este capítulo se basa en parte en las observaciones publicadas en: Horn, S.P., K.H. Orvis & K.A. Haberyan. 1999. Investigación limnológica y geomorfológica de lagos glaciares del Parque Nacional Chirripó, Costa Rica., publicado en la *Revista Informe Semestral* (Instituto Geográfico Nacional [IGN], Costa Rica) 35: 95-106. El material utilizado se reproduce con el permiso otorgado por la editorial del IGN. También contiene información nueva que se basa en nuestros recientes estudios. El manuscrito fue traducido por Marta E. Juárez Ruiz y revisado por Maarten Kappelle.

ABSTRACT. More than 30 lakes of glacial origin exist within the Chirripó páramo in the Cordillera de Talamanca of Costa Rica. This chapter describes the geomorphic setting and physical and chemical limnology of 19 lakes located between 3450-3570 m elevation in the upper basins of five glaciated valleys. All lakes are clear, dilute, and apparently polymictic. Water chemistry data from 1998, 2000, and 2001 are similar from lake to lake and year to year, and are consistent with sparse prior measurements between 1966 and 1991. However, the lake water temperatures we have measured are much higher than those reported by earlier researchers, possibly indicating a change in climate in the páramo.

Introducción

La erosión y la deposición glacial en el páramo de Chirripó han producido una concentración de lagos glaciales tan única, que no tiene su equivalente en la región entre Colorado y Venezuela. El tamaño de los lagos fluctúa desde menos de la décima parte de una hectárea (ha) hasta casi 8 ha y desde menos de 1 m de profundidad hasta unos 22 m. Muchos de los estanques y pozos superficiales se secan durante la estación seca, pero más de 30 generalmente mantienen el agua a través del año. La unicidad y la belleza de estos lagos paramunos de alta elevación contribuyeron a la idea original de establecer el Parque Nacional Chirripó y siguen siendo destinos populares para montañistas y escaladores.

En febrero y marzo de 1998 pudimos recolectar datos limnológicos de nueve lagos ubicados en el páramo de Chirripó, principalmente en el Valle de las Morrenas (Horn *et al.* 1999). Se describió el ambiente físico y la manera en que se formaron los lagos muestreados y ocho estanques adicionales, que estaban secos a la hora del muestreo o no pudieron ser muestreados debido a la falta de tiempo u otras limitaciones. Tres de los lagos donde se hizo un muestreo en 1998 habían sido investigados por otros científicos en 1966, 1979 y 1986. Nuestros datos químicos resultaron bastante similares a la información de las investigaciones previas, pero las temperaturas de la superficie del agua eran 8° C más altas que en el pasado. Anteriormente habíamos atribuido esta anomalía en el calor a las condiciones tan secas y despejadas asociadas con el fenómeno El Niño de 1998. Sin embargo, en este trabajo volvemos a evaluar tal conclusión.

En este capítulo ampliamos los datos de nuestra previa publicación, presentando observaciones hechas durante nuestras expediciones en marzo de 2000, marzo de 2001 y mayo de 2001. Estas observaciones incluyen el monitoreo reiterado de lagos seleccionados de nuestro estudio de 1998, más observaciones nuevas sobre las propiedades físicas y químicas y el modo en que se formaron unos 10 lagos en el páramo de Chirripó. Ofrecemos la información de este capítulo como un paso más en el proceso del inventario completo de los lagos del Parque Nacional Chirripó. Nuestras observaciones limnológicas proporcionan datos fundamentales para el estudio futuro de los cambios en las condiciones de los lagos, debidos al impacto humano en el parque y a la dinámica climática a mayor escala.

Investigaciones previas y antecedentes

Nuestro trabajo de campo en la zona de los lagos paramunos tuvo lugar en febrero y marzo de 1998 (Horn *et al.* 1999) y fue precedido por tres investigaciones limnológicas en el páramo de Chirripó. En la primera, en agosto y setiembre de 1966, el limnólogo austriaco Heinz Löffler midió las propiedades físicas y químicas del lago Chirripó, el lago de las Morrenas 1 y el lago Ditkebi (Löffler 1972). En la segunda, en 1979, Klaus Göcke, del instituto alemán *Institut für Meereskunde*, aprovechó las maniobras de un helicóptero del ejército de Estados Unidos en el área, para organizar una expedición que incluyó a varios limnólogos costarricenses (Göcke *et al.* 1981). Su equipo amplió el trabajo de Löffler, agregando mediciones de las condiciones limnológicas y de la batimetría del lago Chirripó. Durante la tercera, en setiembre de 1986, un equipo de limnólogos estadounidenses y costarricenses, bajo la coordinación de John Jones, muestreó otra vez el lago Chirripó y el lago de las Morrenas 1 e hizo las primeras observaciones del lago de las Morrenas 2 (Jones *et al.* 1993).

En julio 1991, nuestro baquiano y guía José Luis Garita recolectó muestras del agua superficial del lago Chirripó y del lago de las Morrenas 1 (Horn & Haberyan 1993), como parte del estudio de las propiedades físicas y químicas y el fitoplancton de 30 lagos costarricenses (Haberyan *et al.* 1995, Wujek *et al.* 1998). Luego, Haberyan *et al.* (1997), Zeeb *et al.* (1996), Horn (1993) y Rodgers & Horn (1996) estudiaron las diatomeas, las crisofitas y los granos polínicos en los segmentos lacustres superficiales del lago Chirripó y del lago de las Morrenas 1. Los núcleos de sedimento de éstos y otros lagos paramunos han sido utilizado para la investigación paleoambiental, tal y como describen en otros capítulos de este libro Orvis & Horn, Horn & League y Haberyan & Horn.

Herrera (en otro capítulo en este libro) describe el clima actual del páramo de Chirripó y otros sitios de alta elevación en Costa Rica por encima de 3.000 ms.n.m. Para el período anterior a 1999, solamente existen unas cuantas observaciones meteorológicas dispersas para el páramo de Chirripó (Weber 1959, Kohkemper 1983). La nueva estación meteorológica al noroeste de la Base Crestones en el Parque Nacional Chirripó (altitud aproximada: 3.580 ms.n.m.) comenzó a llenar este vacío, aunque el período del registro es todavía muy corto para una comparación rigurosa. Existe un registro más largo de la estación meteorológica situada encima del Cerro Páramo (datos no publicados de la estación No. 073080 del Instituto Costarricense de Electricidad-ICE), a una altitud de 3.475 ms.n.m. y unos 30 km al noroeste del Cerro Chirripó, sobre la carretera Interamericana, el cual probablemente es bastante representativo de las condiciones del páramo. Esta estación mostró una temperatura promedio anual de 7,6° C en los períodos 1971-1979 y 1982-1986 (Horn 1989). La precipitación promedio anual para el período de 1971 a 2000, con un registro incompleto para octubre de 1983, fue de 2.572 mm (datos no publicados de la estación No. 073080 del ICE). La mayor parte de la lluvia cayó durante los meses de abril a noviembre.

Las investigaciones geomorfológicas y geológicas relevantes para el estudio de la formación de los lagos del Chirripó incluyen las siguientes: (i) los trabajos sobre

la geomorfología glacial de Weyl (1956a,b), quien fue el primero en reconocer que estos lagos tienen un origen glaciar; Hastenrath (1973), Orvis & Horn (2000, en este libro), Lachniet & Seltzer (2002) y Lachniet *et al.* (en este libro); (ii) los estudios acerca de la geología elaborados por Calvo (1987); y (iii) los estudios a gran escala sobre la morfología del macizo del Chirripó basados en interpretaciones de fotografías aéreas, hechos por Bergoeing (1977), Barquero & Ellenberg (1982-1983) y Shimizu (1992). Las investigaciones indican que la mayoría de los lagos del Chirripó ocupa cuencas sobre todo erosionadas en granodioritas y otras rocas plutónicas de la serie de intrusivos de Talamanca, los cuales se metieron en rocas sedimentarias marinas y volcánicas hace 12 a 9 millones de años durante el Mioceno medio (Mosheim 1984, Calvo 1987, Drummond *et al.* 1995). La excepción más notable es la cuenca del lago Ditkebi, el cual se ha desarrollado en un fondo de depósitos piroclásticos (Calvo 1987).

Métodos

Hicimos muestreos en el lago Chirripó, los lagos Chirripó 2 y 3 y los lagos de las Morrenas 1, 2, 3, 4 y 3A, desde una pequeña balsa de hule, cerca del centro de cada lago. En otros lagos, las limitaciones del tiempo nos obligaron a muestrear desde la orilla. Se midió la temperatura del aire y el agua con un termómetro o YSI 55 Meter (sólo en 1998), la claridad (transparencia) del agua utilizando un disco de Secchi y la profundidad empleando una cuerda con pesos.

En 1998 se midió el oxígeno utilizando un YSI Meter calibrado para una altitud de 3.050 ms.n.m. (la máxima elevación para una calibración interna); más tarde, se recalibraron estos datos de acuerdo con las elevaciones verdaderas utilizando información otorgada por el personal del YSI. Después, se recolectó una serie de muestras (libres de aire) del agua de la superficie de los lagos y se analizó la química de cada una a las cinco semanas, utilizando los métodos de la cromatografía de iones (IC), la espectroscopía conocida como *inductively-coupled argon plasma optical emission spectroscopy* (ICP), la espectroscopía atómica de absorción (AA) y la espectrofotometría de Hach (HS). Los resultados obtenidos en 2001 mediante AA deberían ser comparables a los valores adquiridos con ICP en años previos, pues las técnicas se basan en los mismos principios. Los datos de Si obtenidos con el método HS (utilizado sólo para Si y sólo en 2001) quizás no son estrictamente comparables con los valores de Si adquiridos con ICP en años anteriores.

En estudios pasados presentamos las áreas que cubren el lago Chirripó y el lago de las Morrenas 1, calculadas a partir de la digitación de los polígonos presentes en las hojas topográficas a una escala de 1:50.000 (Horn & Haberyan 1993). En el presente trabajo se ofrece información más precisa, calculada con base en la digitación de las orillas de los lagos como se ven en las fotografías aéreas a una escala de 1:14.000, tomadas desde una avioneta en 1980 por el Instituto Geográfico Nacional. Las superficies de los lagos aquí muestreadas fueron medidas superponiendo una grilla con celdas o parcelas cuadradas de 10 por 10 m encima del mapa y contando las parcelas cubiertas.

Resultados y discusión

Los lagos estudiados se encuentran entre 3.450 y 3.570 m en las cuencas superiores de los cinco valles glaciados (Fig. 1). Ocupan depresiones glaciales formadas en lechos rocosos, en *till* (un depósito de sedimentos glaciales) o en combinaciones de ambos. El Cuadro 1 resume las características físicas de los lagos y el Cuadro 2 recopila los datos de la temperatura y la química del agua. Para poder comparar, se incluyeron los datos para las muestras recolectados en 1991 a partir de agua superficial del lago Chirripó y el lago de las Morrenas 1.

Cuadro 1

Características físicas de los lagos seleccionados en el Parque Nacional Chirripó

El sistema de enumeración de los lagos en el Valle de las Morrenas ha sido ampliado de Jones *et al.* (1993). En publicaciones previas de Horn y Haberyan y colaboradores, el lago más grande del Valle de las Morrenas (Lago 1) se identificó como el Lago de las Morrenas o Lago Morrenas.

HH ¹	Lago ²	Fecha ³	LN ⁴	LO ⁵	Elev. ⁶	Área ⁷	P ⁸	PS ⁹
5	Lago Chirripó ¹⁰	3/00	9° 29' 04"	83° 29' 54"	3520	7.8	20.2	11.4
79	Lago Chirripó 2	3/00	9° 29' 00"	83° 30' 05"	3495	2.7	4.0	>dep.
81	Lago Chirripó 3	3/00	9° 29' 03"	83° 30' 16"	3457	1.9	4.0	>dep.
89	Laguna Pacífico 1	5/01	9° 29' 23"	83° 30' 08"	3557	0.1	1.5	>dep.
90	Laguna Pacífico 2	5/01	9° 29' 19"	83° 30' 17"	3530	0.4	3-4	>dep.
83	Laguna Encerrada 1	5/01	9° 29' 35"	83° 29' 47"	3570	<0.1	~1	>dep.
84	Laguna Encerrada 2	3/00	9° 29' 41"	83° 29' 48"	3555	0.5	2-3	>dep.
85	Laguna Encerrada 3	3/00	9° 29' 46"	83° 29' 45"	3548	0.4	1-2	>dep.
86	Laguna Encerrada 4	3/00	9° 29' 51"	83° 29' 41"	3534	<0.1	<1	>dep.
60	Lago de las Morrenas 0	3/98	9° 29' 30"	83° 29' 06"	3496	1.1	<2	>dep.
6	Lago de las Morrenas 1 ¹¹	1/89	9° 29' 40"	83° 29' 14"	3477	5.6	8.3	>7.5
61	Lago de las Morrenas 2	3/98	9° 29' 42"	83° 29' 25"	3475	2.3	1.3	>dep.
62	Lago de las Morrenas 3	3/98	9° 29' 52"	83° 29' 24"	3472	3.1	8.1	6.1
63	Lago de las Morrenas 4	3/98	9° 29' 59"	83° 29' 20"	3466	0.6	3.0	>dep.
64	Lago de las Morrenas 2A	3/98	9° 29' 25"	83° 29' 25"	3532	<0.1	<1	>dep.
81	Lago de las Morrenas 3A	3/01	9° 29' 49"	83° 29' 29"	3494	0.2	0.3	>dep.
82	Lago de las Morrenas 3C	3/00	9° 29' 50"	83° 29' 13"	3492	0.9	<2	>dep.
59	Laguna del Refugio	3/98	9° 30' 09"	83° 29' 34"	3450	<0.1	<1	>dep.
65	Lago Ditkebi ¹²	3/98	9° 28' 11"	83° 28' 56"	3493	1.2	7.0	>dep.

Notas: HH= números del autor que se refieren al mayor juego de datos del autor, sobre los lagos de Costa Rica, se incluyen para facilitar la comparación con otros estudios; Lago= nombre del lago estudiado; Fecha= fecha de la medición (mes/año); LN= Latitud Norte; LO= Longitud Oeste; Elev.= elevación sobre el nivel del mar, en metros (m); Área= superficie del lago, en hectáreas (ha); P= profundidad normal del lago, en metros (m); PS= profundidad con el disco de Secchi, en metros (m). Göcke *et al.* (1981) midieron una profundidad máxima en el Lago Chirripó de 22 m en el año 1979. La profundidad del Lago de las Morrenas 1 corresponde a la profundidad máxima medida por Horn (1993) a lo largo de dos transectos batimétricos en enero de 1989, y la profundidad medida con el disco de Secchi resulta del sondeo del lago en el mismo mes, cuando fue posible ver el sitio del sondeo a una profundidad de 7,5 m, mientras que la medición de la profundidad con el disco de Secchi en febrero de 1998 excedió la profundidad del lago de 6,2 m del sitio del muestreo limnológico. Las profundidades P y PS para el Lago Ditkebi son de Löffler (1972).

Cuadro 2

Características químicas y temperaturas de la superficie del agua de los lagos seleccionados en el Parque Nacional Chirripó.

Los datos fueron redondeados hasta el 0.1 mg/L AA más cerca, y se aplicó HS en lugar de ICP para las muestras de los meses de marzo y mayo de 2001.

Lago	Fecha	TA LD	O ₂ --	S 0.2	SO ₄ ⁻ 0.4	Cl ⁻ 0.08	Ca ⁺⁺ 0.1	Mg ⁺⁺ 0.03	Na ⁺ 0.02	Si 0.04
Lago Cirripó	7/91	sd	sd	0.3	0.9	0.7	1.2	0.2	0.9	1.0
	3/98	14.4 (17:40)	6.9	0.3	0.2	0.1	0.6	0.1	0.5	1.1
	3/00	13.2 (13:20)	sd	0.1	sd	sd	0.7	0.1	0.2	1.1
	5/01	sd	sd	sd	0.3	0.1	2.5	0.2	1.5	0.4
Lago Chirripó 2	3/00	14.2 (15:19)	sd	0.1	sd	sd	0.8	0.2	0.3	1.1
	5/01	sd	sd	sd	0.4	0.1	6.9	0.2	1.5	0.2
Lago Chirripó 3	3/00	13.9 (16:21)	sd	0.6	sd	sd	5.3	0.4	0.8	2.1
	5/01	sd	sd	sd	2.2	0.1	6.1	0.4	4.5	1.0
Laguna Pacífico 1	5/01	sd	sd	sd	0.9	0.3	3.4	0.2	2.1	1.9
Laguna Pacífico 2	5/01	sd	sd	sd	1.2	0.2	2.7	0.2	1.7	0.3
Laguna Encerrada 1	5/01	sd	sd	sd	0.7	0.2	4.0	0.3	2.2	2.6
Laguna Encerrada 2	3/00	sd	sd	0.2	sd	sd	2.3	0.3	2.2	4.6
Laguna Encerrada 3	3/00	sd	sd	0.1	sd	sd	0.7	0.1	0.7	1.1
Laguna Encerrada 4	3/00	sd	sd	0.2	sd	sd	2.0	0.3	2.3	5.1
Lago de las Morrenas 0	2/98	18.5 (12:13)	6.3	1.4	3.1	<0.1	2.1	0.5	1.4	1.8
	3/01	sd	sd	sd	2.5	0.1	2.4	3.5	1.4	1.7
	7/91	sd	sd	2.0	1.8	2.4	0.6	0.3	7.4	0.8
Lago de las Morrenas 1	2/98	15.3 (13:58)	6.6	0.5	0.9	<0.1	1.1	0.2	0.8	2.0
	3/00	15.4 (16:15)	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
	3/01	sd	sd	sd	0.9	0.3	3.4	0.2	0.9	2.3
	2/98	18.9 (14:41)	6.4	0.6	1.2	<0.1	3.7	0.6	1.7	3.7
Lago de las Morrenas 2	3/00	15.8 (15:45)	sd	0.3	sd	sd	2.4	0.4	1.0	3.2
	3/01	sd	sd	sd	0.9	0.1	5.2	0.5	1.9	2.0
	2/98	14.9 (15:35)	7.0	0.5	0.7	sd	3.8	0.5	1.1	2.8
Lago de las Morrenas 3	3/00	15.3 (15:25)	sd	0.4	sd	sd	4.5	0.6	1.1	3.1
	3/01	sd	sd	sd	0.7	0.1	4.0	<0.1	1.2	1.7
	2/98	17.2 (17:28)	6.8	0.7	1.0	sd	4.7	0.7	1.6	3.3
Lago de las Morrenas 4	3/00	sd	sd	0.5	sd	sd	4.6	0.7	1.1	3.2
	3/01	sd	sd	sd	0.9	0.1	5.2	0.4	1.7	2.3
Lago de las Morrenas 2A	2/98	12.6 (08:59)	5.3	0.4	0.5	0.1	1.1	0.2	1.7	1.4
Lago de las Morrenas 3A	3/00	18.5 (14:37)	sd	0.1	sd	sd	0.9	0.2	0.8	1.4
	3/01	15.3 (11:46)	sd	sd	0.8	0.2	3.2	0.2	1.5	2.3
Lago de las Morrenas 3C	3/00	14.8 (12:08)	sd	0.3	sd	sd	0.3	0.1	0.6	1.4
Laguna del Refugio	2/98	14.8 (17:50)	6.3	1.3	1.5	0.2	12.2	1.2	2.8	6.2
Lago Ditkebi	3/98	sd	sd	0.3	0.3	<0.1	3.5	1.4	0.9	2.2
	3/01	sd	sd	sd	0.3	0.1	5.7	1.3	1.3	2.3

Notas: Lago= nombre del lago estudiado; Fecha= fecha de la visita (mes/año); TA= temperatura del agua en grados centígrados (o C), con el tiempo de la medición de acuerdo con el tiempo de Costa Rica en paréntesis (para obtener el tiempo solar se deben añadir unos 6 minutos; véase el texto para la metodología analítica); LD= límite de detección; O₂= O₂ mg/L metro; S= S mg/L ICP; SO₄= SO₄= mg/L IC; Cl= Cl- mg/L IC; Ca+= Ca++ mg/L ICP/AA; Mg+= Mg++ mg/L ICP/AA; Na+= Na+ mg/L ICP/AA; Si= Si mg/L ICP/HS; sd= sin datos.

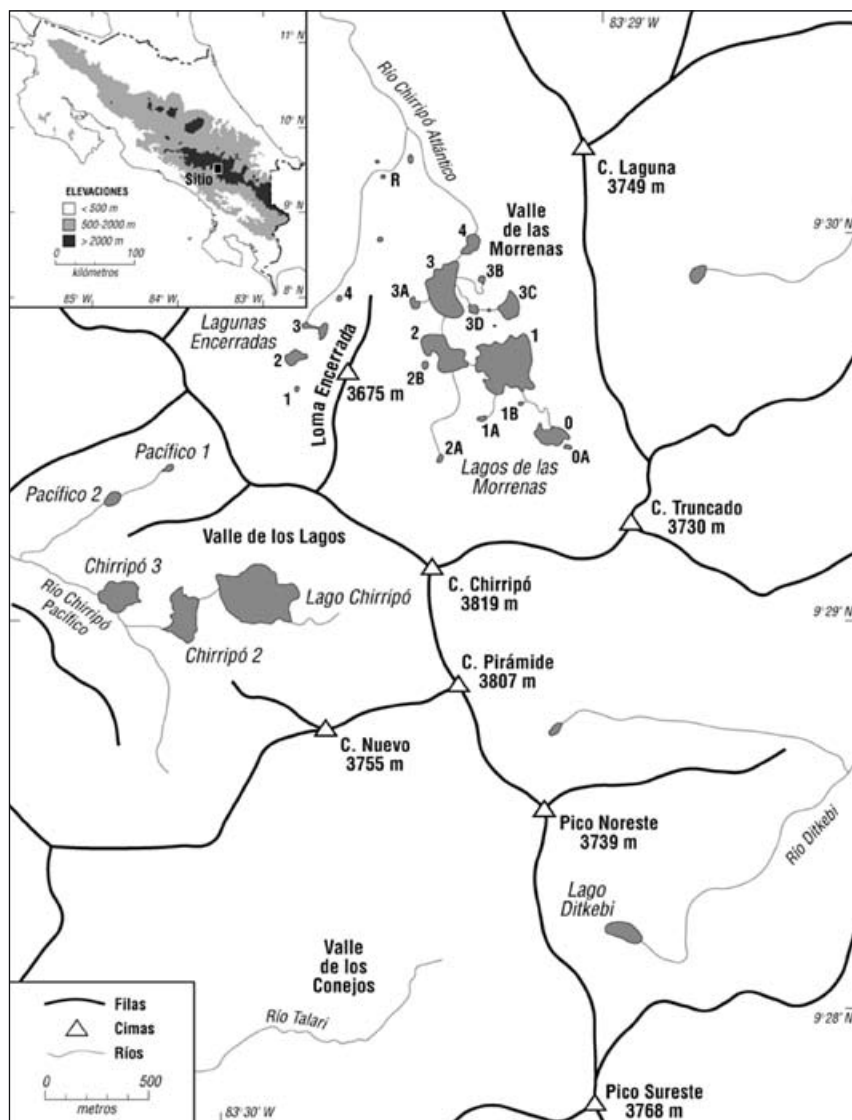


Figura 1. Ubicación de los lagos del macizo del Chirripó, con base en las hojas topográficas (escala 1:50.000) publicadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Los límites de los lagos han sido derivados de las fotografías del IGN, tomadas en 1980.

Los datos de 1991 para SO_4^{2-} y Cl^- son de IC y son los mismos publicados anteriormente por Horn & Haberyan (1993); los otros datos químicos se basan en ICP de muestras uni-acidificadas (Horn & Haberyan 1993; datos no publicados). La Fig. 2 muestra los perfiles de temperatura y oxígeno para los pagos de las Morrenas 1-4 en el Valle de las Morrenas. Aunque todos los lagos son muy diluidos, las concentraciones

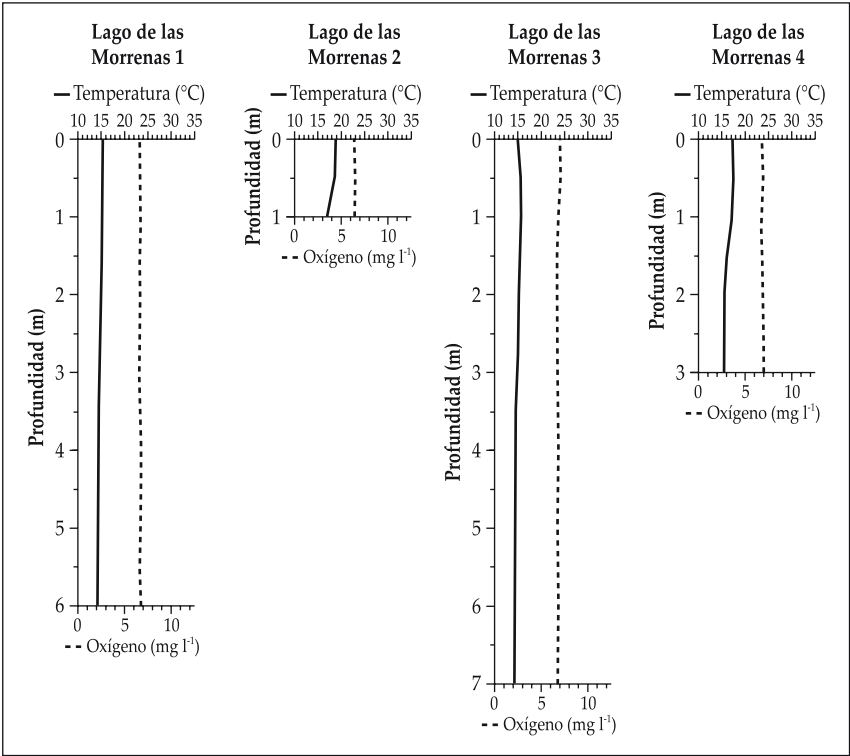


Figura 2. Los perfiles de temperatura y oxígeno para los lagos de las Morrenas 1, 2, 3 y 4, con base en mediciones hechas el día 25 de febrero de 1998. Reproducido con el permiso de la editorial del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica (Horn *et al.* 1999).

químicas medidas se encuentran en su mayoría por encima de los límites de detección para nuestros métodos analíticos. Las discrepancias en concentración encontradas en muestreos repetidos indican diferencias débiles, pero reales, en la química lacustrina. Las comparaciones entre nuestros datos de la temperatura y los resultados que se obtuvieron previamente también indican cambios a través del tiempo. Abajo se presentan y discuten nuestras observaciones limnológicas, en combinación con las descripciones de la geomorfología de la cuenca del lago.

Lagos en el Valle de los Lagos (cabeceras del río Chirripó Pacífico)

LAGO CHIRRIPO (LAGUNA DE SAN JUAN)

El lago Chirripó también se conoce como laguna de San Juan o laguna Grande de Chirripó. De los tres lagos, éste es el de mayor elevación en el Valle de los lagos, donde se encuentran las cabeceras (*headwaters*) del río Chirripó Pacífico, inmediatamente al oeste del cuerno geomorfológico glacial (*horn*) del Cerro Chirripó. (La hoja topográfica

llamada Dúrika, a una escala de 1:50.000, erróneamente usa el nombre “Valle Lagos” para referirse al valle de las cabeceras del río Chirripó Atlántico. Este último valle se llama Valle de las Morrenas, nombre que ha sido utilizado tanto por la población local como por los científicos, y será tratado más adelante). El otro nombre del lago Chirripó–laguna Grande de Chirripó– es muy apropiado, ya que se trata del lago más grande y más profundo del macizo de Chirripó.

Nuestras limitadas observaciones de campo apoyan la conclusión de Hastenrath (1973) de que los umbrales rocosos jugaron un papel importante al conformar una presa en este lago. El lago Chirripó es un *tarn* (lago formado por la misma acción erosiva de los glaciares), que ocupa una cuenca con un lecho rocoso en el piso central de la cuenca superior del *cirque* y se encuentra detrás de una grada del lecho rocoso. El lecho rocoso debajo del lago es granodiorítico, aunque por debajo de la mitad del área de drenaje subyacen rocas areniscas marinas y volcanoclásticas (Calvo 1987). El margen superior suroriental es como una bahía superficial, pero a una distancia de 80 m del borde el piso cae sobre lo que parece ser un escarpe subacuático del lecho rocoso, alcanzando una profundidad de 22 m (Göcke *et al.* 1981).

Göcke *et al.* (1981) estudiaron el lago Chirripó durante varios días en marzo de 1979 y elaboraron un mapa detallado de su batimetría, que muestra que la parte más profunda se encuentra en el centro aproximado geográfico. El lago Chirripó es el segundo lago más profundo de todos los lagos naturales estudiados hasta la fecha en Costa Rica (Umaña *et al.* 1999). Solo el lago de tipo “*maar*” llamado laguna Río Cuarto (68 m) es más profundo (Horn & Haberyan 1993).

En ese mes de marzo de 1979, Göcke *et al.* (1981) notaron que la temperatura del aire a 1 m por encima del suelo nunca superó los 14.2° C (temperatura medida a las 3 p.m. del 16 de marzo). La temperatura mínima a 1 m por encima del suelo fue de 2° C (temperatura medida a las 6 a.m. del 18 de marzo), pero las temperaturas al nivel del suelo sí cayeron por debajo de 0° C, causando escarcha. A horas tempranas, el 17 de marzo de 1985, S. Horn registró una temperatura del aire de -9.4° C a una altura aproximada de 25 cm por encima del suelo, en el sitio de la península que se extiende desde el lado nororiental del lago. El borde del lago tenía una capa de hielo con un grosor de hasta unos 0,6 cm, extendiéndose hasta una distancia de aproximadamente 1 m desde el borde (Horn *et al.* 1999).

El 17 de marzo de 1979, Göcke *et al.* (1981) registraron un borde litoral de hielo delgado. La temperatura del agua del lago fue de 10° C a las 6:15 a.m. y alcanzó su máximo a las 3 p.m. Mediciones repetidas mostraron una variación diurna muy pequeña. Durante el día, la columna de agua desarrolló sólo una estratificación débil (Göcke *et al.* 1981). Aparentemente, el agua del lago se revuelve completamente durante la noche, debido a la convección causada por el enfriamiento radiactivo bajo condiciones típicas y a la advección por el viento cuando el tiempo es severo.

Löffler (1972) y Jones *et al.* (1993) registraron temperaturas similares de agua para el lago Chirripó: 10.7° C a las 9:45 a.m. el 28 de agosto de 1966 (Löffler 1972) y 9° C el 29 de agosto de 1986 (sin datos de la hora, Jones *et al.* 1993).

Nosotros medimos unas temperaturas bastante mayores para el agua del lago durante los meses de marzo de 1998 y marzo de 2000 (Cuadro 2). El 1 de marzo de 1998, a las 5:40 p.m. se midió una temperatura superficial de unos 14.4° C en el lago cerca de su borde (temperatura del aire: 13.6° C). El 19 de marzo de 2000 se midió una temperatura superficial de unos 13.2° C en el lago cerca de su centro (temperatura del aire: 9.2° C).

Los datos químicos que recolectamos en el lago Chirripó durante las estaciones secas de 1998 y 2000 son muy similares entre sí. Igual que nuestros datos de la mitad de la época lluviosa de 1991, éstos indican que el lago estaba muy diluido. Sin embargo, los datos más recientes, recolectados en la época seca, muestran concentraciones aún menores para la mayoría de los iones. El hecho de que las muestras de agua recogidas durante la época seca tuvieran concentraciones de sustancias disueltas (*solutes*) más bajas que las recolectadas durante la época lluviosa, no concuerda con lo que uno esperaba y merece estudios adicionales. Este patrón podría explicarse por la presencia de un sistema hidrológico, por el cual el lago recibe poco flujo acuático durante la época seca. En tal caso, la precipitación que cae temprano en la época lluviosa puede causar un flujo de agua subterránea desde las grietas de rocas y suelos, aunque tal flujo podría ser diluido de una manera progresiva conforme avanza la época lluviosa.

De este modo, el lago podría servir como un reservorio (depósito) de agua, diluida a raíz de la escorrentía, durante la parte tardía de la época lluviosa. La muestra de agua recogida en mayo de 2001 –temprano durante la época lluviosa– tenía concentraciones más bajas de SO_4^- y Cl que la muestra recolectada a la mitad de la época lluviosa (julio 1991); las concentraciones de Ca^{++} , Mg^{++} y Na^{+} superaron las concentraciones medidas en la muestra que tomamos en julio de 1991. El análisis de las concentraciones de sílice en mayo de 2001 resultó en un valor más bajo que en el análisis de muestras de fechas previas, pero, como ya se mencionó, el uso de métodos analíticos diferentes complicó la comparación. Nuestros datos químicos de fecha más reciente del lago Chirripó también son ampliamente comparables con las mediciones previas de Löffler (1972), Göcke *et al.* (1981) y Jones *et al.* (1993). Sin embargo, el hacer comparaciones específicas entre estos trabajos es problemático, debido a los diferentes métodos utilizados y las unidades registradas.

LAGO CHIRRIPÓ 2

El lago Chirripó 2 es el más central de los tres grandes lagos del Valle de los lagos; utilizamos este nombre para aclarar su relación con el lago Chirripó y el siguiente lago cuenca abajo. De acuerdo con Kohkemper (1968), los miembros de una expedición guiada por Francisco Fau Campmany en febrero de 1960 lo bautizaron “Lago de las Damas”, en honor a las dos señoras que participaron en la expedición y que aparentemente fueron las primeras mujeres en ascender el Cerro Chirripó; sin embargo, este nombre parece haber sido poco utilizado.

El lago Chirripó 2 es un *tarn* que ocupa la base de un lecho rocoso detrás de una grada de un lecho rocoso glacial. Se midió una profundidad máxima de 4 m, cerca de la entrada de la quebrada oriunda del lago Chirripó. El lecho rocoso por debajo del lago es granodiorítico, pero en la mitad de la zona de drenaje afluyente subyacen rocas areniscas marinas volcánicas (Calvo 1987). A las 3:19 p.m. del 19 de marzo de 2000 medimos una temperatura atmosférica de 9,1° C y una temperatura del agua de 14,2° C, lo cual corresponde a valores nuevamente mayores que los registrados por Göcke *et al.* (1981) para el lago Chirripó. Nuestra muestra de agua recogida en la época seca (marzo 2000) del lago Chirripó 2 presenta una química muy similar a la de la muestra recolectada del lago Chirripó, también en marzo de 2000. La muestra de mayo de 2001 enseña otra vez niveles mayores para Ca⁺⁺ y Na⁺ y valores inferiores para Si, en comparación con la muestra de marzo de 2000.

LAGO CHIRRIPO 3

De los tres lagos del Valle de los lagos, el Chirripó 3 es el que se encuentra a menor elevación. También se ubica por encima de una grada de un lecho rocoso y tiene una profundidad máxima idéntica a la del lago Chirripó 2. Sin embargo, la mayor parte del lago es considerablemente menos profunda (<1 m) y presenta un piso de color claro con sedimentos lisos, visibles desde el borde del lago. El valle por debajo del lago es granodiorítico, pero rocas areniscas marinas volcánicas subyacen por la mitad de la zona superior de drenaje, mientras que el flanco suroeste del valle incluye localmente lavas basálticas que han formado enormes bloques de la pared que casi alcanzan el nivel del lago. Las temperaturas del aire y el agua, de 8,5° C y 13,9° C respectivamente, a las 4:21 p.m. del 19 de marzo de 2000 concuerdan con las mediciones que se hicieron antes ese mismo día en los dos lagos cuenca arriba.

Las muestras de agua de marzo de 2000 y mayo de 2001, recolectadas en el Chirripó 3, indican que este lago tenía mayores concentraciones que los otros dos lagos cuenca arriba. Tres factores pueden jugar un papel aquí: (1) el pequeño volumen del lago Chirripó, especialmente cuando se compara con su área superficial; (2) su posición como tercer lago en una serie, que por lo tanto recibe el flujo concentrado de los lagos superiores; y (3) su posición inferior en este valle empinado, donde es muy probable que reciba una proporción mayor de agua subterránea rica en sustancias disueltas, comparada con el agua meteórica, especialmente en la época seca.

Lagos del valle con una pendiente hacia el este y por arriba del río Chirripó Pacífico

En mayo de 2001, hicimos un muestreo en dos lagos del valle tributario del río Chirripó Pacífico que se encuentra al otro lado de la silla entre la Fila Urán y la Loma Larga. Este valle glacial pendiente ha sido grabado en granodiorita y se abre hacia el valle del río Chirripó Pacífico, más de 100 m por encima del piso del valle.

LAGUNA PACÍFICO 1

La laguna Pacífico 1 es una depresión pequeña sobre el piso de un *cirque* entre material de talud y *till*, con una presa de *till* y basado en cantos rodados dispersos y lodo pardo claro, firme y arcilloso. El lago contenía algo de agua cuando fue visitado en marzo de 2000 y mayo de 2001, pero la presencia de grandes hendiduras por desecación muestran que se seca regularmente. La profundidad de 1,5 m que presentamos en el Cuadro 1 es nuestra estimación de la profundidad cuando el lago está lleno, pero puede ser que se llene parcialmente a menudo antes de que el agua se evapore. El sitio parece ser un lugar popular (*wallow*) donde nadan las dantas. El agua del lago es típica de estos lagos paramunos, pero tiende a mantener concentraciones un poco más bajas en Ca^{++} , Mg^{++} y Si.

LAGUNA PACÍFICO 2

La laguna Pacífico 2 es como una pequeña taza simétrica. Aparentemente, se encuentra estancada entre dos pequeñas morrenas recesionales, posada sobre una repisa rocosa en la pendiente final del valle, a una elevación alta por encima del río Chirripó Pacífico. Lleno de agua en mayo de 2001, este lago no mostró ninguna evidencia de desecación. Desde su borde se pudo estimar una profundidad de 3 a 4 m, pero podría ser más profundo. La muestra de agua reveló una reducida concentración de la mayoría de los iones, especialmente en comparación con el lago Pacífico 1, lo cual puede reflejar su estado permanente.

Los lagos en el valle al oeste de la Loma Encerrada

El lecho rocoso en este valle raramente visitado se compone de rocas intrusitas granodioríticas (Calvo 1987).

LAGUNA ENCERRADA 1

La laguna Encerrada 1 no es mucho más que una sección pobremente drenada del piso plano del *cirque* superior. Nunca la vimos seca, pero sí se nota la presencia de varios canales y pequeños charcos interconectados ubicados en lodo suave y separados por lóbulos de regolita –no roca– con cubierta vegetal. Los estanques tienen una profundidad de más o menos 1 m. El flujo saliente sigue sobre una sección baja de una unidad resistente del lecho rocoso que forma un par de estribaciones iguales, una de la pared principal de la Fila Urán y otra de la Loma Encerrada. Las muestras de agua indican bajas concentraciones para la mayoría de los iones (especialmente aniones), como es de esperar en un lago que tiene una alta proporción de agua fluyendo a través de él.

LAGUNA ENCERRADA 2

La laguna Encerrada 2 es un pequeño *tarn* detrás de una grada resistente de un lecho rocoso. Desde su borde, parece que tiene una profundidad de 2–3 m, con un piso suave de sedimento un poco arenoso. La superficie del lago, tanto en 2000 como en 2001, se encontró cubierta a medias por una planta acuática emergente que forma un tipo de tapetito (probablemente *Centella asiatica*, de la familia de las apiáceas). El área alrededor del lago sirve de hábitat para la danta, que paca allí intensamente. La química del agua incluye concentraciones de Ca^{++} un poco reducidas y niveles mayores de Si, en comparación con la laguna Encerrada 1.

LAGUNA ENCERRADA 3

La laguna Encerrada 3 ha sido mapeada sobre la hoja topográfica de Dúrika (escala: 1:50.000; IGN) como dos estanques, pero en la actualidad conforma una única laguna, aunque la parte noroeste y menos profunda parece secarse regularmente; aparentemente, la otra parte no se seca. Este lago ocupa una depresión formada por un lecho rocoso por encima de una grada rocosa, pero la mayor parte de la cuenca del lago, como se ve en la actualidad, está compuesta de material de *till* más otros sedimentos. Parece tener una profundidad de 1–2 m, con un piso que varía de arenoso a lodoso. Sus aguas contienen concentraciones un poco más bajas para todos los iones.

LAGUNA ENCERRADA 4

La laguna Encerrada 4 ocupa una pequeña depresión de un lecho rocoso sobre el flanco sureste del canal glacial, aparte del drenaje principal del valle. Parece que tiene una presa de material de *till*, quizás como remanente de una morrena lateral recesional, lo cual significa que puede ser un poco más viejo que los otros tres lagos superiores de Encerrada. Este lago es muy superficial, con menos de 1 m de profundidad y un piso de lodo suave. La muestra de agua contiene concentraciones de iones comparables con las de los otros lagos del valle, pero se nota una pequeña riqueza mayor en Si.

Los lagos en el Valle de las Morrenas (cabeceras del río Chirripó Duchí [Atlántico])

El Valle de las Morrenas (erróneamente llamado “Valle Lagos” en la hoja topográfica de Dúrika, escala: 1:50.000) es el valle con el mayor número de lagos y estanques. Tiene un piso muy irregular, por dos razones. El lecho rocoso intrusivo e ígneo se ve muy fuertemente pegado y ha podido desarrollarse por la acción glacial a diferentes profundidades en varios lugares, mientras que el lecho rocoso está cubierto por una cobija irregular de *till* disuelto y morrenas dispersas. En consecuencia, el drenaje también es irregular e incluye varios lagos grandes, que

se desarrollaron sobre todo a partir del lecho rocoso, y numerosos lagos pequeños principalmente obstruidos por presas de *till*. Enumeramos la principal cadena de lagos desde Lago de las Morrenas 0 hasta Lago de las Morrenas 4 –en forma abreviada, Lago 1, Lago 2, etc.–, para preservar la designación del lago de mayor tamaño como Lago [Morrenas] 1 por Jones *et al.* (1993). Los lagos más pequeños que alimentan los de mayor tamaño han sido identificados con el número del lago hacia el cual drenan, más una letra (el Lago 0A drena hacia el Lago 0, el Lago 2A drena hacia el Lago 2, etc.). Véase la Fig. 1.

LAGO DE LAS MORRENAS 0

El Lago de las Morrenas 0 se encuentra en la parte más alta del Valle de las Morrenas y bien puede describirse con un *cirque* compuesto. Dentro de éste, el *subcirque* mejor desarrollado se encuentra sobre el lado oriental de la cabeza del valle, donde se localiza profundamente minada dentro de una zona de contacto entre el batolito intrusivo y las rocas piroclásticas expuestas sobre la pared oriental (Calvo 1987). Morrenas 0 ocupa la cuenca detrás de una parte prominente del lecho rocoso sobre la base de este *subcirque*. No se tuvo la oportunidad de investigar si estaba cubierta por *till* o por el pico del lecho rocoso. El lago mismo es superficial y parece ser un sitio popular entre las dantas para bañarse; estos animales se alimentan de la planta *Isoetes* que crece allí en aguas poco profundas. Se pudieron observar varios trillos de dantas, tanto cerca de la orilla como, ocasionalmente, dentro del agua más profunda.

Cuando se muestreó el lago en febrero de 1998, se estimó una profundidad máxima de <2 m; aunque se observaron marcas de agua aproximadamente unos 30 cm por encima del nivel del agua sobre las rocas de la orilla. La profundidad del lago resultó mayor que la que el aparato Secchi permite medir. La temperatura del agua a las 12:30 horas del 25 de febrero de 1998 fue de 18,5° C. Nuestros datos químicos de febrero de 1998 y marzo de 2001 son muy similares entre ellos, excepto para Mg⁺⁺, que resultó mucho mayor en 2001.

LAGO DE LAS MORRENAS 1

El Lago de las Morrenas 1 fue descrito por Hastenrath (1973) como un lago rodeado por una morrena en forma de herradura de unos 20 m de alto. El lecho rocoso estuvo ocasionalmente expuesto a través de una cubierta de *till* y así a lo largo de la orilla del lago de una manera casi continua, lo cual sugiere un grado mucho más fuerte de control del lecho rocoso. El lago mismo se ha desarrollado dentro del lecho rocoso, aunque una capa de escombros sueltos (con un grosor de ca. 1 m) a la salida controla el nivel de agua. Las crestas de dos morrenas recesivas son evidentes cuenca abajo de Morrenas 1, cerca de la cima de la parte prominente que lo encierra, de acuerdo con Hastenrath.

Löffler (1972) registró una profundidad máxima de 6,6 m, pero nosotros pudimos registrar 8,3 m cerca de la orilla oriental, en enero de 1989 (perfiles batimétricos en Horn 1993). Löffler (1972) también escribió que el lago era transparente hasta su piso. Por nuestro lado, pudimos corroborar este hecho en enero de 1989, cuando lo observamos mientras hacíamos un sondeo de los sedimentos bajo el lago a unos 7,5 m de profundidad, y después en febrero de 1998 cuando nuestro disco de Secchi fue visible sobre el piso en el sitio del muestreo limnológico a 6,2 m de profundidad en el agua.

De acuerdo con las observaciones de agosto de 1986 de Jones *et al.* (1993), se pudo ver que el lago no tenía una estratificación en febrero de 1998 (Fig. 2). El 23 de febrero de 1998 a las 13:58 horas, se midió una temperatura de agua de la superficie de unos 15,3° C, mientras que el 22 de marzo a las 16:15 horas, se registró una temperatura de agua de la superficie de unos 15,4° C. Estos valores recientes son unos 4° C mayores que los registrados por Löffler (1972) y Jones *et al.* (1993). Los valores más altos de Ca⁺⁺ y Si se observaron en la muestra de marzo de 2001, pero otros iones tenían mayores concentraciones a mediados de la época lluviosa de 1991, lo cual es consistente con el patrón que se manifiesta en el lago Chirripó.

LAGO DE LAS MORRENAS 2

El lago de las Morrenas 2 está separado del lago de las Morrenas 1 por una quebrada ancha, poco profunda y cubierta por rocas angulares. Este lago se cartografió con poca precisión sobre la hoja topográfica de Dúrika (escala 1:50.000), como si fuera un canal ancho (como si los lagos de las Morrenas 1 y 2 fueran ramas de un solo lago, lo que no es el caso). El flujo estaba seco durante el período de nuestro trabajo de campo en febrero de 1998, pero sí estaba fluyendo en marzo de 2000 y marzo de 2001. El lago de las Morrenas 2 ocupa una cuenca ancha, que se formó dentro del lecho rocoso, por encima de un pico modesto. Al menos una morrena pequeña cruza una porción del lago, cerca de la entrada principal. Igual que en el lago de las Morrenas 1, una capa de escombros de 1 m de profundidad define la altura que tiene hoy en día la ruta de derramamiento (*spillway*). El lago de las Morrenas 2 es menos profundo por su tamaño: se registró una profundidad máxima de sólo 1,3 m.

El lago de las Morrenas 2 presenta un registro de temperaturas similar al del lago de las Morrenas 1: unos 11° C en agosto de 1986 (Jones *et al.* 1993), pero 18,9° C el 25 de febrero de 1998 a las 14:41 horas, y unos 15,8° C el 22 de marzo de 2000 a las 15:45 horas. La temperatura del agua en el Lago de las Morrenas 2 fue la mayor de todas las medidas en el valle en 1998, probablemente porque tenía poca profundidad, lo cual implicó una mayor absorción de energía originaria de la luz solar en comparación con el tamaño del volumen del lago. En marzo de 2000, el lago de las Morrenas 2 resultó ser el segundo más caliente de todos los lagos investigados. El lago de las Morrenas 3A (ver más adelante) –que no fue muestreado por nosotros en 1998– fue el más caliente. La composición química fue en general similar para los años 1998, 2000 y 2001.

LAGO DE LAS MORRENAS 3

El lago de las Morrenas 3 y su orilla han sido mucho más definidos por las morrenas que los lagos situados a mayor elevación. Una morrena forma una presa, mientras que las otras tres se encuentran parcialmente sumergidas y forman puntos en pares. Sin embargo, la mitad del flujo, a menor elevación, que conecta los lagos de las Morrenas 2 y 3 fluye directamente sobre el lecho rocoso, el cual demuestra poca incisión. La grada mayor del lecho rocoso en este valle se encuentra inmediatamente cuenca abajo a partir de los lagos 3 y 4; ha sido cubierta por una gran morrena terminal, de tal forma que la elevación de la grada mayor del lecho rocoso es indeterminada. Sin embargo, puede ser que sí se encuentre bastante por encima del nivel del agua, por lo menos en parte, si uno se basa en la morfología de los alrededores. Si éste fuera el caso, la cuenca –o las cuencas– del lecho rocoso de ambos lagos puede ser relativamente profunda, como sugiere la profundidad del agua del lago de las Morrenas 3.

El lago de las Morrenas 3 tiene aproximadamente la misma profundidad del lago de las Morrenas 1 (8,1 m) y muestra una temperatura y un perfil de oxígeno similares a los de febrero de 1998 (Fig. 2). El lago era más caliente en marzo de 2000. Los resultados químicos de 1998, 2000 y 2001 son consistentes entre sí y con los datos de los otros lagos, excepto para los niveles muy reducidos de Mg^{++} en 2001.

LAGO DE LAS MORRENAS 4

El lago de las Morrenas 4 ha sido cubierto por una morrena terminal, que forma la orilla norte del lago de las Morrenas 3. No se nota un lecho rocoso a lo largo del flujo que conecta ambos lagos, pero esta sección del valle contiene algunas rocas angulares muy grandes y zonas expuestas que pueden ser partes de lechos rocosos o bien rocas angulares enterradas. A lo largo de la salida del lago de las Morrenas 4 no se ve un lecho rocoso, sino hasta la zona donde una catarata de unos 8 m de alto entra al cañón, que el flujo ha grabado dentro de la grada del lecho rocoso (descrito anteriormente).

En la tarde (a las 17:28 horas) del 25 de febrero de 1998, el perfil de temperatura mostró valores que eran los segundos más altos para aquel día y para el valle. Esto podría ser el resultado de la poca profundidad del lago (máximo de 3 m). El análisis químico en febrero de 1998, marzo de 2000 y marzo de 2001 presentó resultados muy similares.

LAGO DE LAS MORRENAS 2A

El lago de las Morrenas 2A es un pozo pequeño situado alrededor de 60 m por encima del lago de las Morrenas 2. Ha sido cubierto por una morrena recesiva en una cuenca pequeña, determinada por un afloramiento de roca resistente. El lago tiene menos de 1 m de profundidad y contiene agua transparente hasta su piso. El 26 de febrero de 1998 a las 08:59 horas, la temperatura del agua superficial fue de 12.6° C y la

temperatura del aire de 14.8° C. La química del agua se asemejó a una versión diluida del lago de las Morrenas 2.

LAGO DE LAS MORRENAS 3A

El lago de las Morrenas 3A se destaca unos 20 m por encima del lago de las Morrenas 3, en un lecho rocoso granodiorítico detrás de una morrena lateral de un tamaño moderado sobre la base de la Loma Encerrada. Como muchos otros aspectos en el valle, esta morrena lateral sigue la línea de los elementos prominentes del lecho rocoso, pero no parece que el lago mismo se encuentre encima de *till* o prensado por éste. El lago es poco profundo, de 30 a 35 cm en marzo de 2001, pero quizás alcanza 1 m con el desbordamiento (*overflow*), y tiene un piso de material suave con algunas rocas angulares emergentes dispersas cerca de las orillas. El 22 de marzo de 2000 a las 14:37 horas, se midió una temperatura superficial del agua de unos 18,5° C, que resultó ser la temperatura más alta en el valle. A las 11:46 horas del 18 de marzo de 2001, la temperatura superficial del agua era de unos 15,3° C. La muestra de marzo de 2001 tenía concentraciones más altas de algunos elementos químicos, notablemente Ca⁺⁺ y Na⁺, lo cual sugiere razones atípicamente bajas de P:E durante el año que transcurrió entre ambas mediciones.

LAGO DE LAS MORRENAS 3B, 3C Y 3D

El lago de las Morrenas 3C y otros dos lagos (Morrenas 3B y 3D, Fig. 1) se encuentran en un área de *till* muy quebrado, que, junto con algunos pozos diminutos que semejan pequeñas calderas, sugieren una topografía causada por hielo que se encontraba estancado. Sólo el Lago de las Morrenas 3C contenía agua durante el período de febrero a marzo de 1998 y se había reducido hasta una fracción de su tamaño normal. Una muestra de agua recolectada en marzo de 2000 (cuando el nivel del agua era otra vez alto) reveló una química similar a la de los otros lagos del valle.

LAGUNA DEL REFUGIO

El Laguna del Refugio es uno de varios pozos pequeños ubicados cuenca abajo desde la cadena de lagos grandes, pero fuera del drenaje principal. Aunque no se ha cartografiado en la hoja topográfica de Matama (escala 1:50.000), se encuentra unos 25 m al nor-noroeste del antiguo refugio (abandonado en la década de 1980) que está justo detrás de la gran grada del lecho rocoso y la morrena terminal, por debajo de los lagos de las Morrenas 3 y 4. El 24 de febrero de 1998 a las 17:50 horas, la temperatura del agua sobre la orilla del pozo fue de 14,8° C. Probablemente, el pozo tiene una profundidad menor de 1 m. Los niveles elevados de Ca⁺⁺, Na⁺ y quizás también de Mg⁺⁺ reflejar quizás un impacto humano, ya que este pozo fue utilizado por los visitantes para lavar platos, cuando el refugio todavía estaba en uso.

Los lagos en el Valle del río Ditkebi

LAGO DITKEBI

El lago Ditkebi se cartografió accidentalmente con una curva de nivel que, en la hoja topográfica de Dúrika (escala 1:50.000), parece una prominencia de 3.500 m. El mapeo geológico de Calvo (1987) del macizo del Chirripó termina justamente al norte de la orilla norte del Lago Ditkebi, pero una extrapolación indica que este lago se encuentra principalmente encima de rocas piroclásticas, y por eso es distinto de los lagos del Valle de los lagos y del Valle de las Morrenas. Dos tipos adicionales de roca (areniscas marinas, volcánicas y lavas basálticas) componen el Pico Sureste, parte del cual también se encuentra en la cuenca del lago Ditkebi. El lago Ditkebi drena hacia abajo, al este, dentro del desfiladero profundo de un lecho rocoso. Un delta arenoso compuesto, depositado por el drenaje por encima de la superficie, hacia abajo, al lado norte del Pico Sureste, forma la orilla sureste del lago.

Löffler (1972) midió una profundidad máxima de 7 m, lo cual es menor que la profundidad del disco de Secchi. Löffler registró una temperatura del agua de 10,3° C, el 30 de agosto de 1966 a las 07:45 horas. Nosotros no tuvimos la oportunidad de medir la temperatura del agua, pero sí recolectamos, para el análisis químico, muestras de agua, los días 2 de marzo de 1998 y 24 de marzo de 2001. Nuestros datos químicos (Cuadro 2) –los primeros para este lago– son típicos de los lagos del macizo del Chirripó; quizás el aspecto más notable es la concentración un poco elevada de Mg^{++} . Esto puede reflejar la presencia de un lecho rocoso diferente en la cuenca del lago Ditkebi.

Conclusiones

Nuestros resultados limnológicos son consistentes con los datos de estudios del pasado en todos los aspectos, excepto en los datos de temperatura y niveles de agua. Los niveles de agua en el periodo de febrero a marzo de 1998 mostraron fuertemente la influencia de las condiciones producidas por El Niño, lo cual a elevaciones mayores de 3.500 m favoreció un aire medio-troposférico seco y redujo el *influx* del aire húmedo de la capa atmosférica del borde, por medio de la convección y perturbaciones tropicales. El resultado fue una reducción en humedad, cobertura nubosa, cobertura de neblina y precipitación. Los niveles de agua se redujeron debido al menor ingreso de agua y a la elevada evaporación.

Durante el periodo de febrero a marzo de 1998, pudimos medir temperaturas de la superficie del agua de los lagos que fueron significativamente mayores que las medidas por Löffler (1972) en agosto de 1966, Göcke *et al.* (1981) en marzo de 1979 y Jones *et al.* (1993) en agosto de 1986. En nuestro trabajo anterior (Horn *et al.* 1999), atribuimos estas elevadas temperaturas del agua a los efectos del fuerte fenómeno

del El Niño (condiciones positivas de ENSO), pero eso no puede explicar las altas temperaturas de 2000, que permanecieron altas bajo condiciones fuertemente negativas de ENSO (*El Niño Southern Oscillation*-El Niño Oscilación del Sur). Los registros de ENSO (ver Woodruff *et al.* 1998, Woodruff 2001) indican que las observaciones de temperaturas más frías del agua de los lagos en el pasado (Löffler 1972, Göcke *et al.* 1981, Jones *et al.* 1993) se hicieron bajo condiciones de ENSO, neutrales a positivas. Entonces, algún otro factor diferente de El Niño debe haber sido responsable de las temperaturas más altas en 2000.

La temperatura del agua de estos lagos claros de alta elevación es controlada parcialmente por la temperatura del aire, pero también por la nubosidad durante el día (que bloquea la insolación) y la nubosidad de la noche (que bloquea el enfriamiento por la re-radiación). Nuestros datos de temperatura del agua indicarían que uno o más aspectos del clima de Chirripó pueden estar cambiando, de acuerdo con los cambios globales o locales (Pounds *et al.* 1999, Lawton *et al.* 2001).

En un contexto global, la química y la claridad de estos lagos de Chirripó son comparables con las de los lagos de alta elevación de todo el mundo. Sin embargo, como señalaron Hutchinson y Löffler (1956), el régimen mixto de estos lagos tropicales alpinos varía marcadamente del régimen de los lagos de las tierras altas de la zona templada. Aparte de los cambios de largo plazo discutidos anteriormente, la variación más grande de la temperatura del agua sobre el Cerro Chirripó es diurna más que estacional (pero también las temperaturas diurnas de los lagos varían probablemente, aunque en menos de 1° C; Löffler 1972, Göcke *et al.* 1981), de manera que las capas de agua de cualquier lago tropical de alta elevación tienden a mezclarse completamente en un solo día.

La estratificación es rara y débil y probablemente no persiste por más de un día. Muchas veces, los lagos templados de alta elevación se congelan y se estratifican en el invierno. Además, el patrón de sedimentación varía entre los lagos de alta elevación de las zonas tropicales y las zonas templadas. En el trópico, el agua originada en el proceso de descongelación y en ciertos flujos de fuentes, no contiene material arcilloso, de tal manera que los sedimentos del Cerro Chirripó contienen más material orgánico y no son laminados.

en el trópico, no hay agua que origina a partir de la descongelación y de ciertos flujos de fuentes, que conllevan material arcillosa, de tal modo que los sedimentos del Cerro Chirripó contienen más material orgánico y no son laminadas.

Contando con mediciones repetidas de la química del agua para la mitad de los lagos descritos en este capítulo, se destacan un par de patrones. Primero, las muestras tomadas en la época lluviosa parecen tener mayores concentraciones de algunos iones, quizás porque la precipitación temprana en la época lluviosa causa un flujo de agua subterránea que contiene mayores soluciones, originarias de grietas rocosas y del suelo. Un estudio del tiempo de retención del agua en los lagos puede darnos información clave, para poder interpretar las variaciones estacionales en la química del agua. Cambios seculares en la química del agua de los lagos, asociados a cambios en el clima, también pueden ser visibles. En ambos casos, sin embargo, se necesitarán

más datos para poder establecer las tendencias estacionales y de largo plazo con respecto a la química del agua, en estos lagos de alta elevación. La sensibilidad de los ambientes de alta montaña, bajo la influencia del cambio global (Messerli 2001), hace que los lagos del Chirripó sean sitios importantes para el monitoreo continuo.

Agradecimientos

Nuestra investigación limnológica en el páramo del Chirripó fue financiada por las siguientes instituciones: National Geographic Society, Fundación A.W. Mellon, Association of American Geographers, Professional Development Award Program y Fundación Stewart F. McCroskey de la University of Tennessee. Agradecemos a Brandon League, Charles Lafon, Carol Harden, Jake Cseke y Tom Orvis por la asistencia en el campo; a Sergio Chávez y Maureen Sánchez por el apoyo logístico; y a Carol Harden, Cynthia Stiles y Luis Diego Gómez por las fructíferas discusiones que sostuvimos. Estamos muy agradecidos con el Ministerio del Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE) y su Área de Conservación La Amistad-Pacífico (ACLA-P), por permitirnos llevar a cabo esta investigación en el Parque Nacional Chirripó.

Referencias

- Barquero, J. & L. Ellenberg, L. 1982-83. Geomorphologia del piso alpino del Chirripó en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* 17-18: 293-299.
- Bergoeing, J.P. 1977. Modelado glacier en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Informe Semestral Julio-Diciembre*: 33-44.
- Calvo V., G. 1987. Geología del Macizo de Chirripó, Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Campaña Geológica G-5216, Informe Final. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. San José. 37 pp.
- Drummond, M.S., M. Bordelon, J.Z. De Boer, M.J. Defant, H. Bellon & M.D. Feigenson. 1995. Igneous petrogenesis and tectonic setting of plutonic and volcanic rocks of the Cordillera de Talamanca, Costa Rica-Panama, Central American arc. *American Journal of Science* 295: 875-919.
- Göcke, K., E. Lahmann, G. Rojas & J. Romero. 1981. Morphometric and basic limnological data of Laguna Grande de Chirripó, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 29(1): 165-174.
- Haberyan, K.A., G. Umaña, C. Collado & S.P. Horn. 1995. Observations on the plankton of some Costa Rican Lakes. *Hydrobiologia* 312: 75-85.
- Haberyan, K.A., S.P. Horn, & B.F. Cumming. 1997. Diatom assemblages from Costa Rican lakes: an initial ecological assessment. *Journal of Paleolimnology* 17(3): 263-274.
- Hastenrath, S. 1973. On the Pleistocene glaciation of the Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 9(1-2): 105-121.
- Horn, S.P. 1989. Postfire vegetation dynamics in the Costa Rican páramos. *Madroño* 36(2): 93-114.
- Horn, S.P. 1993. Postglacial vegetation and fire history of the Chirripó páramo of Costa Rica. *Quaternary Research* 40: 107-116.
- Horn, S.P. & K.A. Haberyan. 1993. Physical and chemical properties of Costa Rican lakes. *National Geographic Research and Exploration* 9(1): 86-103.

- Horn, S.P., K.H. Orvis & K.A. Haberyan. 1999. Investigación limnológica y geomorfológica de lagos glaciares del Parque Nacional Chirripó, Costa Rica. *Revista Informe Semestral* (Instituto Geográfico Nacional, Costa Rica) 35: 95-106.
- Hutchinson, G.E. & H. Löffler. 1956. The thermal classification of lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 42: 84-86.
- Jones, J.R., K. Lohman & G. Umaña V. 1993. Water chemistry and trophic state of eight lakes in Costa Rica. *Verhandlungen, Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 25: 899-905.
- Kohkemper M., M. 1968. Historia de las Ascensiones al Macizo de Chirripó. Instituto Geográfico Nacional. San José. 120 pp.
- Kohkemper M., M. 1983. Nueve expediciones a la Cordillera de Talamanca. Informe- Semestral (Instituto Geográfico Nacional, Costa Rica) supplement to volume 29: 1-33.
- Lawton, R.O., U.S. Nair, R.A. Pielke, Sr. & R.M. Welch. 2001. Climatic impact of tropical lowland deforestation on nearby montane cloud forests. *Science* 294: 584-587.
- Lachniet, M.S. & G.O. Seltzer. 2002. Late Quaternary glaciation of Costa Rica. *Geological Society of America Bulletin* 114(5): 547-114.
- Löffler, H., 1972. Contribution to the limnology of high mountain lakes in Central America. *International Revue der Gesamten Hydrobiologie* 57(3): 397-408.
- Messerli, B. 2001. Editorial: The International Year of Mountains (IYM), the Mountane Research Initiative (MRI) and PAGES. PAGES (Past Global Changes) News 9(3): 2.
- Mosheim, J.C. 1984. Grupo comagmatico (intrusivo) de Talamanca. Pp. 53-54. *In: Sprechmann, P. (ed.). Manual de Geología de Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. San José.*
- Orvis, K.H. & S.P. Horn. 2000. Quaternary glaciers and climate on Cerro Chirripó, Costa Rica. *Quaternary Research* 54: 24-37.
- Pounds, J.A., M.P.L. Fogden & J.H. Campbell. 1999. Biological response to climate change on a tropical moutain. *Nature* 398: 611-615.
- Rodgers III, J.C. & S.P. Horn. 1996. Modern pollen spectra from Costa Rica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 124(1-2): 53-71.
- Shimizu, C. 1992. Glacial landforms around Cerro Chirripó in Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Journal of Geography (Japan)* 101(7): 615-621.
- Umaña, G., K.A. Haberyan & S.P. Horn. 1999. Limnology in Costa Rica. Pp. 33-62. *In: Wetzel, R.G. & B. Gopal (eds.). Limnology in Developing Countries, Vol. 2. International Scientific Publications. New Delhi.*
- Weber, H. 1959. Los Páramos Costarricense y su Concatenación Fitogeográfica con los Andes Suramericanos. Instituto Geográfico Nacional. San José. 67 pp.
- Weyl, R. 1956a. Spuren eszeitlicher vergletscherung in der Cordillera de Talamanca Costa Ricas (Mittelamerika). *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie* 102: 283-294.
- Weyl, R. 1956b. Eiszeitliche gletscherspuren in Costa Rica (Mittelamerika). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 3: 317-325.
- Woodruff, S.D. 2001. COADS updates including newly digitized data and the blend with the UK Meteorological Office marine data bank and quality control in recent COADS updates. Pp. 9-13, 49-53. *In: Proceedings of Workshop on Preparation, Processing and Use of Historical Marine Meteorological Data, Tokio, 28-29 November 2000. Japan Meteorological Agency and the Ship & Ocean Foundation. Tokio.*
- Woodruff, S.D., H.F. Diaz, J.D. Elms & S.J. Worley. 1998. COADS Release 2 data and metadata enhancements for improvements of marine surface flux fields. *Physics and Chemistry of the Earth* 23: 517-527.
- Wujek, D.E., R.E. Clancy, Jr. & S.P. Horn. 1998. Silica-scaled Chrysophyceae and Synurophyceae from Costa Rica. *Brenesia* 49-50: 11-19.
- Zeeb, B.A., J.P. Smol & S.P. Horn. 1996. Chrysophycean stomatocysts from Costa Rican tropical lake sediments. *Nova Hedwigia* 63(3-4): 279-299.