



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

**BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO Y CONDICIONES REGIONALES DE
 NIEVE EN EL NORTE CHICO: INTERACCIÓN CON EL CLIMA Y SU
 INFLUENCIA EN EL DESHIELO**

INFORME N°CEAZA.CZL.2010.02

27 de septiembre 2010

Autores:

Dr. Christophe Kinnard

Dr. Simon Gascoin, Dra. Shelley MacDonell

- Laboratorio de Glaciología -

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas



Balance de masa Glaciológico y Condiciones regionales de nieve en el Norte Chico: Interacción con el clima y su influencia en el deshielo

-Resumen ejecutivo-

Entre julio de 2009 y julio de 2010, se realizaron estudios y actividades de monitoreo del Glaciar Tapado, un glaciar de 1,4 km² ubicado en la alta cordillera de la región Norte Chico de Chile. Este glaciar está considerado como representativo de las condiciones climáticas semiáridas de la zona y el objetivo fue de desarrollar un sitio de monitoreo glaciológico y mejorar nuestro conocimiento de las interacciones entre el clima y los glaciares de esta región.

En varias salidas en terreno se instalaron tres estaciones meteorológicas sobre y fuera del glaciar, sensores de flujo de agua, una estación fotogramétrica automática, y se realizaron mediciones puntuales de la ablación sobre el glaciar durante el verano de 2009-10. Dos estaciones meteorológicas (una en el pie del glaciar, la otra en la cumbre) funcionaron entre noviembre de 2009 y abril de 2010, registrando a cada hora variables como la temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, la altura de nieve y los diferentes componentes de radiación. La tercera estación en la morrena del glaciar sigue funcionando y servirá para monitorear las condiciones meteorológicas en la cuenca del glaciar. Estos datos permitieron calcular el *balance de energía* del glaciar, lo cual es la suma de todos los flujos de calor hacia y desde la superficie del glaciar. Esto permite modelar la *ablación* (pérdida de masa en agua) y entender cuáles son los factores climáticos que controlan la pérdida de masa en el glaciar.

Los resultados muestran que la radiación solar es la fuente de energía dominante, y que el *albedo* de la superficie (fracción de la radiación reflejada) controla la cantidad de radiación neta absorbida por la superficie. El albedo depende de la cantidad y frecuencia de nieve que cae sobre el glaciar la cual aísla el glaciar de la radiación solar, de la topografía de la superficie (por ejemplo la presencia de penitentes tiende a bajar el albedo de superficie), y la presencia de polvo y detritos sobre la superficie. Existe un contraste en las condiciones meteorológicas entre el pie y la cumbre del glaciar, con una temperatura promedio de -0.8°C en el primero, y -6°C entre el último. Así durante el verano de 2009-10 solo ocasionalmente subió la temperatura sobre 0°C en la cumbre mientras que hubo varios días sobre 0°C en el pie del glaciar. En el pie del glaciar se midieron tasas de ablación entre -2.6 m.a.e ('metros en agua equivalente') y -4.4 m.a.e. Las tasas de ablación varían debido a la presencia de penitentes de grande tamaño (1-2 metros). En la cumbre se mido tasas



de ablación de entre -0.5 y -1.0 m.a.e. Esto refleja los diferentes procesos de ablación: en la cumbre se calculó que 58% de la ablación se perdió por sublimación (*conversión del hielo a vapor*), y 42% por fusión (*conversión del hielo a agua líquida*), mientras que en el pie del glaciar solo 6% se perdió por sublimación, y 93% por fusión. Así que la mayoría de la producción de agua de deshielo proviene ahora de la parte inferior del glaciar. Esto concuerda con un análisis de imágenes satelitales recientes y fotos aéreas antiguas, las que muestran un retroceso del frente del glaciar de 500 m en los últimos 50 años. En comparación, la comparación de modelos digitales (MDT) de elevación entre 1955 y 2000 sugiere que hubo pocos cambios en la zona de la cumbre. Combinando los datos disponibles, se calculó para el año 2009-10 un balance de masa distribuido de -0.83 m.a.e (-1.35 m de ablación y 0.52 m.a.e de acumulación) y se estimó que se produjeron unos 1, 000,000 m³ de agua de deshielo, lo que corresponde a 2.8 - 4.5 % del volumen del embalse La Laguna entre enero y abril de 2010. Se realizó una proyección del balance de energía/masa bajo escenarios de cambios climáticos: en todos los escenarios la ablación por fusión aumenta más fuertemente en la cumbre que en el pie del glaciar. Bajo estos escenarios, el glaciar Tapado entero tendría un balance de masa negativo, lo que significa su desaparición progresiva.



Contenidos

1.	Introducción	7
1.1	Objetivo general del proyecto	7
1.2	Objetivos específicos del proyecto	7
2.	Descripción del sitio.....	8
3.	Resumen del trabajo en terreno	10
	Rutas de nieve	10
	Glaciar Tapado	10
4.	Resultados	13
4.1	Condiciones meteorológicas	13
4.1.1	Detalles de las estaciones meteorológicas.....	13
4.1.2	Análisis de datos meteorológicos	17
4.1.3	Temperatura y fusión	19
4.1.4	Precipitaciones.....	20
4.1.5	Albedo.....	21
4.1.6	Viento	22
4.1.7	Ciclos diurnos	23
4.2	Balance de masa medida	25
4.2.1	Ablación	25
4.2.2	Acumulación de nieve	26
4.3	Hidrología.....	28
4.3.1	Detalles de las estaciones fluviométrica	28
4.3.2	Balance hídrico aproximativo	29
4.4	Sensores remotos.....	32
4.4.1	Detalles de la cámara automática	32
4.4.2	Selección de imágenes satelitales y análisis de DEM.....	34
4.5	Balance de energía	35
4.5.1	El modelo.....	36
4.5.2	Resultados de la modelación	37
4.5.3	Efecto del cambio climático futuro	41
5.	Conclusiones	44
	Referencias.....	45
	Lista de participantes al proyecto.....	46



Lista de figuras

Figura 1. (A) Mapa de ubicación del glaciar Tapado (imagen ASTER 2003); (B) vista del glaciar Tapado desde el Este (noviembre de 2009).	9
Figura 2. (A) SMD y JLC midiendo el caudal del río que emerge del glaciar cubierto; (B) CK midiendo el tamaño de los penitentes en el glaciar Tapado (plateau); (C) RG subiendo hacia La Cumbre para instalar la estación meteorológica; (D) RG, JA y RP instalando la estación de la Cumbre; (E) RP midiendo un punto de control con DGPS; (F) Vista del campamento en noviembre de 2009;	11
Figura 2. (Continuado) (G) RG midiendo una balza de ablación; (H) construcción de la estación fluviométrica en abril de 2010; (I) trasladando material hacia el lado este del glaciar Tapado; (J) RG descargando datos de la estación del plateau.	12
Figure 3. foto área del glaciar Tapado (vuelo Hycon 1956) con límites del glaciar, glaciar cubierto y glaciar rocoso, y con ubicación de los varios estaciones instaladas al fin de noviembre 2009 por el CEAZA	15
Figure 4. Vistas de las estaciones meteorológicas del glaciar Tapado después de su instalación: (A) estación AWS1, cerca de la cumbre del glaciar Tapado; (B) estación AWS2, pie del glaciar Tapado; (C) estación AWS3, sobre la morrena del glaciar Tapado.	16
Figura 5. (A) Estación 2 (plateau) el 20 de abril de 2010. La estación se dobló el 23 de marzo después de vientos fuertes, y cayó el 15 de abril. (B) estación 3 (Cumbre) el 23 de abril de 2010. Una de las estacas que soporte los sensores se rompió el 18 de enero de 2010, lo que hizo girar la estación.	17
Figure 6. Datos meteorológicos horarios a las estaciones aws1 (azul), aws2 (rojo) y aws3 (verde), glaciar Tapado. Aws1 = Cumbre; aws2 = plateau; aws3 = morrena.	18
Figura 7. Promedios mensuales de (a) temperatura de aire; (b) humedad relativa; (c) velocidad de viento; (d) radiación solar incidente	19
Figura 8. Temperatura de aire a las 3 estaciones (A) promedio por día; (B) máximo por día.	20
Figura 9. Porción del cielo cubierto por nubes (azul, %) y presencia/ausencia de nieve fresca en los alrededores del glaciar, visible desde la cámara automática.	21
Figura 10. Albedo promedio por día para aws1 (cumbre, azul), aws2 (plateau, rojo) y aws3 (morrena, verde). La subida abrupta de la aws2 en abril ocurrió por la flexión del mástil de la estación, y los valores no son confiables.	22
Figure 11. Dirección y fuerza del viento a las estaciones aws1, aws2 y aws3, glaciar Tapado.	23
Figure 12. Ciclos diurnos promedio de las variables meteorológicas de las estaciones aws1 (cumbre, azul), aws2 (plateau, rojo), aws3 (morrena, verde).	24
Figura 13. Ablación medida en varios puntos en el glaciar Tapado durante el verano de 2009-2010. Los puntos y valores refieren a la tabla 5.	26
Figura 14. Curva de hipsometría (distribución de aéreas con altura) y gradiente de balance de masa neta asumido.	28
Figure 15. Mediciones de caudal VS altura de agua en el río saliendo de la morrena del glaciar Tapado.	30
Figure 16. Temperatura del aire a AWS3 (rojo) y altura de agua en el río saliendo de la morrena (azul).	30
Figure 17. Variaciones diarias de altura de agua en el río (azul) y en la laguna (rojo)	31
Figure 18. Laguna sobre la morrena del glaciar Tapado (a) 23 de noviembre 2009 (b) el 8 de febrero, la laguna se ve vacía.	31
Figure 19. Vistas de la cámara automática	32



Figure 20. Fotos del glaciar Tapado sacados por la cámara automática (a) 27 de noviembre 2009; (b) 19 de febrero 2010.....	33
Figura 21. Sustracción entre (a) el MDT ASTER (2009) y el MDT IGM (1955); (b) el MDT SRTM (2000) y el MDT IGM (1955).	35
Figura 22. Ablación medida por el sensor SR50 (azul) y modelada (rojo). Nota que la subida en la aws1 ocurrió por el giro de la estación.....	37
Figure 23. Flujos netos de energía promedio para estación 2 (Plateau) durante el período entre noviembre de 2009 y marzo 2010.....	39
Figura 24. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, en estación 2 (Plateau) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010.	39
Figura 25. Flujos netos de energía promedio para estación 1 (cumbre) durante el período entre noviembre de 2009 y marzo 2010.....	40
Figura 26. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, en estación 1 (cumbre) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010.	40
Figure 27. Proyecciones climáticas para el año 2080 sobre el glaciar Tapado, obtenidos por regionalización estadística de 16 modelos de circulación general (IPCC, 2007). (A) Cambios de temperatura del aire, (B) Cambios de precipitaciones (en del promedio actual).....	42

Lista de tablas

Tabla 1. Localización y fechas de instalación de las estaciones meteorológicas.....	13
Tabla 2. Detalles de la estación AWS1 en la Cumbre.....	14
Tabla 3. Detalles de la estación AWS2 en el plateau	14
Tabla 4. Detalles de la estación AWS3 en la morrena	14
Tabla 5. Datos de medición de ablación sobre el glaciar Tapado	25
Tabla 6. Valores de acumulación de nieve medidas en noviembre de 2009.....	27
Tabla 7. Detalles de los MDTs utilizados en el estudio	34
Tabla 8. Promedio mensual de flujos de calor, calculados por medio del modelo de balance de energía para la estación 1(cumbre), entre noviembre de 2009 y marzo de 2010.....	37
Tabla 9. Promedio mensual de flujos de calor, calculados por medio del modelo de balance de energía para la estación 2 (plateau), entre noviembre de 2009 y marzo de 2010	38
Tabla 10. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, calculada por medio del modelo de balance de energía sobre la estación 1 (cumbre) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010	38
Tabla 11. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, calculada por medio del modelo de balance de energía sobre la estación 2 (plateau) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010	38
Tabla 12. Ablación actual (BAU) y predicha a la estación 2 (Plateau) bajo tres escenarios de cambio climático.	43
Tabla 13. Ablación actual (BAU) y predicha a la estación 1 (Cumbre) bajo tres escenarios de cambio climático.	43
Tabla 14. Ratio fusión/ablación asumiendo no recongelamiento y cambios en la producción de agua de deshielo bajo tres escenarios de cambio climático.	44



1. Introducción

En este informe se presentan los resultados de proyecto de investigación sobre el balance de masa glaciológico y condiciones regionales de nieve en el Norte Chico y sus interacciones con el clima, e influencia sobre el deshielo. Este informe completa el primer informe en el cual se entregó los primeros resultados de la investigación (informe CEAZA-CZL-2010-01, febrero de 2010), y así completa el proyecto de investigación.

1.1 Objetivo general del proyecto

El objetivo general del proyecto era:

'Implementar un programa completo de monitoreo de un glaciar de alta montaña en la región semiárida del Norte Chico, una región donde el conocimiento sobre la relación clima glaciar es escaso. Los resultados del programa de monitoreo integrado proveerán nueva información acerca de la influencia de los procesos climáticos sobre el comportamiento glaciar, en particular sobre la generación de agua de fusión y su influencia en las condiciones del caudal (descarga anual, caudal estacionario).'

1.2 Objetivos específicos del proyecto

Se enumera los objetivos específicos del proyecto que fueron presentados en la propuesta inicial:

- (1) *Desarrollar un nuevo plan de monitoreo integrado en el Glaciar Tapado, ubicado en la parte alta de la cuenca del Río Elqui (30°08' S, 69°55' W, altitud máxima 5500 m)*
- (2) Realizar mediciones de balance de masa (en invierno y verano) sobre el Glaciar Tapado.
- (3) *Monitorear las condiciones micro climáticas en las zonas de ablación y de acumulación del Glaciar Tapado, por medio del uso de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA)*
- (4) Calcular el balance de energía de superficie (BES) en los puntos de ubicación de las EMA, y sobre todo el glaciar, por medio del uso de técnicas de extrapolación *circunscritas por mediciones espaciales de albedo y temperatura,*
- (5) Aplicar y probar modelos existentes de BES al Glaciar Tapado



(6) Monitorear el caudal en las cercanías del exutorio glacial durante la temporada de deshielo, y examinar la relación entre clima, balance de masa glaciológico y *variabilidad de los caudales*.

(7) Examinar la contribución del deshielo hacia el Río La Laguna, aguas abajo del Glaciar Tapado, en donde las condiciones meteorológicas son monitoreadas continuamente por CEAZA y donde el caudal es monitoreado por DGA.

(8) Realizar mediciones anuales de las condiciones de nieve en cinco rutas de nieve del Norte Chico.

(9) Explorar la relación empírica entre clima regional, condiciones de nieve y variaciones de caudales en sitios de alta montaña.

2. Descripción del sitio

El glaciar Tapado se localiza en la parte alta del Valle del Elqui en la región IV de Chile (Figura 1). El clima de la región Norte Chico es semiárida, con pocas precipitaciones (promedio al embalse la Laguna de 161 mm por año, 1964-2005) que caen en forma de nieve durante los meses de mayo a septiembre (Favier et al, 2009). El clima en la cordillera también se caracteriza por condiciones usualmente *despejadas, lo que resulta en una radiación solar fuerte. En verano, ocasionalmente, masas de aires cruzan la cordillera desde el este, resultando en condiciones nubladas y precipitaciones ('invierno Boliviano o Altiplano')*.

El punto más bajo del área de ablación del glaciar se encuentra a 4,400 m, mientras que la zona de acumulación alcanza una altura máxima de 5,500 m. Por lo tanto, este *glaciar presenta un extenso gradiente altitudinal (1.000 m). La altura de la línea de equilibrio (límite entre la zona de acumulación y ablación del glaciar) fue previamente evaluada a los 5,300 m (Schotterer et al, 2003).*

Las cumbres más altas que rodean al cerro Tapado, tal como el cerro Olivares (30°17' S, 69° 54' W, 6252 m), actualmente no presentan cobertura de hielo, esto sugiere *que los glaciares presentes en el área, como el glaciar Tapado, resultan de condiciones climáticas locales (Kull et al, 2002).*



A

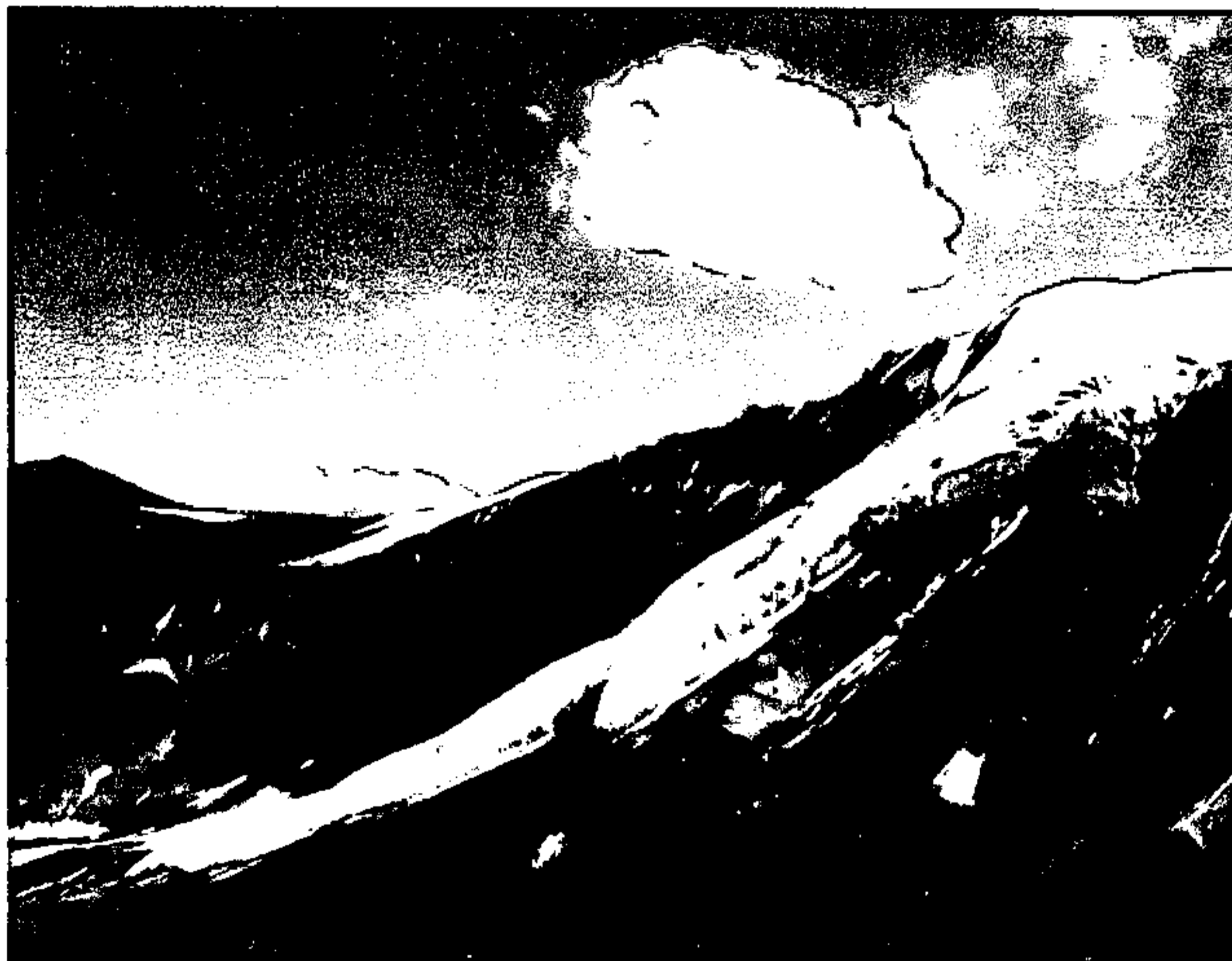
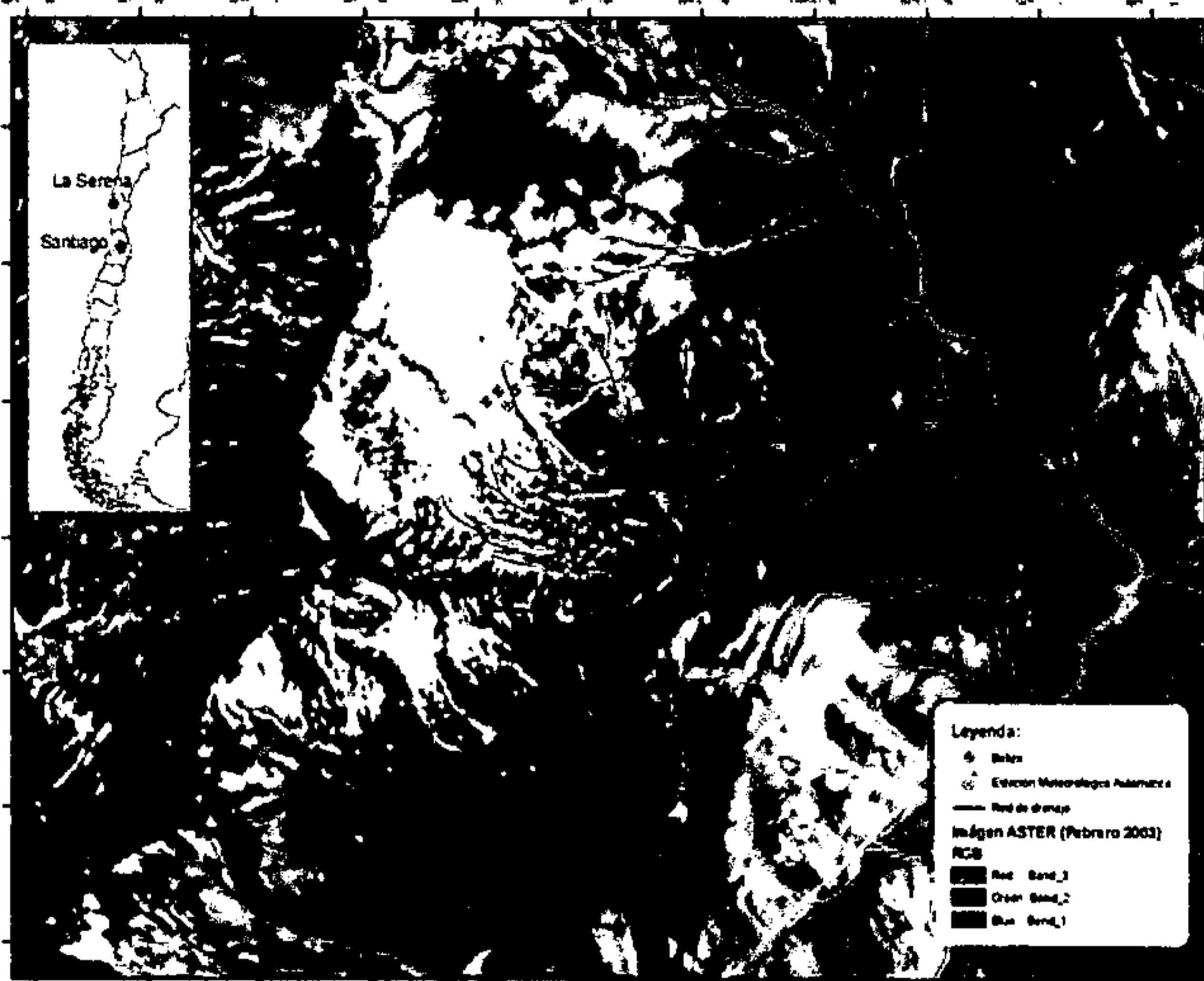


Figura 1. (A) Mapa de ubicación del glaciar Tapado (imagen ASTER 2003); **(B)** vista del glaciar Tapado desde el Este (noviembre de 2009).



3. Resumen del trabajo en terreno

Rutas de nieve

Como parte del proyecto se planificó de efectuar mediciones de cinco rutas de nieve en la región IV y V (Cerro Olivares, Quebrada Larga, Cerro Vega Negra, El Soldado y el Nacimiento del Sobrante), junto con el personal de la Dirección General de Agua (DGA). Debido a condiciones meteorológicas adversas no se pudo realizar las rutas de nieve por helicóptero, y el personal de la DGA realizó parte del trabajo por tierra.

Glaciar Tapado

En esta sección se presenta un resumen breve de las actividades realizadas en terreno durante el proyecto:

23-30 noviembre de 2009: Instalación de 3 estaciones meteorológicas en la cuenca del glaciar Tapado: (1) cumbre; (2) parte baja o 'plateau' y (3) pie del glaciar o 'morrena'. Instalación de una estación fotogramétrica a frente del glaciar. Instalación de 3 balizas de ablación. Mediciones de acumulación de nieve sobre el glaciar. Instalación de sensores de altura de agua en el río saliendo del glaciar y un otro dentro de una laguna sobre la morrena del glaciar.

7-10 enero de 2010: Mantenimiento y descarga de datos en las estaciones meteorológicas 2 (plateau) y 3 (morrena). Medición de caudal en el río. Medición de ablación en balizas.

19-21 enero de 2010: Mantenimiento y descarga de datos en las estaciones meteorológicas 2 (plateau) y 3 (morrena). Medición de caudal en el río. Medición de ablación en balizas.

8-12 febrero de 2010: Mantenimiento y descarga de datos en las estaciones meteorológicas 2 (plateau) y 3 (morrena). Medición de caudal en el río. Medición de ablación en balizas. Experimento de trazador (fluorecina) para medir tiempo de transito de agua en el glaciar cubierto.

19-24 abril de 2010: Descarga de datos de las 3 estaciones meteorológicas y de la estación fotogramétrica. La estación 3 (Cumbre) y 2 (plateau) fueron retiradas del



glaciar. La estación fotogramétrica fue re-ubicada al lado del glaciar para documentar la evolución de los penitentes y acumulación de nieve sobre el glaciar. Medición de las balizas de ablación. Instalación de una sección de río controlada para una estación fluviométrica. Medición de puntos de control con DGPS para georeferenciación de imágenes satelitales.

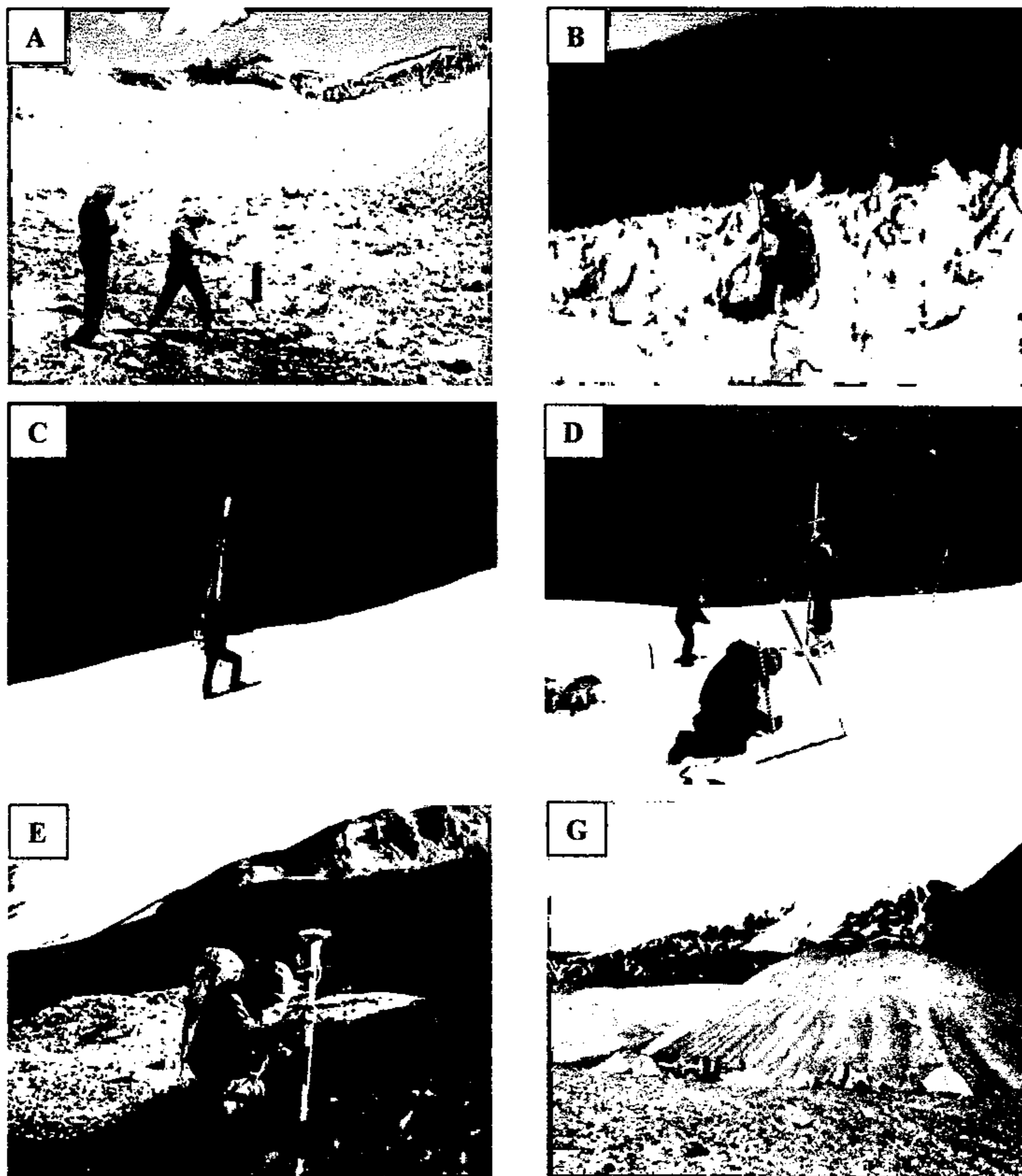


Figura 2. (A) SMD y JLC midiendo el caudal del río que emerge del glaciar cubierto; (B) CK midiendo el tamaño de los penitentes en el glaciar Tapado (plateau); (C) RG subiendo hacia La Cumbre para instalar la estación meteorológica; (D) RG, JA y RP instalando la estación de la Cumbre; (E) RP midiendo un punto de control con DGPS; (F) Vista del campamento en noviembre de 2009;



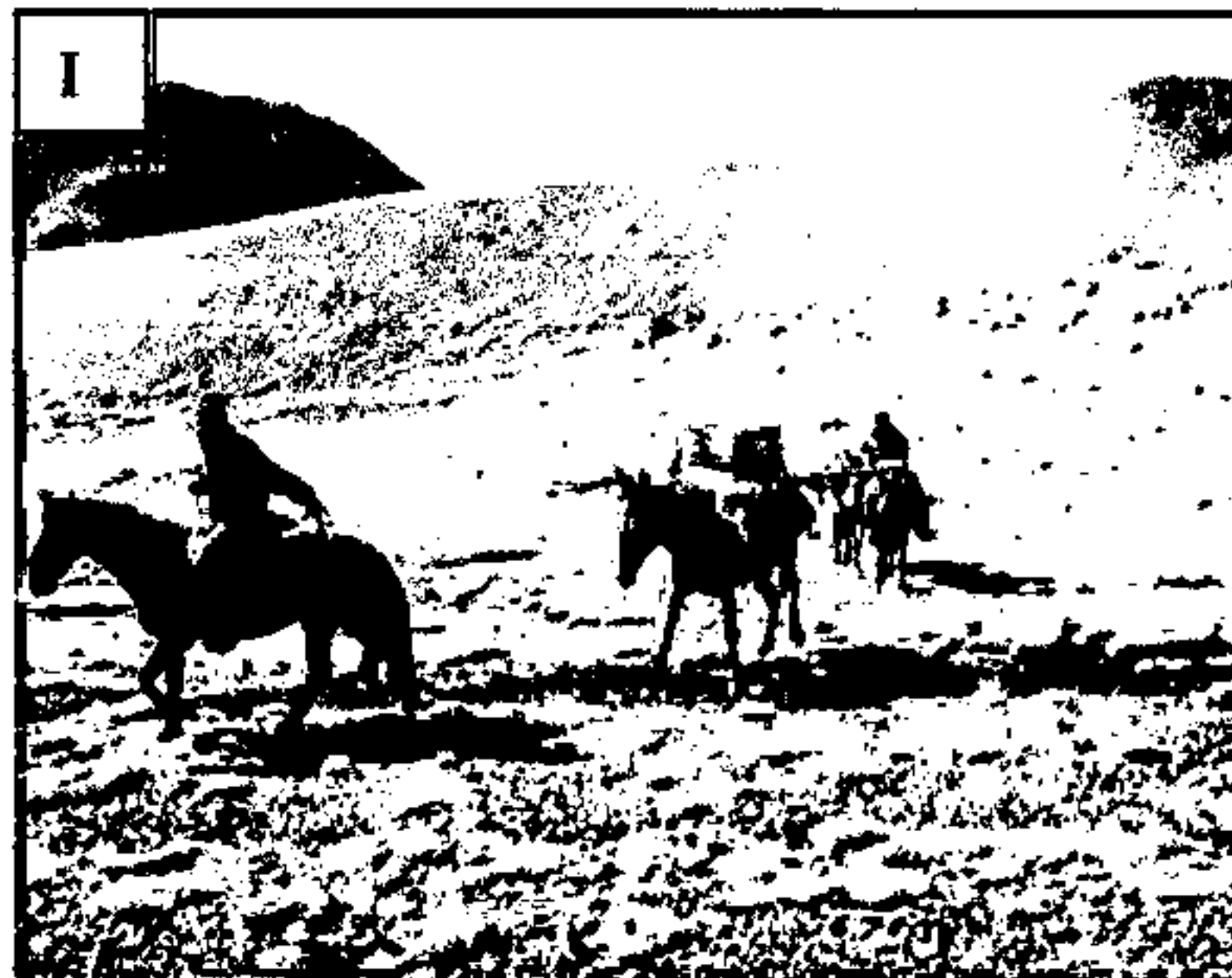


Figura 2. (Continuado) (G) RG midiendo una baliza de ablación; (H) construcción de la estación fluviométrica en abril de 2010; (I) trasladando material hacia el lado este del glaciar Tapado; (J) RG descargando datos de la estación del plateau.



4. Resultados

4.1 Condiciones meteorológicas

4.1.1 Detalles de las estaciones meteorológicas

En la tabla 1 y figura 3-4 se presentan la ubicación y detalles de las tres estaciones meteorológicas instaladas por el CEAZA sobre, y cerca del, glaciar Tapado. Varios equipos trabajaron para instalar las estaciones en los tres lugares. Un equipo de 4 personas subió durante tres días hasta cerca de la cumbre para instalar la estación AWS1.

Los detalles de los sensores instalados en cada estación son presentados en las tablas 2, 3 y 4.

Las tres estaciones midieron desde el 27-28 de noviembre 2009 hasta fin de abril de 2010, a cada hora, la temperatura y humedad relativa del aire, la radiación solar incidente y reflejada por la superficie, la radiación de ondas largas (infrarroja) incidente y emitida por la superficie, la velocidad y dirección del viento, y el nivel de la superficie, lo cual sirve para calcular la altura de nieve y la ablación de superficie.

La estación 2 (Cumbre) tuvo que ser reinstalada el 20 de enero de 2010 después que el mástil había salido demasiado del glaciar, comprometiendo su estabilidad. La estación se movió un metro al lado del lugar de instalación original. En la última visita a terreno, en fin de abril de 2010, se encontró la estación 2 caída en el glaciar. La estación se había caído unos 5 días antes, pero el mástil habría empezado a doblarse antes, el 23 de marzo, comprometiendo así la mayoría de las variables medidas

Tabla 1. Localización y fechas de instalación de las estaciones meteorológicas

Estación	AWS1 - Cumbre	AWS2 - Plateau	AWS3 - Morrena
Coordenadas UTM zona 19J Sur (m)	E0410826 N6665232	E 411026 N6664171	E0412543 N6663307
Cota (m)	5332	4770	4318
Fecha de instalación	28/11/2009	27/11/2009	28/11/2010
Instalada por	CK, RG, RP, JA	SG, SMD, JLC	CK, RG, RG, JA, SG SMD
Fecha de retiro	23/04/2010	20/04/2010	Sigue funcionando



Tabla 2. Detalles de la estación AWS1 en la Cumbre

<i>Sensor</i>	<i>Tipo</i>	<i>Altura inicial sobre la superficie (m)</i>	<i>Precisión (cf. manual)</i>
Anemómetro (dirección y fuerza del viento)	RM Young 05103	3	±0.3 m s-1 ±3 grados
Temperatura / humedad relativa	Avísala HMP45c + 41003-5 radiation shield	1.75	Tº: ±0.2°C RH : ±2 %
Net radiómetro - ondas cortas incidente y reflejada - ondas largas incidente y emitidas	Kipp & Zonen CNR1	1.82	±10%
Nivel de la superficie	Campbell Scientific SR50A	1.87	±0.4%

Tabla 3. Detalles de la estación AWS2 en el plateau

<i>Sensor</i>	<i>Tipo</i>	<i>Altura inicial sobre la superficie (m)</i>	<i>Precisión (cf. manual)</i>
Anemómetro (dirección y fuerza del viento)	RM Young 05103	2.80	±0.3 m s-1 ±3 grados
Temperatura / humedad relativa	Avísala HMP45c + 41003-5 radiation shield	2.20	Tº: ±0.2°C RH : ±2 %
Net radiómetro - ondas cortas incidente y reflejada - ondas largas incidente y emitidas	Kipp & Zonen CNR1	1.72	±10%
Nivel de la superficie	Campbell Scientific SR50A	1.89	±0.4%

Tabla 4. Detalles de la estación AWS3 en la morrena

<i>Sensor</i>	<i>Tipo</i>	<i>Altura inicial sobre la superficie (m)</i>	<i>Precisión (cf. manual)</i>
Anemómetro (dirección y fuerza del viento)	RM Young 05103	2.68	±0.3 m s-1 ±3 grados
Temperatura / humedad relativa	Avísala HMP45c + 41003-5 radiation shield	2.33	Tº: ±0.2°C RH : ±2 %
Pyranómetro (radiación ondas cortas incidente)	Campbell Sci. CS300 +	2.14	±5%
Pyrano-albedómetro (radiación ondas cortas incidente y reflejada)	Middleton EQ16	2.14	±10%
Pyrgometer (Radiación ondas largas Incidente)	Campbell Sci. CG3	2.14	±10%
Nivel de la superficie	Campbell Scientific SR50	1.63	±0.4%





- Automatic weather station
- Automatic digital camera
- △ Fluviometric sensor (water height)
- ┆ Mass-balance stake
- Limit Tapado glacier 1956
- - - - Limit Tapado glacier 2006
- - - - Limit debris-covered glacier
- - - - Limit rock glacier

500 m

Figure 3. foto área del glaciar Tapado (vuelo Hycon 1956) con limites del glaciar, glaciar cubierto y glaciar rocoso, y con ubicación de los varios estaciones instaladas al fin de noviembre 2009 por el CEAZA



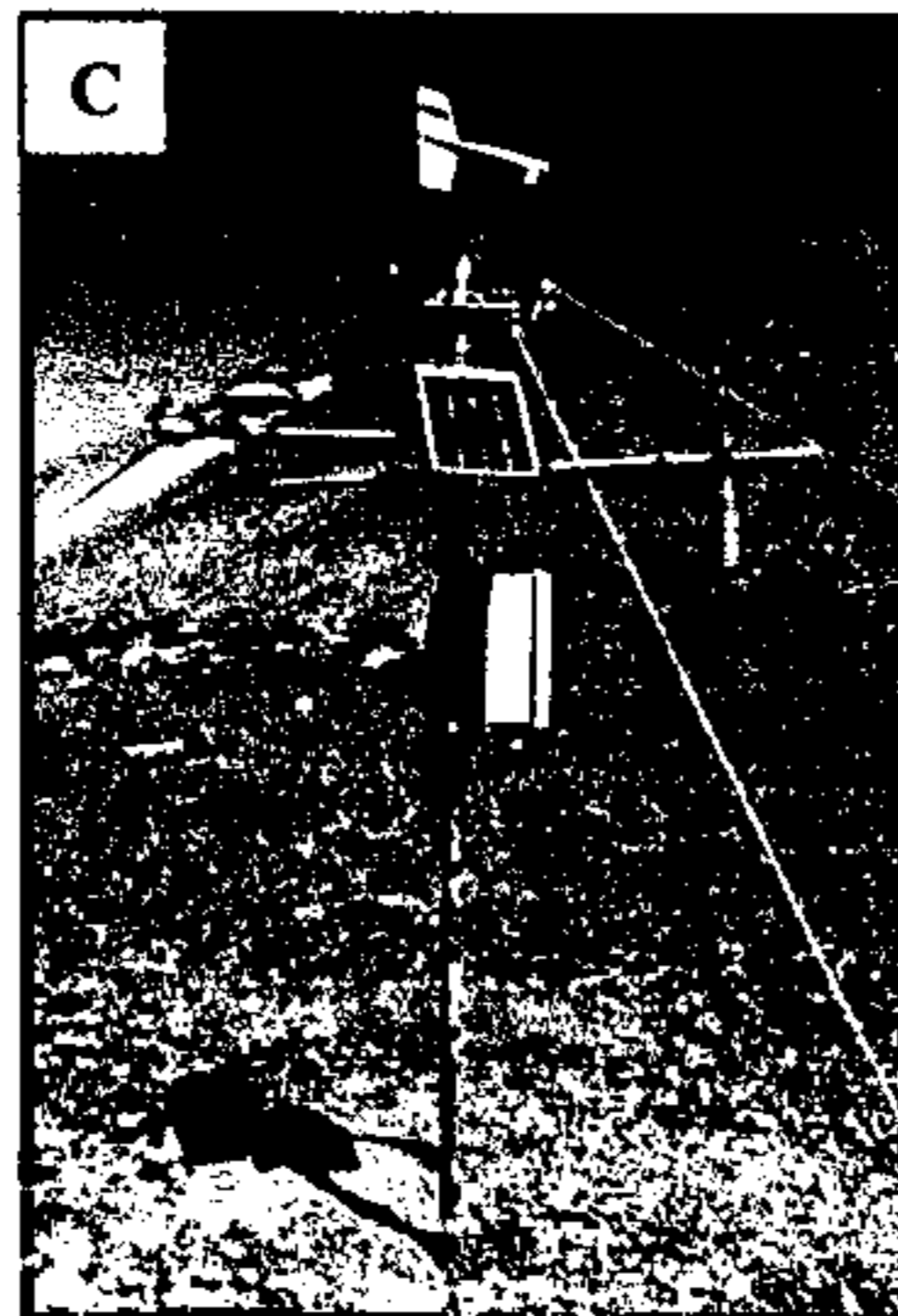
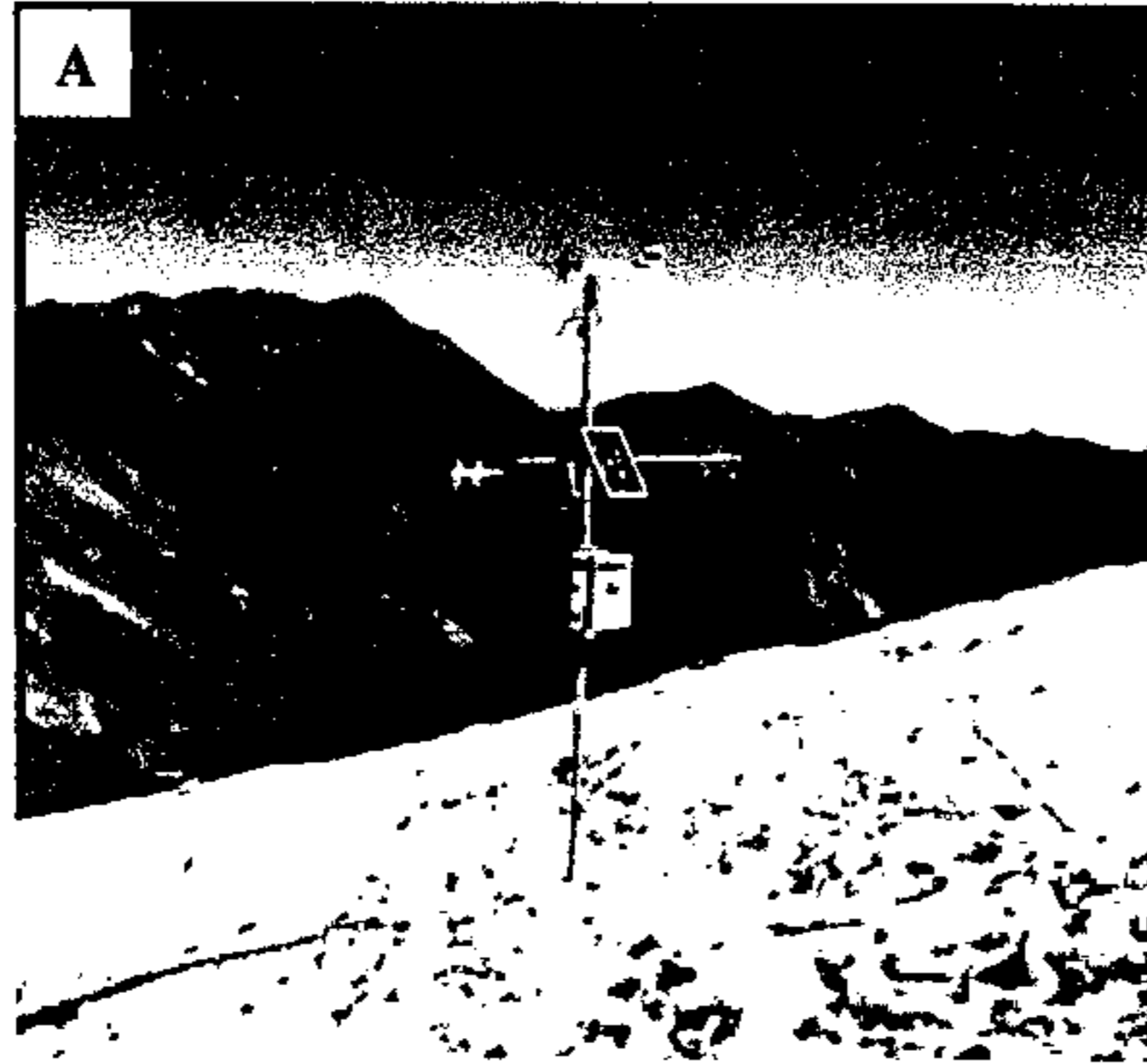


Figure 4. Vistas de las estaciones meteorológicas del glaciar Tapado después de su instalación: **(A)** estación AWS1, cerca de la cumbre del glaciar Tapado; **(B)** estación AWS2, pie del glaciar Tapado; **(C)** estación AWS3, sobre la morrena del glaciar Tapado.





Figura 5. (A) Estación 2 (plateau) el 20 de abril de 2010. La estación se dobló el 23 de marzo después de vientos fuertes, y cayó el 15 de abril. **(B)** estación 3 (Cumbre) el 23 de abril de 2010. Una de las estacas que soporte los tensores se rompió el 18 de enero de 2010, lo que hizo girar la estación.

(altura de superficie, radiación, viento). Por su parte, la estación 1 (Cumbre) se encontró de pie en fin de abril de 2010, pero un tensor se había roto cerca del 18 de enero de 2010, resultando en un giro de la estación en su mástil. Aunque eso compromete los datos de dirección de viento y altura de superficie, los otros datos no se ven afectados por el giro del mástil. La estación 3 (morrena), que se encuentra bien afirmada con cemento en el suelo, no se movió.

4.1.2 Análisis de datos meteorológicos

Los datos horarios medidos por las tres estaciones se presentan en la figura 6, y los promedios mensuales en la figura 7. Hay una buena coherencia entre los datos meteorológicos de las tres estaciones meteorológicas. Los promedios de la temperatura entre el 28 de noviembre 2009 y el 12 de febrero 2010, el periodo donde tenemos datos para las tres estaciones, son de -6.18°C (aws1), -0.84°C (aws2) y 4.13°C (aws3). El gradiente de temperatura del aire entre las dos estaciones sobre el glaciar (aws1 y 2) es de $-9.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ para la temporada de medición, mientras que es de $-11^{\circ}\text{C km}^{-1}$ entre la estación aws3 (morrena) y aws2 (plateau). Este gradiente se compara con el gradiente teórico para aire seco ($-9.8^{\circ}\text{C km}^{-1}$, Dodson and Marks, 1997). Eso significa que el aire es muy seco en el área de estudio. De hecho, el promedio de humedad relativa sobre el mismo periodo

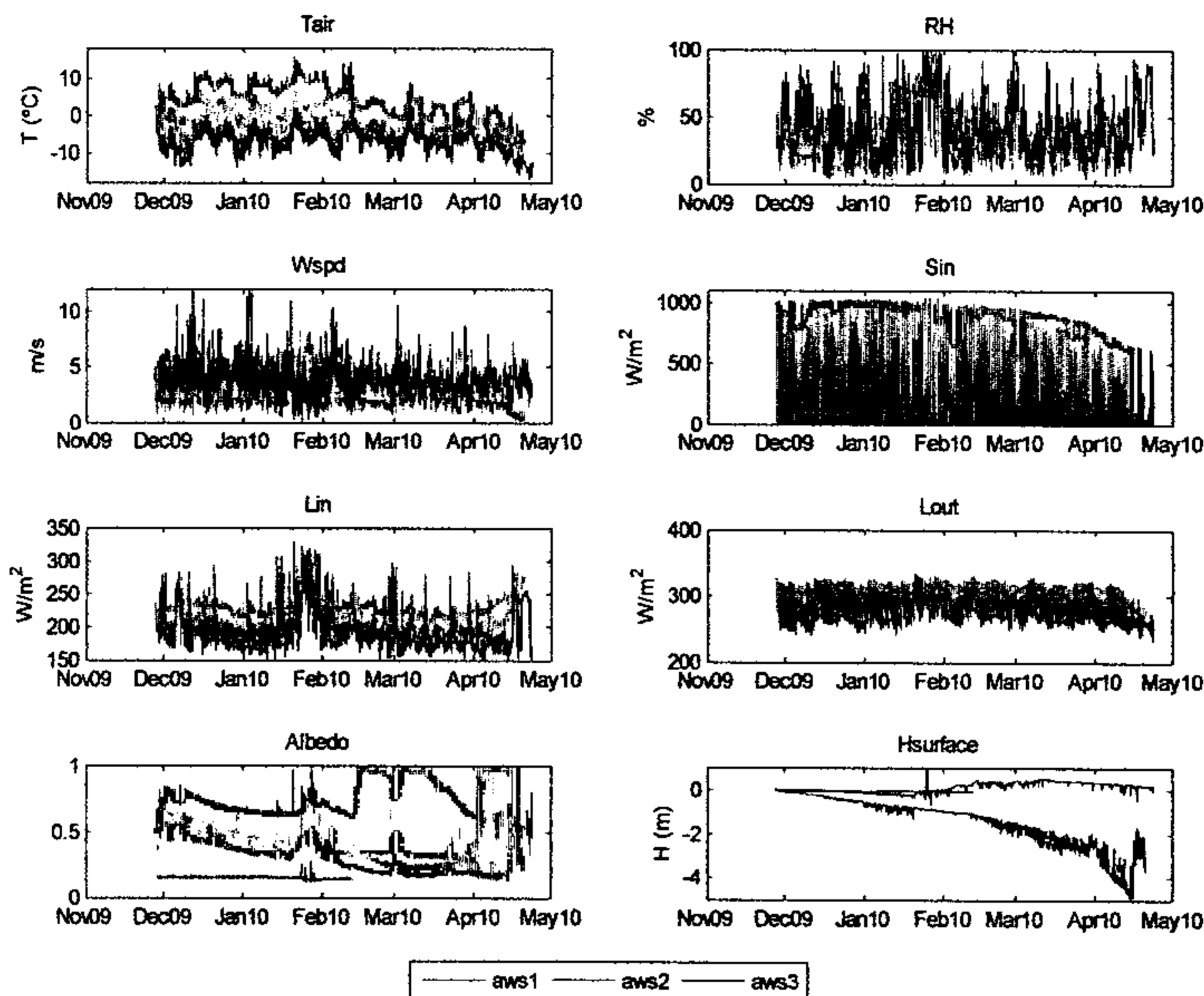
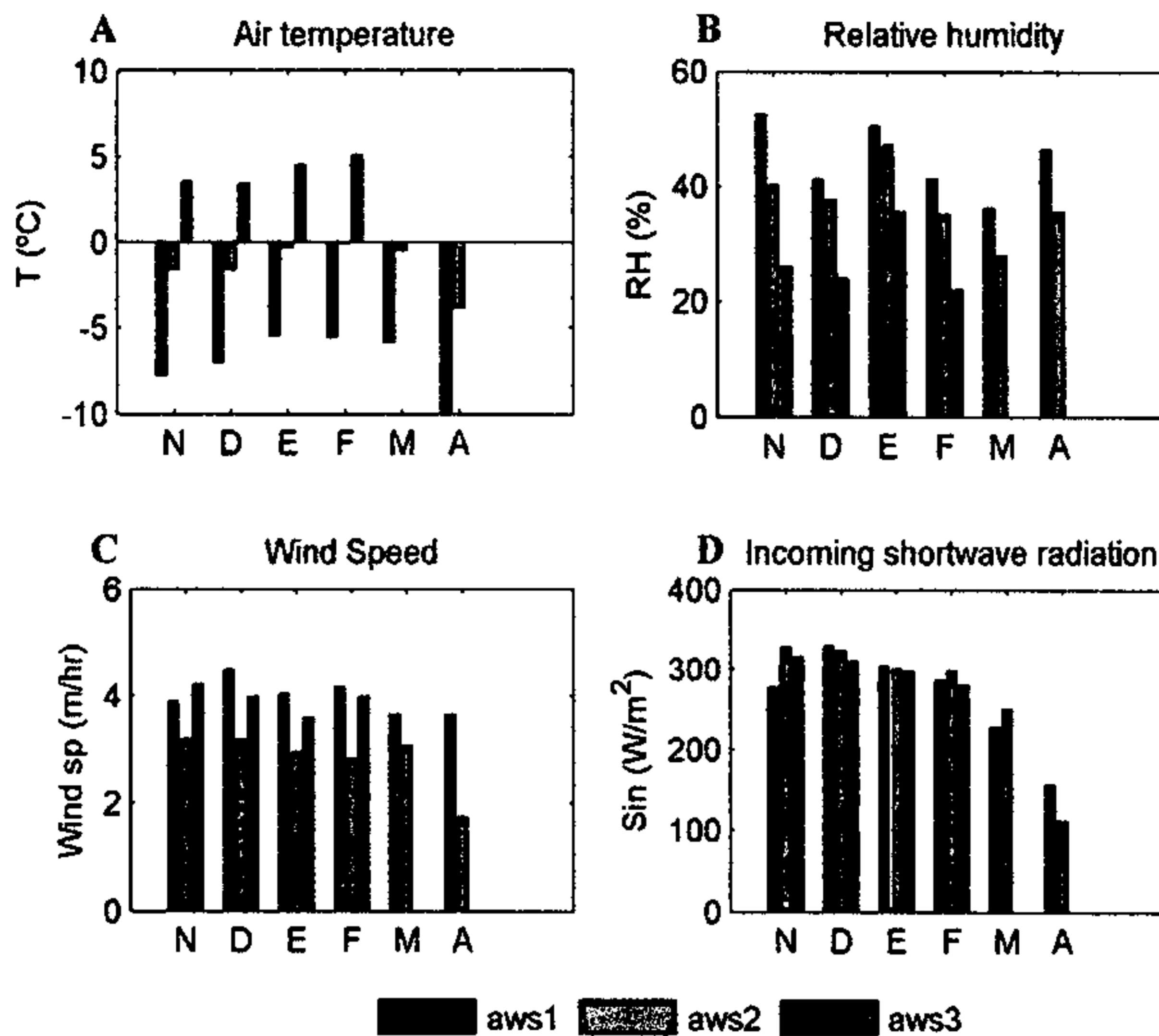


Figure 6. Datos meteorológicos horarios a las estaciones aws1 (azul), aws2 (rojo) y aws3 (verde), glaciar Tapado. Aws1 = Cumbre; aws2 = plateau; aws3 = morrena

es de 45.1% (aws1) y 41.2% (aws2), contra 28.5% a la estación aws3. Entonces el aire se ve más húmedo sobre el glaciar que sobre la morrena. La fuerte diferencia de temperatura entre la morrena y la parte baja del glaciar se puede explicar por el cambio de tipo de superficie: en la morrena, la presencia de sedimentos y rocas favorece la absorción de calor, parte del cual es re-emitida a la atmósfera y calienta el aire ambiente, mientras que sobre el glaciar la presencia de nieve y hielo tiene dos efectos: (i) la reducción del albedo, es decir que menos energía solar es retenida por la superficie, y (ii) la conducción de calor a dentro del glaciar; ambos efectos resultan en menos transferencia de calor hacia la atmósfera. Gradientes similares, aunque que ligeramente menos fuerte (-7.3 hasta $-10.8^{\circ}\text{C km}^{-1}$) fueron calculados entre una estación de tierra y varias estaciones sobre glaciares de la zona Pascua-Lama, en la región III (Informe N°CEAZA-PL-2009-02, 2010). La diferencia de humedad puede ser debida a la temperatura mas baja sobre el glaciar (aire mas frío contiene menos humedad, lo que da un valor de humedad relativa mas alto), además de la sublimación que también puede aumentar la humedad específica.



La

Figura 7. Promedios mensuales de (a) temperatura de aire; (b) humedad relativa; (c) velocidad de viento; (d) radiación solar incidente

radiación solar incidente es muy similar en los tres sitios, a parte al fin del día, cuando el pie del glaciar se encuentra en la sombra mientras que la cumbre y la morrena quedan iluminados por el sol.

4.1.3 Temperatura y fusión

Las condiciones de temperatura son muy diferentes a las 3 estaciones: en la Cumbre solo raramente la temperatura supera los 0°C (figura 8). En promedio la temperatura en la Cumbre es bajo 0°C, pero en algunos días la temperatura supera los 0°C a medio día, lo que resulta en la fusión de nieve/hielo. En comparación, en el pie del glaciar la temperatura diurna promedio se encuentra frecuentemente sobre 0°C, mientras que la temperatura diurna máxima (figura 8a) casi siempre supera 0°C. Eso significa que, por lo menos durante algunas horas cada día, ocurre fusión en el pie del glaciar. A fuera del glaciar, en el lugar de la morrena, la temperatura baja debajo 0°C solo en la noche. Según estimaciones previas, la casi totalidad del agua de fusión producida en el sector de la Cumbre se congela dentro del glaciar, lo cual tiene una temperatura bajo cero (Ginot et al, 2006). Esta agua forma acumulación en forma

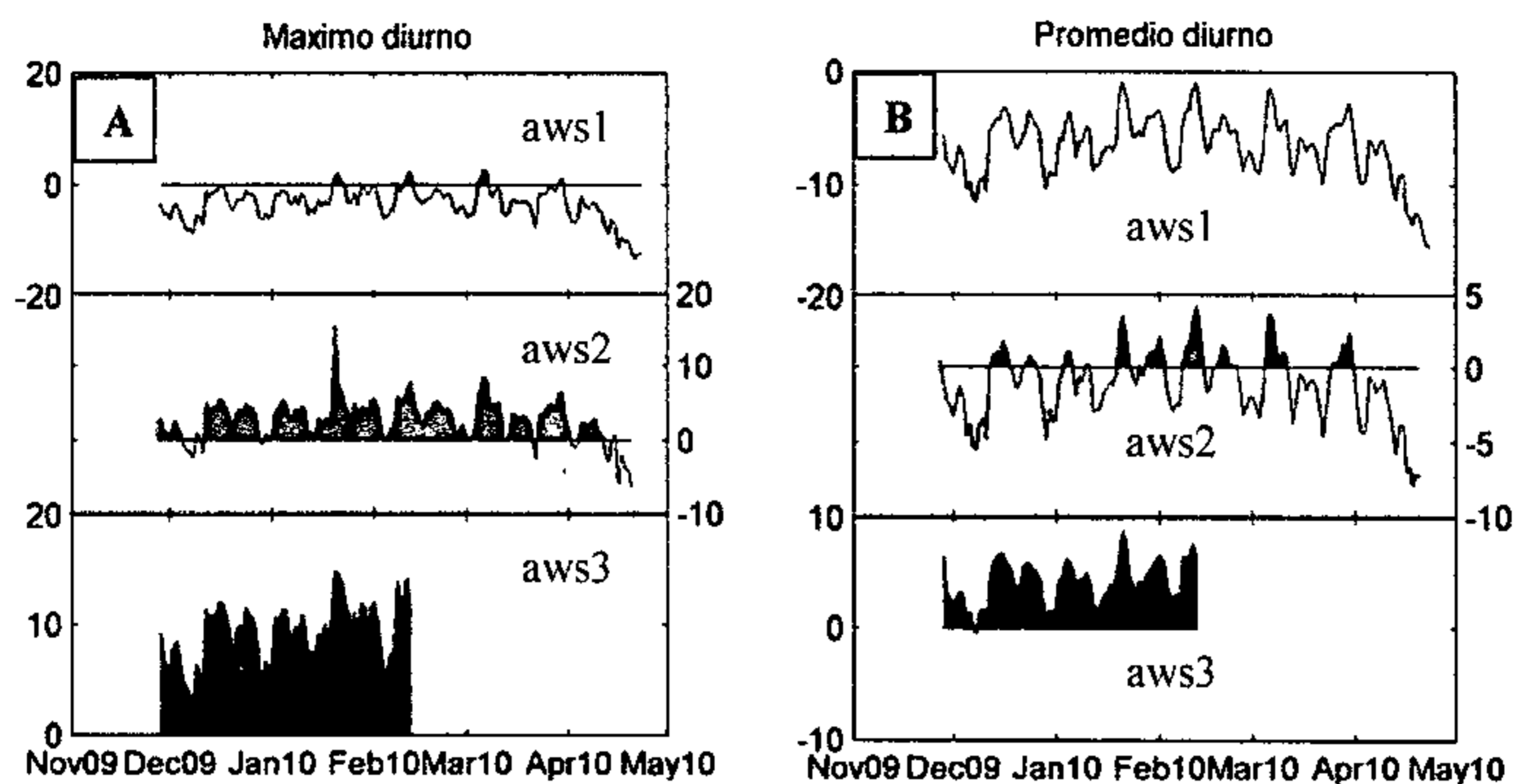


Figura 8. Temperatura de aire a las 3 estaciones (A) promedio por día; (B) máximo por día

de hielo superpuesto (*'superimposed ice'* en inglés), formando lentes de hielo visible dentro de la capa de nieve estacional en superficie. Sin embargo, cuando se visitó la cumbre en abril de 2010, quedaba poco neviza (nieve que sobrevive el verano) y la superficie era cubierta de penitentes. El tope de los penitentes era compuesto de neviza mientras que su parte inferior, de hielo. Así, en el sector de la cumbre es posible que todavía exista una zona de acumulación neta positiva, pero eso ocurre de manera compleja, con años donde se acumula neviza con hielo de re-congelación, y otros años con balance negativo, donde se pierde parte de la masa acumulada previamente. Es probable que en promedio hoy, el sector de la cumbre tenga un balance de masa neutro o ligeramente negativo. Por el contrario en el pie del glaciar, el balance es fuertemente negativo (ver próxima sección).

4.1.4 Precipitaciones

Se registró poco precipitaciones durante el periodo de medición. Caídas de nieve ocurrieron al fin de enero, de febrero y fin de abril. Se puede ver en la figura 6 que en estas fechas la humedad relativa del aire subió cerca de los 100%, significando un aire saturado en vapor de agua. Además, en estas fechas la radiación solar incidente (*'Sin'*, figura 6) bajó debido a la presencia de nubes, mientras que la presencia de agua en el aire causó un aumento de la radiación infrarroja (*'Lin'*, Figura 6) hacia la superficie de las 3 estaciones. Las caídas de nieve fueron muy pocas: apenas se registró con los sensores de altura de nieve (*'Hsurface'*, figura 6), lo cuales sufren de la presencia de ruido, por la alta rugosidad de la superficie y las vibraciones de la

estructura. Ya que se giró el mástil de la aws3 en la Cumbre, es imposible usar los datos de altura de superficie entre el 18 de enero de 2010 y el 14 de marzo de 2010, cuando parece que el mástil se inmovilizó de nuevo por re-congelarse en el hielo. La ocurrencia de eventos de precipitaciones fue también confirmada por la inspección de las fotos tomadas tres veces al día por la estación fotogramétrica afrentando el glaciar (figura 9).

4.1.5 Albedo

Mientras que las caídas resultaron en poca acumulación de nieve sobre y alrededor del glaciar, la delgada capa de nieve que cayó (1-2 cm) cada vez aumentó significativamente el albedo de la superficie del glaciar ('Albedo', figura 6), influenciando así el balance de energía de superficie (baja la absorción de energía solar y así disminuye la ablación). El albedo en el sector de la cumbre (aws1) bajó a través del tiempo desde valores típicas de neviza (o nieve antigua, metamorfoseada, ~ 0.6 , Patterson, 1994), bajando a valores de neviza y hielo a lo largo de la temporada de ablación (figura 10). Se puede apreciar la subida abrupta del albedo cuando cae nieve. En el pie del glaciar (aws2), el albedo tiene valores inicialmente de nieve metamorfoseada, bajando hasta valores de hielo sucio (con presencia de polvo) en marzo. La presencia de penitentes grande en el lugar de la estación 2 también causa una disminución del albedo, ya que un parte de la radiación incidente se pierde entre los penitentes por reflexiones múltiples (Corripio y Purves, 2005).

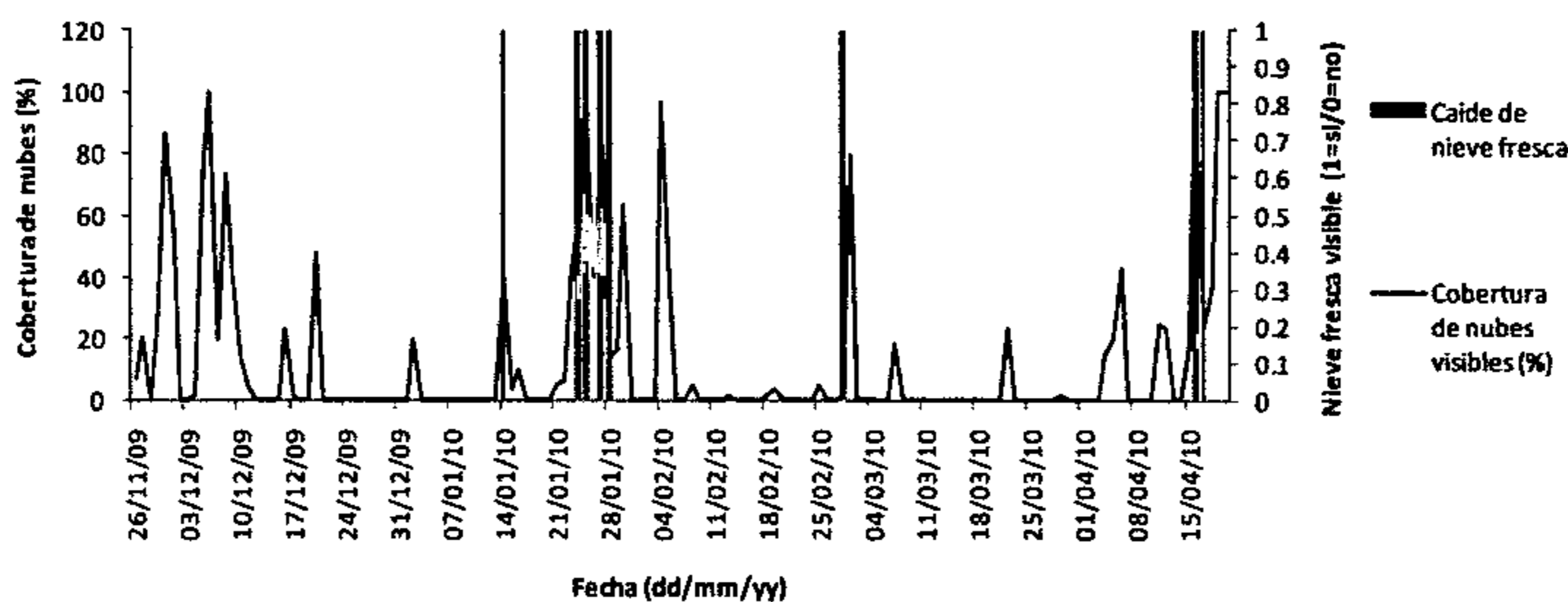


Figura 9. Porción del cielo cubierto por nubes (azul, %) y presencia/ausencia de nieve fresca en los alrededores del glaciar, visible desde la cámara automática.

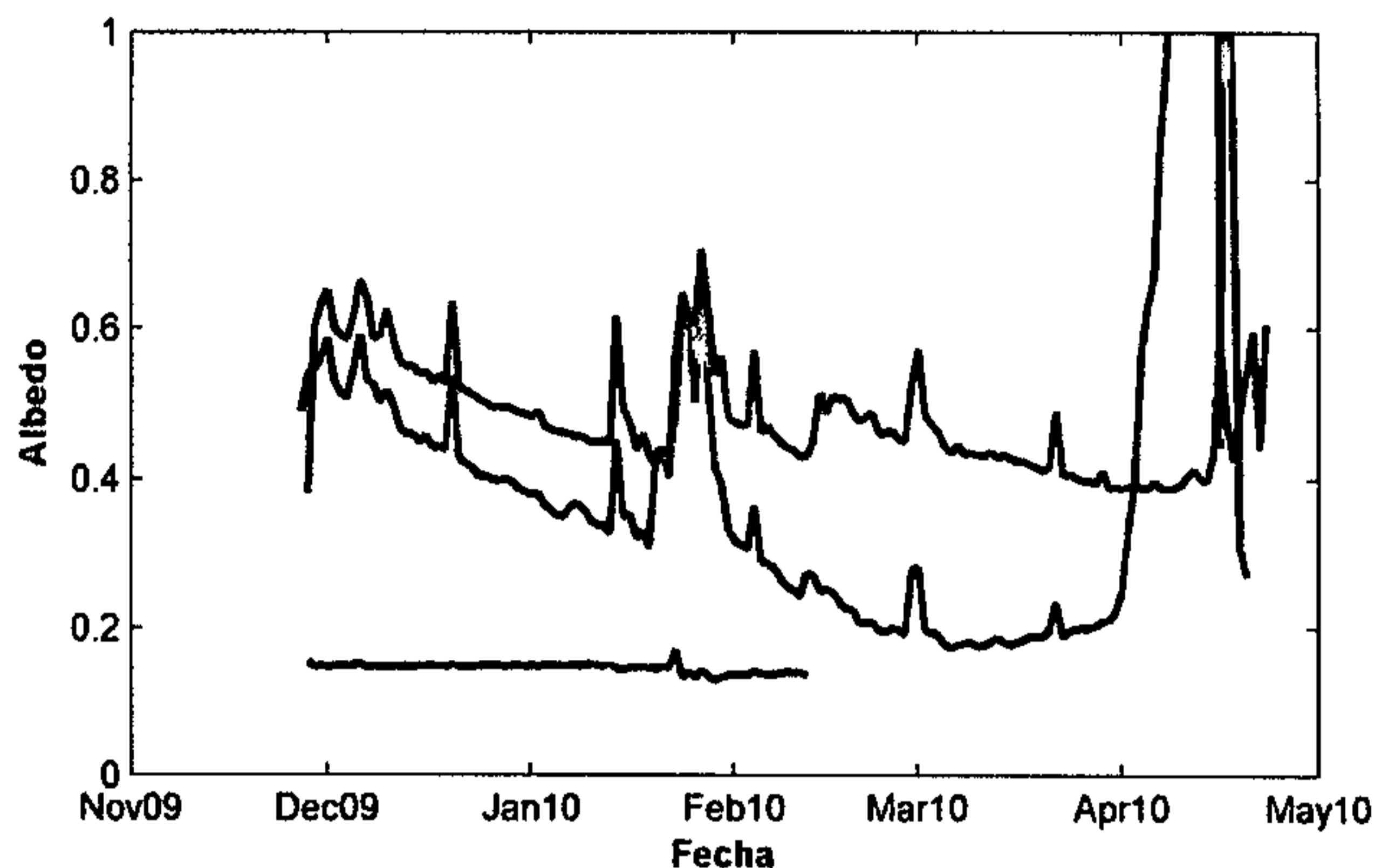


Figura 10. Albedo promedio por día para aws1 (cumbre, azul), aws2 (plateau, rojo) y aws3 (morrena, verde). La subida abrupta de la aws2 en abril ocurrió por la flexión del mástil de la estación, y los valores no son confiables.

4.1.6 Viento

En el sector de la cumbre (aws1) el viento proviene en mayor parte desde suroeste. Los vientos los más fuertes (>7 m/s) provienen del suroeste y del noroeste (figura 11). En la parte baja del glaciar (aws2) el viento proviene mayormente desde el este, con una segunda concentración desde el noroeste. Los vientos mas fuerte provienen desde el oeste. A fuera del glaciar, sobre la morrena, el viento proviene más del sur oeste a suroeste y sur. Vientos fuertes vienen del oeste en ambas estaciones. En el glaciar el viento es predominante desde el norte durante la noche, pero cambia desde el este/sur-este durante el día (figura 7). En la estación sobre la morrena los vientos son más estables en dirección, pero más fuertes (figura 6 y 7). El viento en la cumbre representa el viento dominante por la circulación general en la región (de oeste a este). Igual, la estación en la morrena parece reflejar este patrón. Sin embargo, las condiciones aparecen diferente en el pide del glaciar. El vector dominante, desde el este, podría representar un viento de valle ascendente, modificado por la topografía del circo. El vector desde el noroeste podría representar la circulación general modificado por la topografía, o el drenaje de air frio desde la parte arriba.

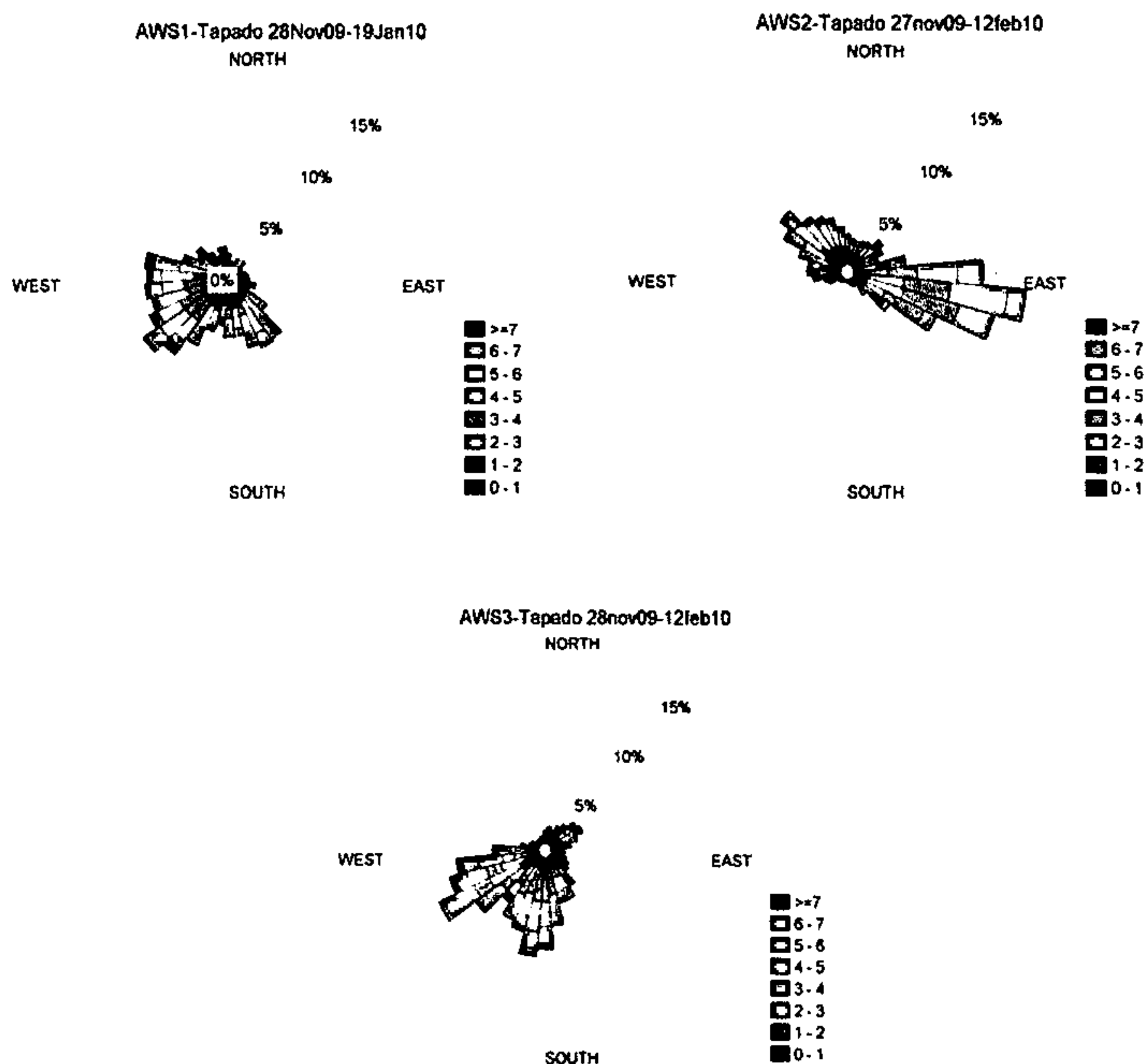


Figure 11. Dirección y fuerza del viento a las estaciones aws1, aws2 y aws3, glaciar Tapado

4.1.7 Ciclos diurnos

En la figura 12 se presentan el ciclo diurno promedio para cada variable meteorológica. El ciclo de temperatura ('Tair', Fig.12) en las 3 estaciones sigue el ciclo de insolación solar ('Sin', Fig.12), con iluminación y un calentamiento del aire desde las 8h00 am hasta las 20h00 pm. Mientras que se calienta la superficie con absorción de radiación solar, parte de la energía es remitida hacia la atmosfera por radiación infrarroja ('Lout', Fig.12). Bajo calentamiento en el día el aire ambiente tiende a dilatarse, lo que causa la humedad relativa de baja ('RH', Fig.12). La velocidad de viento ('Windspd', Fig.12) en la cumbre no muestra un ciclo diurno. En comparación en el pie del glaciar y sobre la morrena el viento vuelve más fuerte en la tarde. La dirección del viento tiende a cambiar entre la noche y el día ('Winddir', Fig.12). En la cumbre y sobre la morrena el

viento viene más desde el oeste en la noche y más desde el suroeste durante el día. En el pie del glaciar el contraste es el más fuerte. En la noche el viento viene del norte –noroeste y en el día cambia desde el este, hasta que desaparezca el sol. La orientación norte-noroeste puede ocurrir por la presencia de vientos catabáticos, donde el aire más frío de la parte alta del glaciar tiende a bajar por gravedad hacia el pie del glaciar. Durante el día la radiación solar calienta las superficies de rocas alrededor del glaciar, causando gradientes de temperatura fuertes. Así el calentamiento de la pared de roca al oeste del glaciar (ver figure 3) podía explicar que el aire sobre el glaciar tiende a moverse hacia esta dirección en el día.

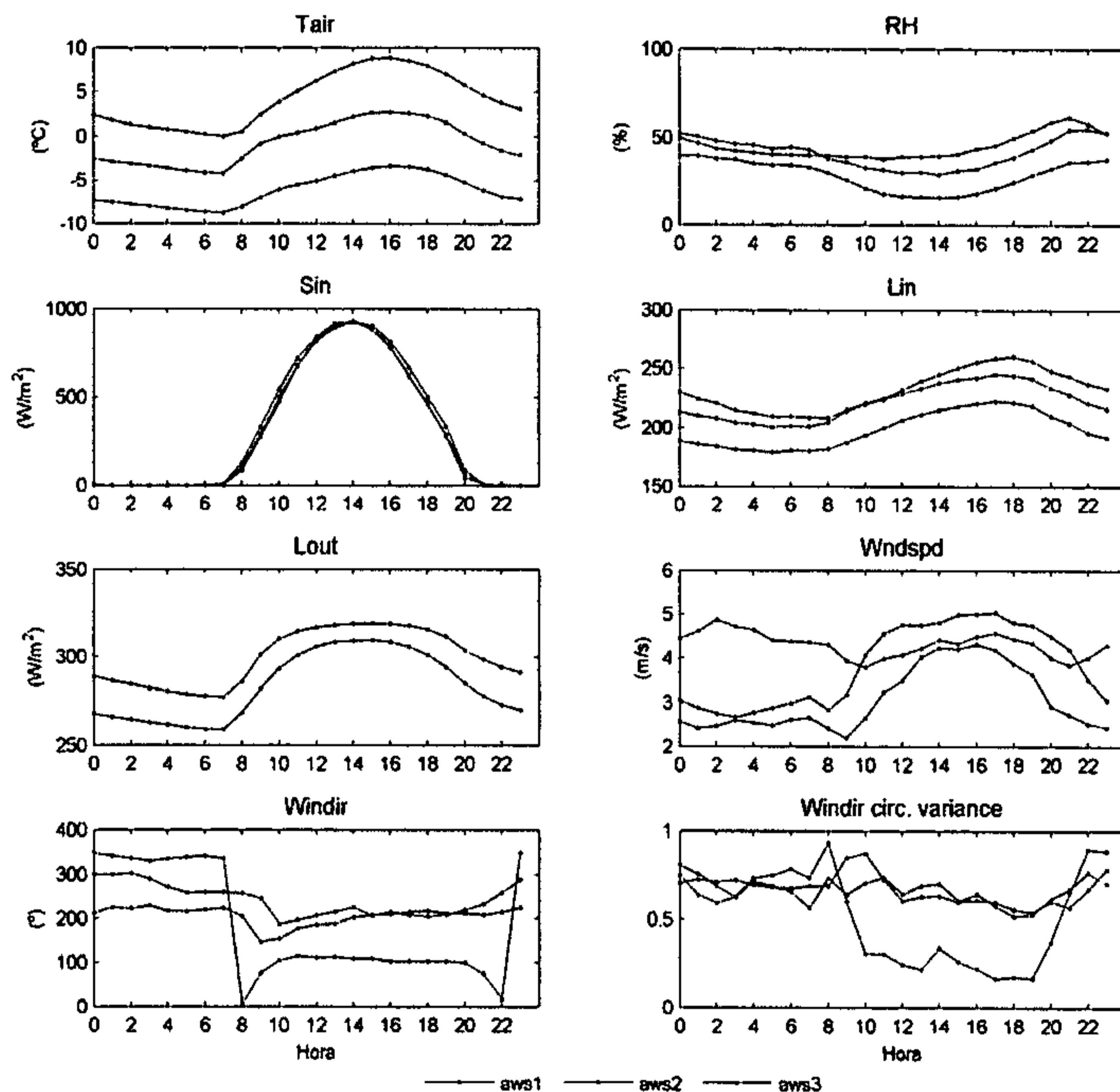


Figure 12. Ciclos diurnos promedio de las variables meteorológicas de las estaciones aws1 (cumbre, azul), aws2 (plateau, rojo), aws3 (morrena, verde).

4.2 Balance de masa medida

4.2.1 Ablación

Dos estacas se instalaron cerca de la estación AWS2 sobre el glaciar (ver figura 1 para ubicación), para medir la ablación, mientras que una estaca antigua se encontró en el sector de la cumbre, la cual fue instalada en 1999 por una expedición Suiza. Una estaca adicional se instaló en abril de 2010. Ya que la prioridad fue de instalar y mantener las estaciones meteorológicas, y dado el acceso complicado al glaciar por la presencia de penitentes, no se instaló muchas estacas, y se sugiere ampliar la red el próximo verano. Los detalles de las balizas se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Datos de medición de ablación sobre el glaciar Tapado

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Alt. (m)	Fecha de medición	Espesor nieve fresca (cm)	Emergencia sobre superficie (cm)	Ablación Calculada (m.a.e)
TP-09-A	410986	6664157	4769	27/11/2009	8	90	0
				20/01/2010	5	300	-2.10
				11/02/2010	0	342	-2.52
				20/04/2010	0	529	-4.39
TP-09-B	410953	6664110	4768	27/11/2009	16	95	0
				20/01/2010	0	310	-2.15
				12/02/2010	0	359	-2.64
				20/04/2010	0	523	-4.28
TP-09-C	410927	6664207	4783	21/04/2010	0	210	-
TP_CECS	410217	6665229	5537	28/11/2009	neviza	>150 (enterada)	0
				23/04/2010	Hielo/ neviza	>264 (enterada)	~-1.14
Mástil aws1	410822	6666523	5332	28/11/2009	neviza	300	
				23/04/2010	Penitentes	¿?	
Estacas aws1		Cerca asw1		28/11/2010		0	0
				23/04/2010	Penitentes	70	-0.70
Mástil aws2	410974	6664171	4773	27/11/2009	12	300	0
				20/01/2010	0	490*	-1.90
				11/02/2010	0	386	-2.71
				17/04/2010	0	548	-4.33
Estacas aws2		Cerca aws2		19/01/2010	0	0	0
				11/02/2010	0	100	-1.00
SR50 aws2		Sensor altura de nieve		27/11/2009	0	189	0.00
				29/03/2010	0	452	-2.63
SR50 aws1		Sensor altura de nieve		28/11/2009	0	187	0.00
				19/01/2010	0	209	-0.22
				17/03/2010	0	144.5	0.00
				23/04/2010	0	167.8	-0.23

*Mástil se reinstaló, nueva emergencia = 305 cm



Tasas de ablación similares, entre -4.28 y -4.39 m.a.e ('metros en agua equivalente') fueron medidas en la zona baja del glaciar entre el fin de noviembre de 2009 y el fin de abril de 2010. Estas tasas representan un máxima de la ablación puntual ya que fueron medidas entre penitentes. Por ejemplo, el sensor ultrasónico de altura de superficie (SR50) en la estación 2 midió una ablación de -2.63 m mientras que el cambio de emergencia del mástil de la misma estación da una ablación de -4.33 m. El sensor tenía una huella de superficie a su instalación de 0.68 m, la cual creció hasta 1.6 m al fin de la temporada de medición (por la emergencia del mástil y sensor). Así el sensor SR50 integra un área más amplia que una sola estaca. Eso ilustra que las tasas de ablación sobre una zona de penitentes pueden variar bastante a pequeña escala espacial. Existe una grande diferencia entre las tasa de ablación medidas en el pie del glaciar y el sector de la cumbre (figura 13). Se calculó una tasa de ablación promedia de -0.58 ± 0.16 cm/día en la parte alta del glaciar y -3.03 ± 0.87 cm/día en el pie del glaciar.

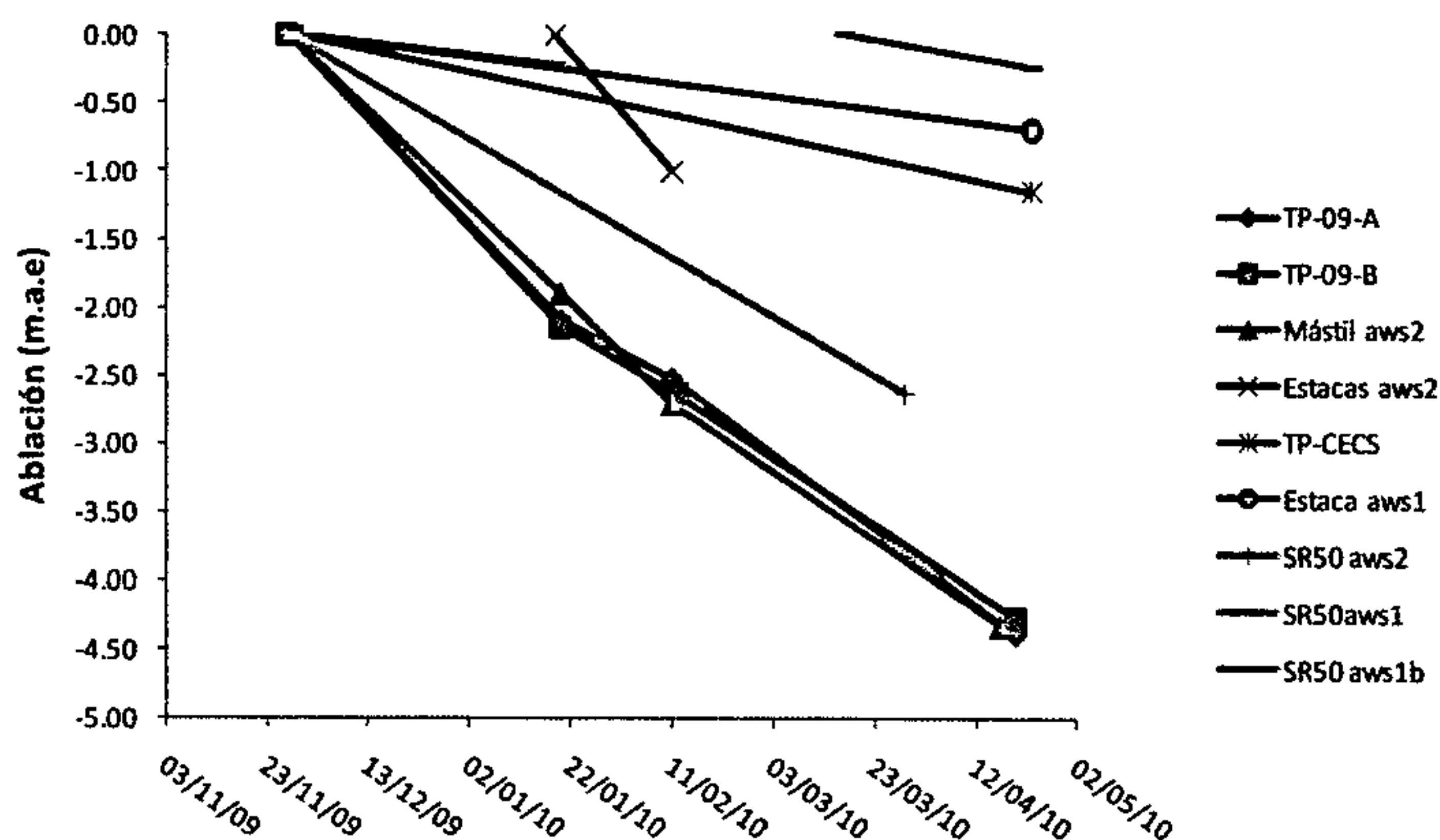


Figura 13. Ablación medida en varios puntos en el glaciar Tapado durante el verano de 2009-2010. Los puntos y valores refieren a la tabla 5.

4.2.2 Acumulación de nieve

Solamente se midió la acumulación de nieve en cinco puntos al fin de noviembre de 2009, cuatro en el pie del glaciar y uno cerca de la estación en la cumbre (tabla 6). En el pie del glaciar la acumulación varía fuertemente debido a la presencia de

penitentes bajo la nieve. Se midió la densidad en la capa superficial de nieve cerca de la estación 2. El valor promedio (± 1 desviación estándar) es de $0.53 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$. En la cumbre sólo se estimó la acumulación en el lugar de la estación por penetración del Taladro hasta golpear una capa dura, lo que dió valores de espesor entre 100 y 150 cm, o 0.50-0.75 m.a.e. Este valor se compara bien con valores de acumulación reconstruidos por los últimos ~40 años a partir de un testigo de hielo obtenido en 1999 en el sector de la Cumbre (0.54 m.a.e por año, Ginot et al, 2006).

Es imposible calcular con precisión el balance de masa total, o 'distribuido' para el glaciar Tapado con los pocos datos medidos. En su parte baja, tomando el promedio de los valores de acumulación medida, y el valor masa conservativo de ablación del sensor ultrasónico (SR50), el balance neto es: $0.43 \text{ m.a.e} - 2.63 \text{ m.a.e} = -2.20 \text{ m.a.e}$. En su parte alta, tomando un valor de acumulación de 0.63 m.a.e y un valor de ablación de -0.70 m.a.e (tabla 5) el balance neto es $0.63 \text{ m.a.e} - 0.70 \text{ m.a.e} = -0.07 \text{ m.a.e}$. Uno puede así calcular un gradiente *aproximado* del balance de masa $\text{dB/dZ} = (-0.07 \text{ m.a.e} - -2.20 \text{ m.a.e}) / (5332 - 4770) = 0.38 \text{ m.a.e} / 100 \text{ m}$. Este valor es más fuerte que el valor de $0.12 \text{ m.a.e} / 100 \text{ m}$ obtenido por el modelo de Kull and Grosjean (2002), lo cual fue calibrado con datos de 1998-1999. Se sugiere que desde 1998-99 el clima se ha calentado y el gradiente de ablación puede ser más fuerte 10 años después. El balance de ablación sería $(-0.70 \text{ m.a.e} - -2.63 \text{ m.a.e}) / (5332 \text{ m} - 4770 \text{ m}) = 0.34 \text{ m.a.e} / 100 \text{ m}$. Extrapolando la ablación y el balance neto a todo el glaciar usando la curva de hipsometría (figura 14), da valores *aproximados* de ablación distribuida de -1.35 m.a.e (ablación) y -0.83 m.a.e (balance de masa neta).

Tabla 6. Valores de acumulación de nieve medidas en noviembre de 2009

Descripción	Espesor promedio (cm)	Est. Desv. (cm)	(m.a.e.)
A) approx 10m al sur de aws2	10	7	5.3
B) approx 20m al sur de aws2	29	46	15.4
C) approx 30m al sur de aws2	148	62	78.4
D) approx 40m al sur de aws2	137	39	72.5
E) aws1, sector cumbre	100-150	-	50-75



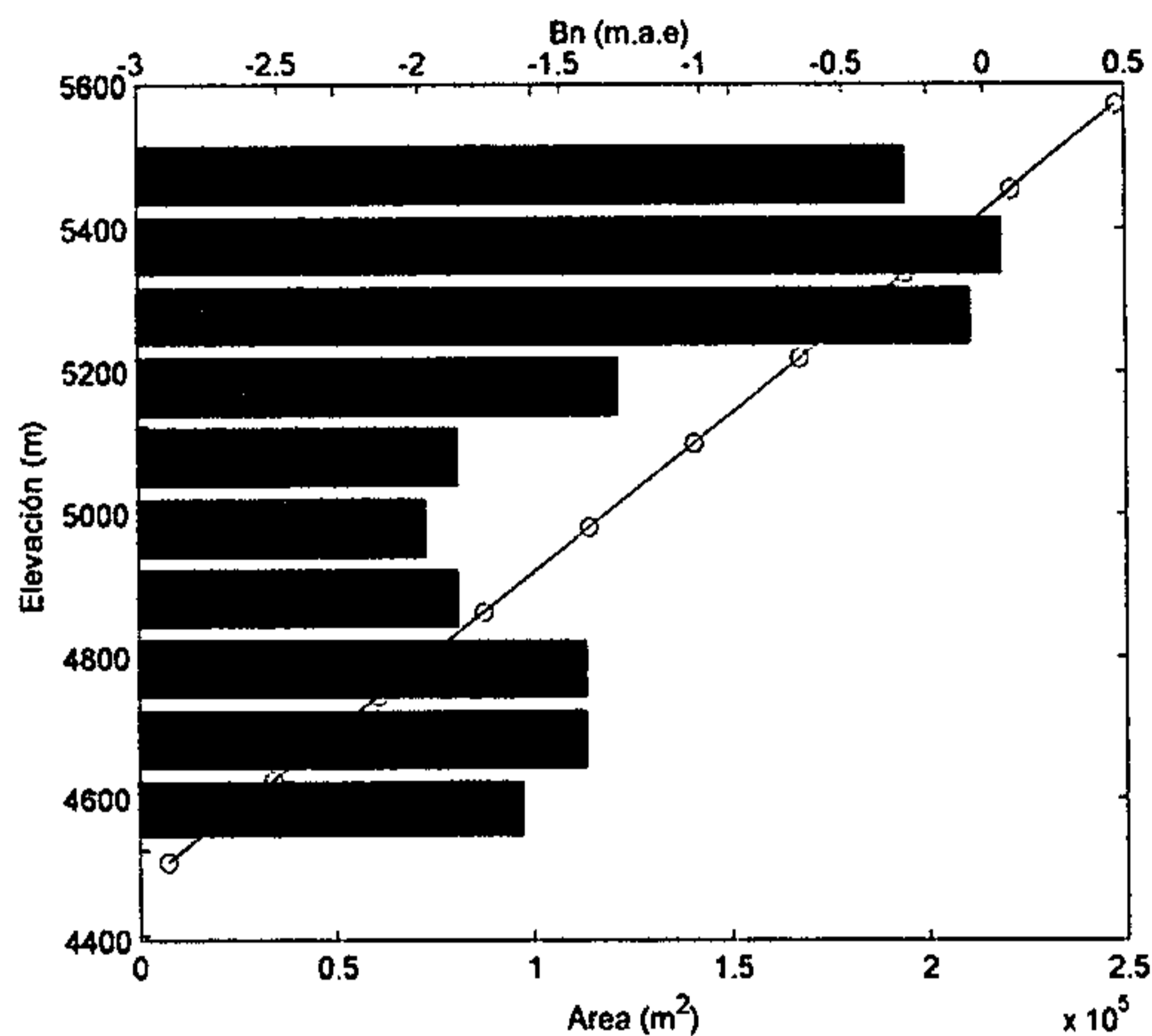


Figura 14. Curva de hipsometría (distribución de áreas con altura) y gradiente de balance de masa neto asumido.

4.3 Hidrología

4.3.1 Detalles de las estaciones fluviométricas

Se instaló un sensor para medir la altura de agua un en pozo adyacente al río saliendo de la morrena frontal del glaciar. El sensor mide la presión de agua y de la atmósfera dentro de un pozo instalado en el lado del río. El pozo está hecho de un tubo de PVC con hoyos para permitir el flujo del agua. Se realizó varias mediciones manuales de caudal en el lugar de la estación, con el objetivo de desarrollar una curva de calibración entre el nivel de agua en el pozo y el caudal del río (ver foto en figura 2h y resultados en figura 15). Los datos medidos hasta el inicio de enero son presentados en la figura 16.

No hay una relación clara entre el caudal medido y el nivel de agua a la estación fluviométrica (figura 15). Una posible razón por eso es el error bastante grande en las mediciones manuales de caudal que ocurren en un río con nivel bajo (aproximadamente 20 cm de profundidad de agua en el punto de la estación). Además, el nivel de río no mostró variaciones pronunciadas a través del día, y tampoco entre los días de medición. Se esperaba que el nivel de agua cambiaría mucho durante el día en respuesta al ciclo diurno de radiación, como se ve habitualmente en ríos bajo glaciares, pero no es el caso aquí. De otro lado se observó



que el río que sale del glaciar descubierto mas arriba mostraba un ciclo de caudal mucho mas pronunciado. Eso significa que la presencia del glaciar cubierto *afrentando el glaciar Tapado atenúa fuertemente el ciclo diurno en el caudal de agua saliendo del glaciar*. Además se observó que el caudal de agua saliendo del glaciar descubierto parecía dos a tres veces más que el caudal saliendo de la morrena abajo. Eso puede significar que (1) hay agua que se infiltra y pasa por debajo de la morrena; (2) hay agua que se almacena dentro del glaciar cubierto; (3) que la *diferencia es debido al ciclo diurno diferente: mientras que no hay caudal proviniendo del glaciar descubierto una vez que desaparece el sol (no hay energía para derretir la nieve/hielo), el caudal sigue corriendo a dentro del glaciar cubierto y saliendo de la morrena, entonces los totales diurnos son iguales*. Más investigaciones sobre estos procesos hidrológicos se llevarán a cabo dentro de un próximo proyecto.

Se ve una buena concordancia entre la temperatura del aire, en la estación 3, (morrena) y el caudal (como indicado por la altura de agua) saliendo de la morrena (figure 16), lo que implica que el caudal depende de la energía disponible en la superficie para el derretimiento de hielo en el glaciar. En la figura 17 se ven las variaciones diurnas de altura de agua en el río y en la laguna sobre la morrena (ver foto en figura 18). Hay alguna concordancia entre las variaciones de nivel entre el río y la laguna, lo que muestra que los dos sistemas son conectados. El 8 de febrero la laguna se encontró vacía, lo que sugiere que la morrena contiene hielo y que el derretimiento de la capa activa del permafrost permitió el drenaje de la laguna.

4.3.2 Balance hídrico aproximado

El monitoreo del nivel de agua en el río que sale del glaciar no permitió reconstruir los caudales. Ya que, se observó que el nivel no cambiaba mucho, probablemente porque se atenúa el ciclo diurno cuando el agua pasa dentro del glaciar cubierto, el caudal promedio medido manualmente ($0.06 \text{ m}^3/\text{s}$) es probable una buena estimación del flujo de agua en el río. Un cálculo crudo del balance hídrico total fue así realizado: hacemos la hipótesis que este caudal se mantiene durante 6 meses del año cuando las condiciones meteorológicas permiten la fusión en el glaciar; así el volumen total durante 6 meses es de $948,672 \text{ m}^3$. En comparación se estimó una ablación total para el glaciar de $1,887,900 \text{ m}^3$, lo que corresponde a 2 veces más el volumen de agua calculado. No se restó la sublimación de la ablación. Este valor es difícil a



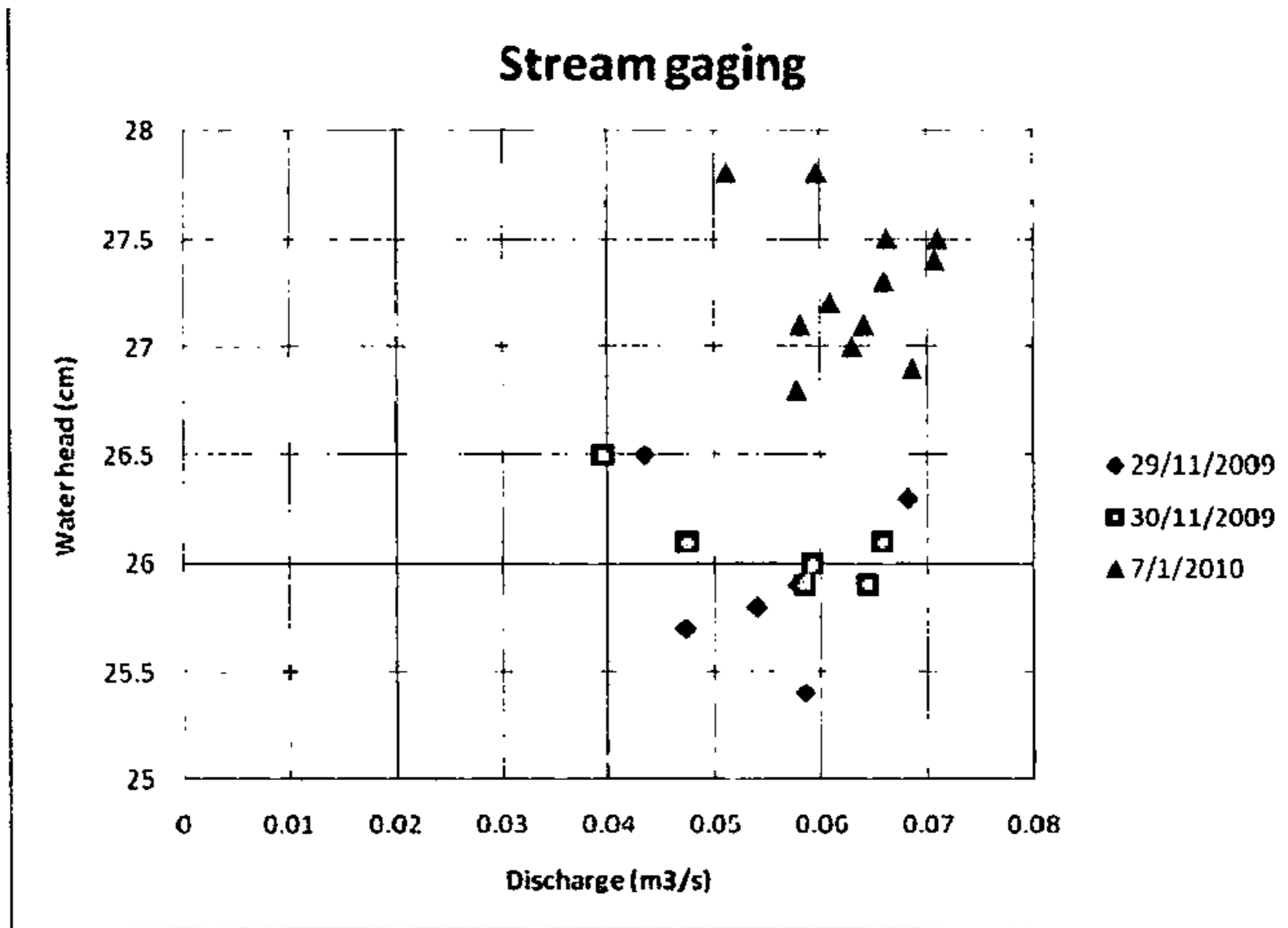


Figure 15. Mediciones de caudal VS altura de agua en el río saliendo de la morrena del glaciar Tapado.

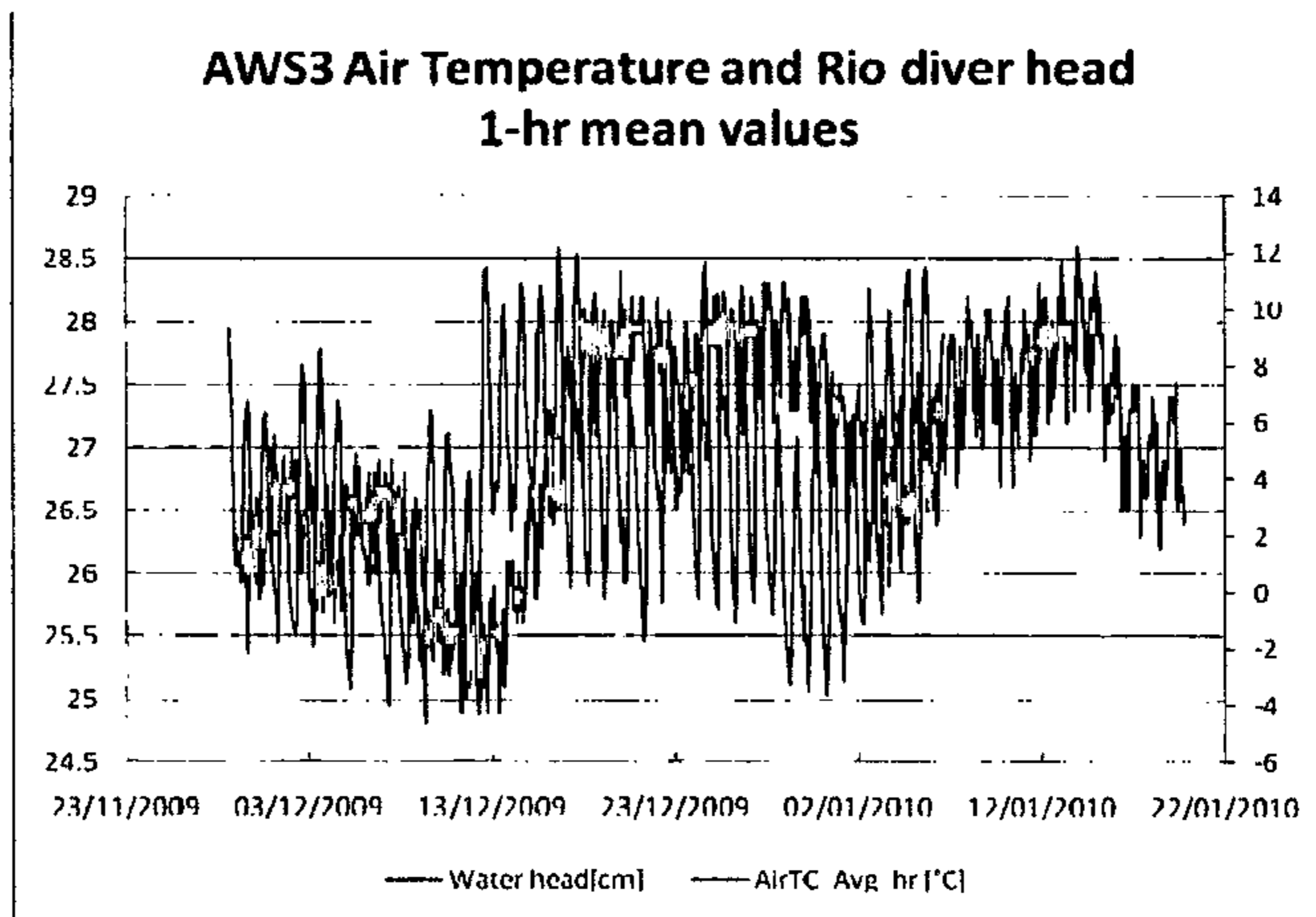


Figure 16. Temperatura del aire a AWS3 (rojo) y altura de agua en el río saliendo de la morrena (azul).



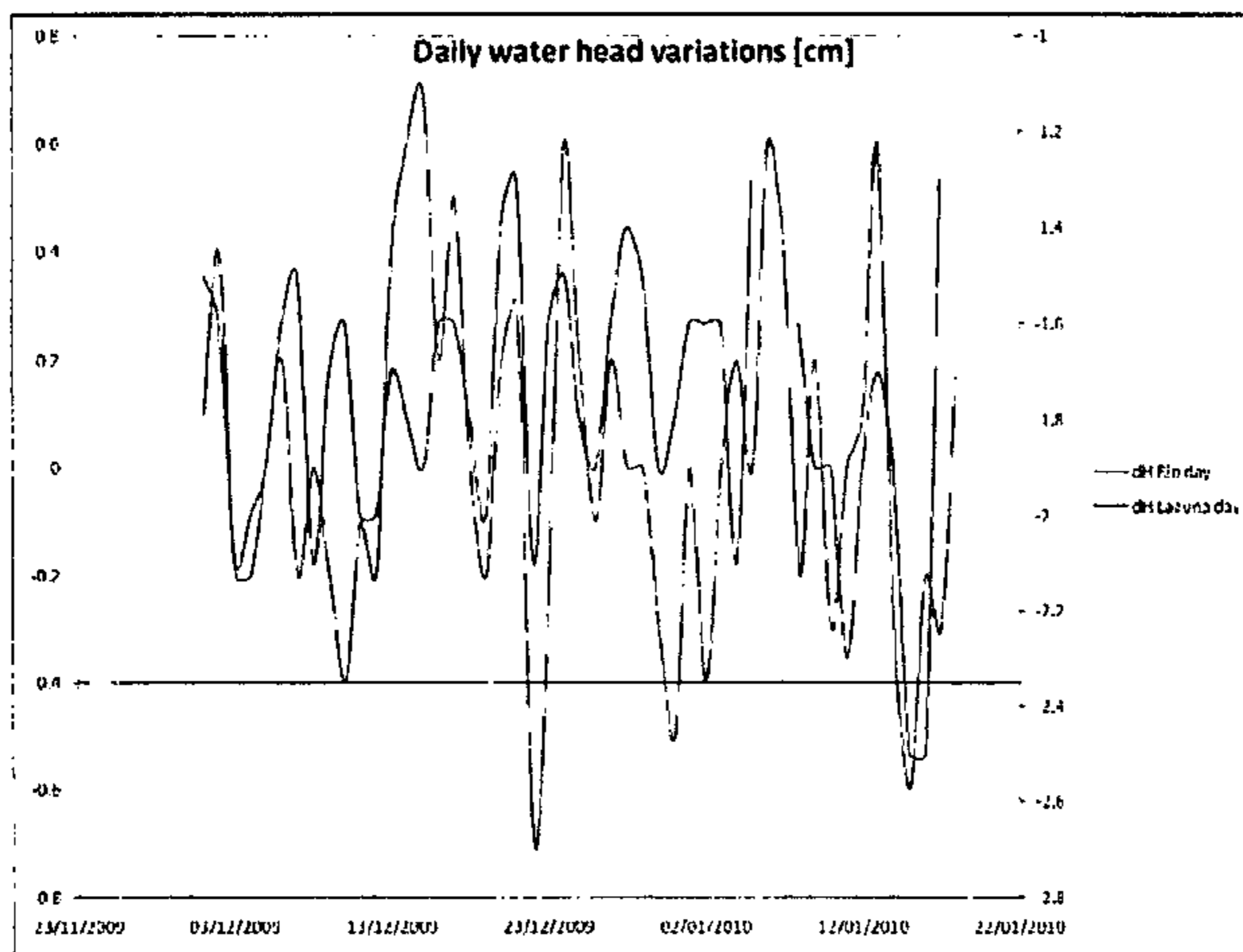


Figure 17. Variaciones diarias de altura de agua en el río (azul) y en la laguna (rojo)



Figure 18. Laguna sobre la morrena del glaciar Tapado (a) 23 de noviembre 2009 (b) el 8 de febrero, la laguna se ve vacía.

calcular a la escala del glaciar. Se calculó con un modelo de balance de energía valores promedios de -1.26 mm/día y -1.61 mm/día para el pie (aws2) y la cumbre (aws1) del glaciar. Extrapolando este gradiente de sublimación, $dS/dZ = 0.022 \text{ mm/100m}$, a la curva de hipsometría (figura 14) se obtiene un volumen anual perdida por sublimación de $701,120 \text{ m}^3$. Así, la razón promedio sublimación/ablación para el glaciar se estima a 37% (pero este valor aumenta hacia la cumbre y

disminuye hacia el pie del glaciar). Restando el volumen estimado de pérdida de masa por sublimación, la fusión se estima a 1,186,780 m³. La diferencia entre este valor y el volumen de agua que sale en el río (948,672 m³) puede ocurrir por la imprecisión del método usado: la estimación de cada valor contiene bastantes errores. Pero igualmente, los valores se comparan bastante bien. La diferencia podría ser atribuida a la porción de agua de fusión que se re-congela en el glaciar. Otra posibilidad es que parte del agua de deshielo sale por otro lado que el río y no fue medido. Un mejor monitoreo hidrológico se necesitará para finar el balance hídrico del glaciar.

INSTITUTO NACIONAL DE AGUAS
Comisión Recursos Hídricos
Área de Documentación

4.4 Sensores remotos

4.4.1 Detalles de la cámara automática

Al fin de noviembre se instaló una cámara fija en el filo frente al glaciar Tapado (ver ubicación en figura 1 y foto en figura 19). La cámara sacó tres fotos del glaciar y su entorno cada día, a las 10, 12 y 14 horas. Dos fotos, una al inicio de la temporada de medición y la otra al fin, son mostrados en la figura 20. Entre ambas imágenes se puede apreciar la desaparición de la nieve alrededor y sobre el glaciar, y la aparición del hielo con bastante polvo en el glaciar. En el futuro se clasificarán las imágenes para mapear nieve y hielo, y se calculará el albedo de superficie (Corripio, 2004).



Figure 19. Vistas de la cámara automática



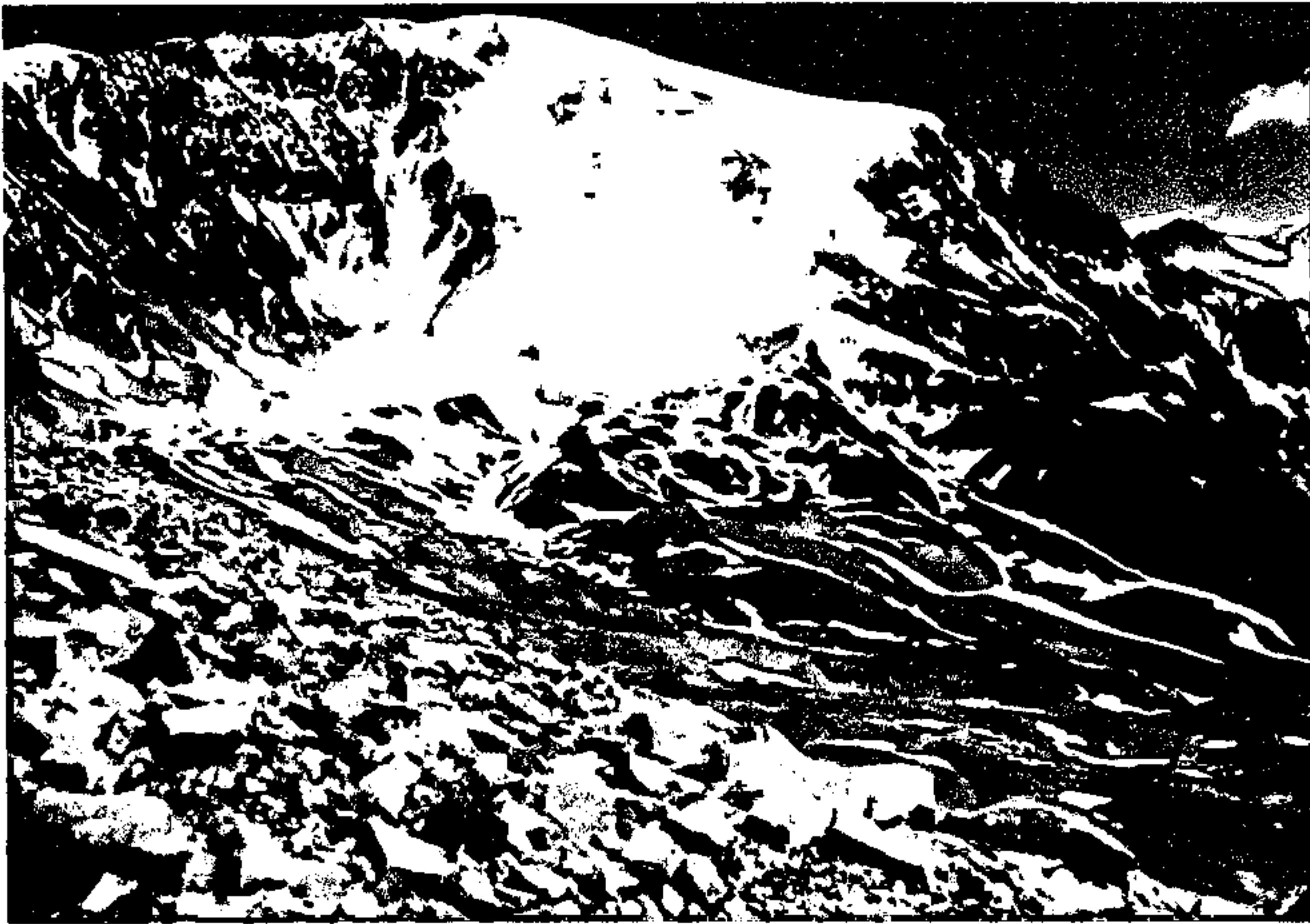


Figure 20. Fotos del glaciar Tapado sacados por la cámara automática (a) 27 de noviembre 2009; (b) 19 de febrero 2010

4.4.2 Selección de imágenes satelitales y análisis de DEM

Como parte de los objetivos del proyecto, se buscó fotos aéreas históricas e imágenes satelitales más recientes para el área del glaciar Tapado. Se encontró fotos aéreas de 1956 (figura 1) y 1978 para el área. Se obtuvo dos modelos digitales de terreno (MDT, o 'DEM') para el área (Tabla 6). El MDT más antiguo, de 1955, fue construido a partir de las curvas de nivel publicadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM). Dos MDTs más recientes, de 2000 y 2009, estaban disponibles públicamente. Los detalles de los diferentes MDTs son presentados en la tabla 7. Se realizó un estudio de los cambios de superficie entre los distintos MDTs para estimar el balance de masa geodésico del glaciar, entre 1955 y 2000 y entre 1955 y 2009. El balance de masa geodésico corresponde a la integración de los cambios de elevaciones a la superficie del glaciar, calculados por la diferencia entre dos MDTs (ver figura 21).

Los mapas de diferencia de altura sugieren que la superficie bajó significativamente en la parte inferior del glaciar, mientras que la parte más cercana a la Cumbre cambió menos. Sin embargo, considerando los cambios a la escala del glaciar el balance geodésico a lo largo de los últimos 50 años es casi neutro (0.66 m).

Tabla 7. Detalles de los MDTs utilizados en el estudio

Imagen / Data	Fuente	Año	Resolución / escala
IGM mapa topografica	Instituto Geográfico Militar (Chile)	1955*	1:50,000
SRTM DEM Version 4	USGS - NASA SRTM / CIAT	2000	90 m (3 arc second)
ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM)	METI and NASA	2009	30 m (1 arc second)



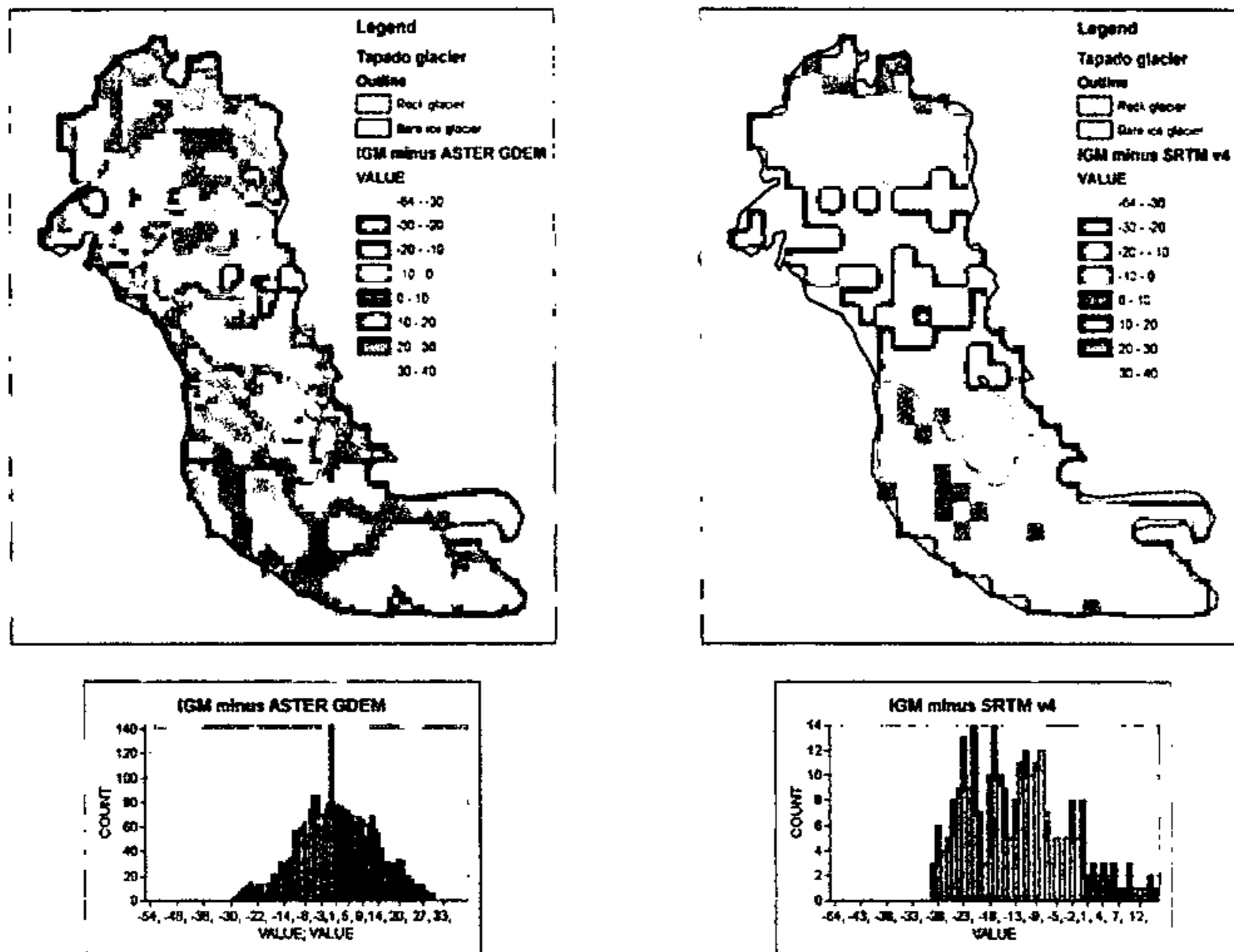


Figura 21. Sustracción entre (a) el MDT ASTER (2009) y el MDT IGM (1955); (b) el MDT SRTM (2000) y el MDT IGM (1955).

4.5 Balance de energía

Los modelos de balance de masa proveen herramientas para evaluar la variabilidad temporal de procesos como la acumulación de nieve, fusión, sublimación y recongelamiento sobre superficies glaciales; sea en forma puntual (por ejemplo: Mölg y Hardy, 2004) o distribuida sobre la superficie de hielo (Mölg et al., 2008). También los modelos de balance de masa permiten comparar mediciones de acumulación con un modelo de balance de energía, el que es utilizado para calcular la ablación sobre la superficie del cuerpo de hielo en función de la energía disponible en el lugar (Oke, 1987; Paterson, 1994). La disponibilidad de energía depende de los flujos de calor radiativos (Q^*), flujos turbulentos sensibles (Q_H) y latentes (Q_E) flujos de calor superficiales y sub-superficiales (Q_G) (van den Broeke et al., 2005), de acuerdo a:

$$Q_M = Q^* + Q_H + Q_E + Q_G \quad (1)$$

Donde: Q_M es la energía disponible para fusión, proceso que ocurrirá cuando existe un superávit neto de energía; mientras que un déficit neto llevará a procesos de *acumulación por depositación directa de hielo a través de flujos positivos de calor latente* (de haber agua disponible). A la inversa, ocurrirán procesos de sublimación cuando los flujos de calor latente sean negativos.

En este trabajo se usó un modelo de balance de masa puntual para estudiar la influencia de las condiciones meteorológicas sobre los procesos de ablación del glaciar tapado. En un segundo tiempo se usó dicho modelo para predecir condiciones en el glaciar tapado bajo escenarios de cambios climáticos. Para este trabajo se utilizó el modelo de balance de masa desarrollado por Mölg et al. (2008) para calcular flujos de energía y masa en dos puntos del glaciar Tapado. Estos resultados son validados por medio de mediciones con sensores de distancia ultrasónicos para altura de nieve (SR50).

4.5.1 El modelo

El modelo de Mölg et al. (2008) compara el registro de nieve caída del sensor SR50 (sensores de distancia ultrasónicos) de la respectiva estación meteorológica automática con los resultados modelados de ablación, y así calcula los cambios de masa a través del período de estudio. La ablación es modelada por medio de un modelo de balance de energía (Ecuación 1), el que considera flujos de radiación neta, flujos turbulentos de calor, y flujos sub-superficiales de calor para calcular los montos de fusión y sublimación de acuerdo a la Ecuación 1. El balance de energía es calculado para intervalos de una hora en cada punto, luego promediado y sumado para obtener estadísticas mensuales. Para cada intervalo de una hora, la ablación específica es calculada con valores negativos de flujos turbulentos ($Q_L \times L_s^{-1}$ para $T_s < 0^\circ\text{C}$, $Q_L \times L_v^{-1}$ para $T_s = 0^\circ\text{C}$). Además, la ablación causada por fusión también es estimada para estos intervalos cuando existe un valor positivo para Q_M y $T_s = 0^\circ\text{C}$ ($Q_M \times L_M^{-1}$; donde: L_M es el calor latente de fusión (0.334 MJ kg^{-1})). La sublimación es calculada de acuerdo al comportamiento de los flujos de calor latente, cuando estos son menores que 0 (cero) eso implica que existe energía disponible para sublimación, cualquier monto de energía adicional a los flujos de calor latente se utilizarán en fusión del hielo. Sin embargo, en el cálculo final de la fusión en superficie la fusión solo aparece como pérdida de masa si representa masa removida directamente desde el lugar (p. Ej.: como escurrimiento que no es recongelado).



4.5.2 Resultados de la modelación

La figura 22 muestra la ablación modelada (rojo) con la ablación medida por los sensores de altura de superficie (SR50). En las estación 2 los valores modelados se ajustan bien los valores observados. En la estación 1 (cumbre) el ajuste es malo ya que giró la estación, y por eso la superficie muestra una subida entre el inicio de enero y la mitad de marzo. Pero de manera general las tasas de ablación modeladas corresponden bien con las observadas. El valor total modelado a la aws1, 0.41 m.a.e., es más que estimado a partir de los cambios de emergencia a una estaca cerca de la aws1, pero la estaca se encontró entre penitentes.

Los promedios mensuales de flujos de calor se presentan en las tablas 8-9 mientras que los flujos de masa resultantes se presentan en las tablas 10-11. Los valores también se presentan gráficamente en las figuras 23-26.

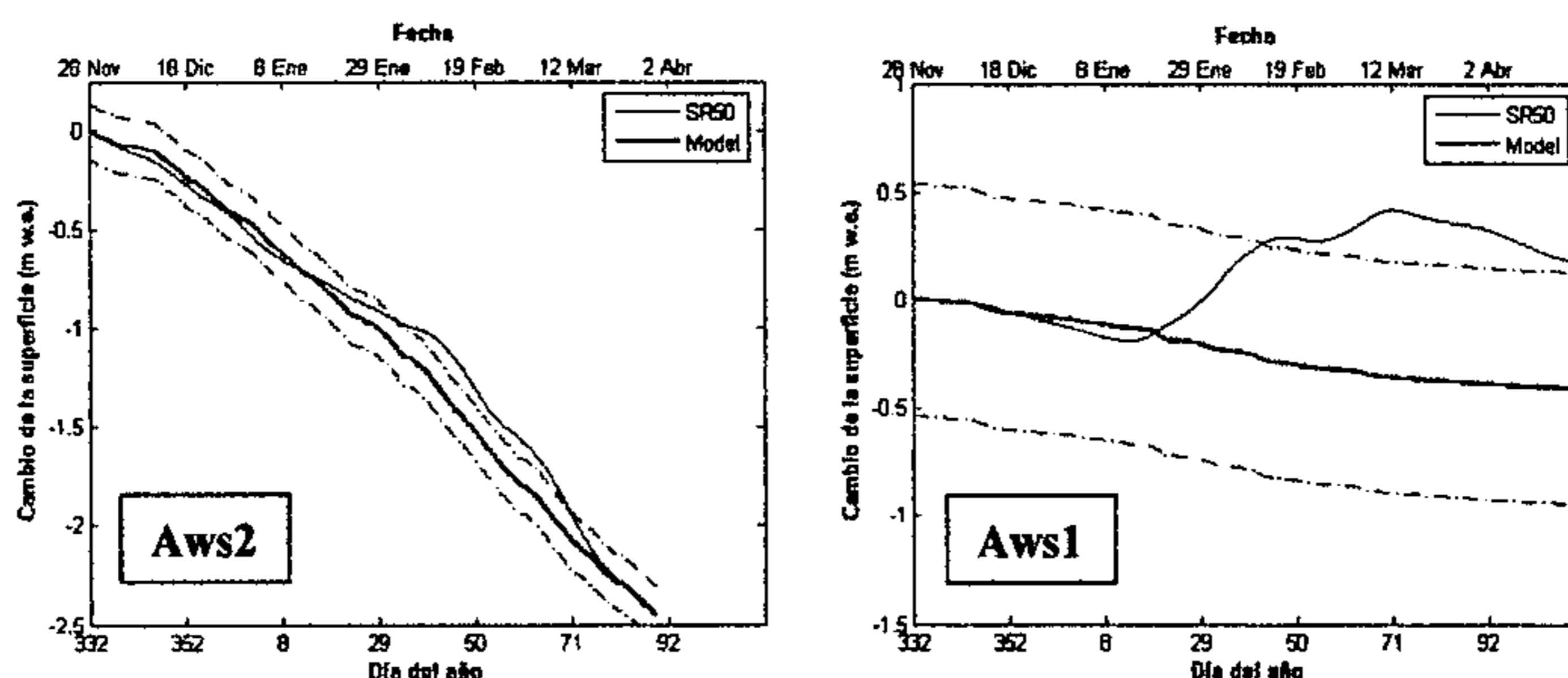


Figura 22. Ablación medida por el sensor SR50 (azul) y modelada (rojo). Nota que la subida en la aws1 ocurrió por el giro de la estación.

Tabla 8. Promedio mensual de flujos de calor, calculados por medio del modelo de balance de energía para la estación 1(cumbre), entre noviembre de 2009 y marzo de 2010

Mes	Neta de onda corta (W m ⁻²)	Albedo	Neta de onda larga (W m ⁻²)	Flujo de calor sensible (W m ⁻²)	Flujo de calor latente (W m ⁻²)	Temperatura superficial (°C)	Flujos de calor subsuperficiales (W m ⁻²)
Noviembre ¹	108.4	0.67	-62.5	-7.3	-48.0	263.6	10.1
Diciembre	148.4	0.59	-84.6	7.8	-62.0	264.5	-5.2
Enero	159.1	0.56	-84.4	1.9	-57.5	267.1	-10.0
Febrero	161.4	0.55	-92.6	8.3	-62.8	266.3	-7.2
Marzo	139.2	0.54	-97.1	13.2	-50.3	265.0	-3.1
Abril ²	96.0	0.46	-77.5	6.6	-32.0	262.0	6.4
Promedio	142.7	0.54	-87.4	7.4	-53.9	265.1	-4.2

¹ Solo entre 28 - 30 noviembre de 2010

² Solo entre 1 - 22 Abril 2010 ³ Promedio para todo el period



Tabla 9. Promedio mensual de flujos de calor, calculados por medio del modelo de balance de energía para la estación 2 (plateau), entre noviembre de 2009 y marzo de 2010

Mes	Neta de onda corta (W m ⁻²)	Albedo	Neta de onda larga (W m ⁻²)	Flujo de calor sensible (W m ⁻²)	Flujo de calor latente (W m ⁻²)	Temperatura superficial (°C)	Flujos de calor subsuperficiales (W m ⁻²)
Noviembre ¹	152.3	0.59	-64.4	8.4	-51.0	266.6	10.7
Diciembre	194.7	0.49	-80.4	12.1	-52.3	269.0	-28.4
Enero	206.3	0.44	-74.3	10.9	-34.4	270.0	-36.5
Febrero	250.8	0.27	-82.3	9.4	-33.9	269.7	-47.2
Marzo ²	228.8	0.21	-88.8	9.5	-32.5	268.8	-35.9
Promedio	217.6	0.36	-80.9	10.5	-38.8	269.3	-35.6

¹ Solo entre 28 - 30 Noviembre

² Hasta el 29 marzo

³ Promedio para el periodo

Tabla 10. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, calculada por medio del modelo de balance de energía sobre la estación 1 (cumbre) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010

Mes	Fusión (mm.a.e)	Sublimación (mm.a.e)	Recongelamiento (mm.a.e)	Ablación neta (mm.a.e)
Noviembre ¹	0.5	3.0	0.5	3.0
Diciembre	36.7	59.4	8.2	87.9
Enero	71.5	55.1	0	126.6
Febrero	51.9	54.4	0	106.3
Marzo	16.4	47.6	0	64.0
Abril ²	0	21.3	0	21.3
Total	177.0	240.8	8.7	409.1

¹ Solo entre 28 - 30 noviembre de 2010

² Solo entre 1 - 22 Abril 2010

Tabla 11. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, calculada por medio del modelo de balance de energía sobre la estación 2 (plateau) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010

Mes	Fusión (mm.a.e)	Sublimación (mm.a.e)	Recongelamiento (mm.a.e)	Ablación neta (mm.a.e)
Noviembre ¹	43.9	5.1	5.7	43.3
Diciembre	364.9	52.2	0.3	416.7
Enero	575.6	35.0	0	610.6
Febrero	702.2	31.2	0	733.4
Marzo ²	608.3	30.7	0	639.0
Total	2294.9	154.2	6.0	2443.0

¹ Resultados sólo entre 28 - 30 Noviembre

² Resultados hasta 29 Marzo



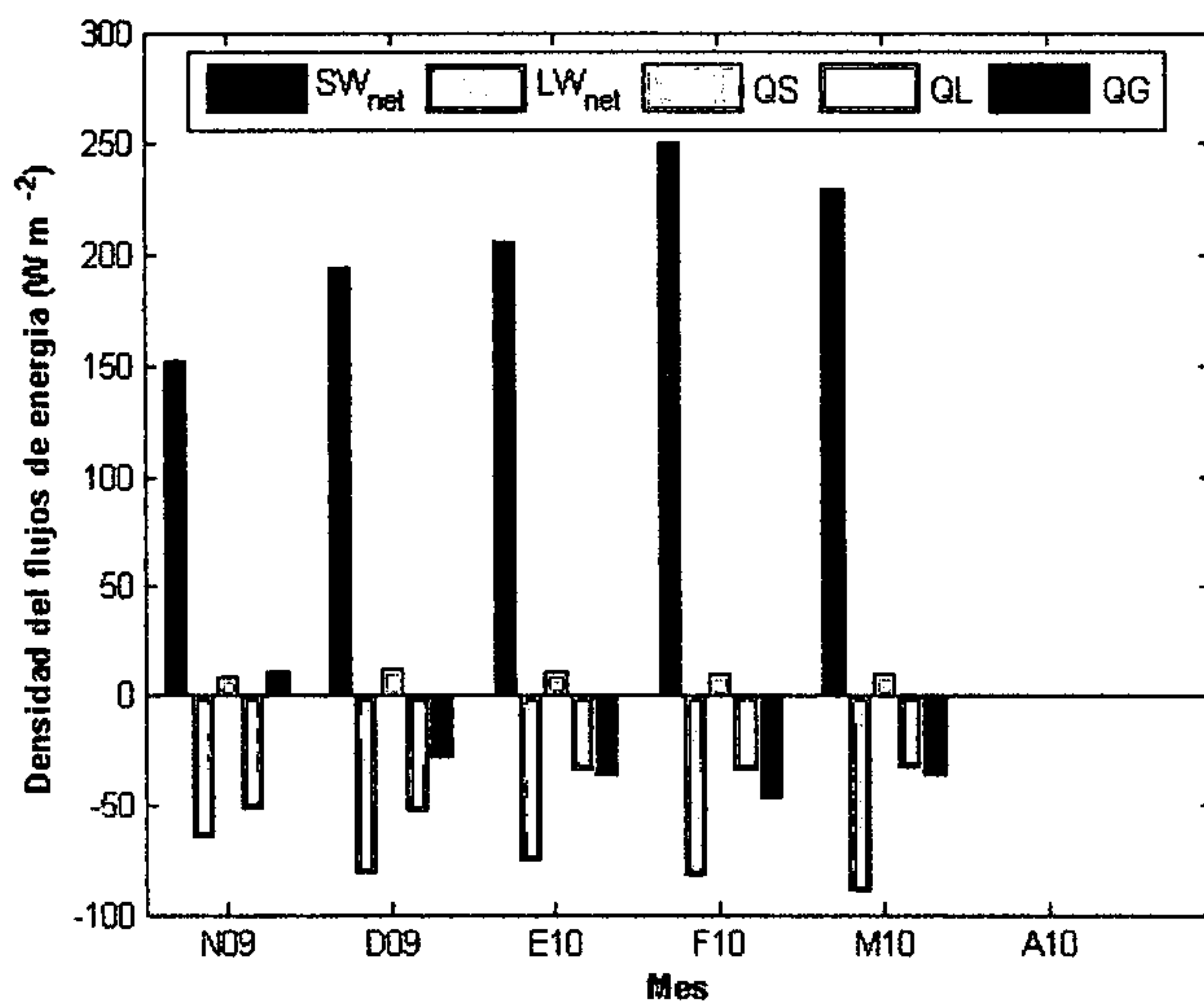


Figure 23. Flujos netos de energía promedio para estación 2 (Plateau) durante el período entre noviembre de 2009 y marzo 2010.

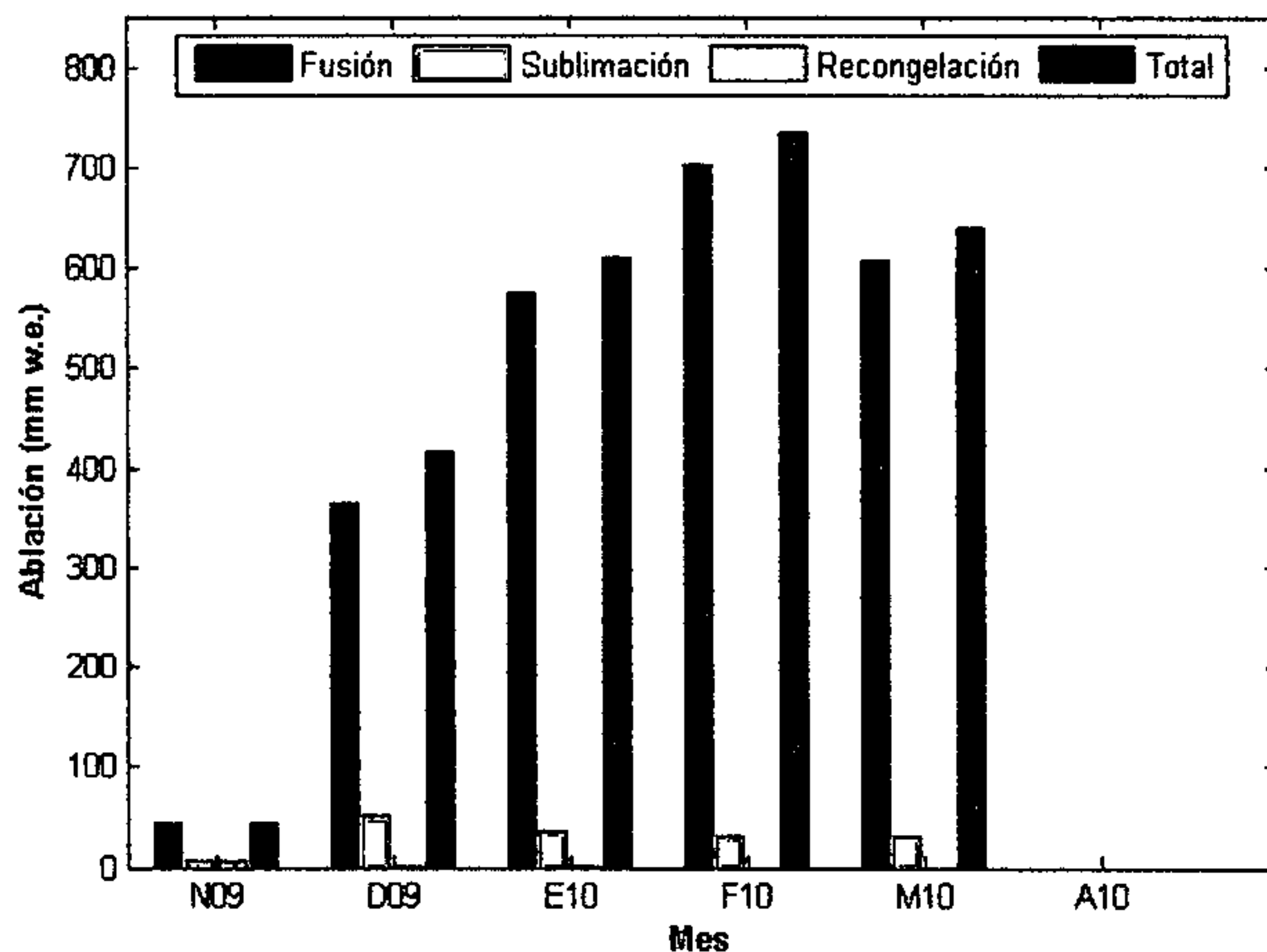


Figura 24. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, en estación 2 (Plateau) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010.



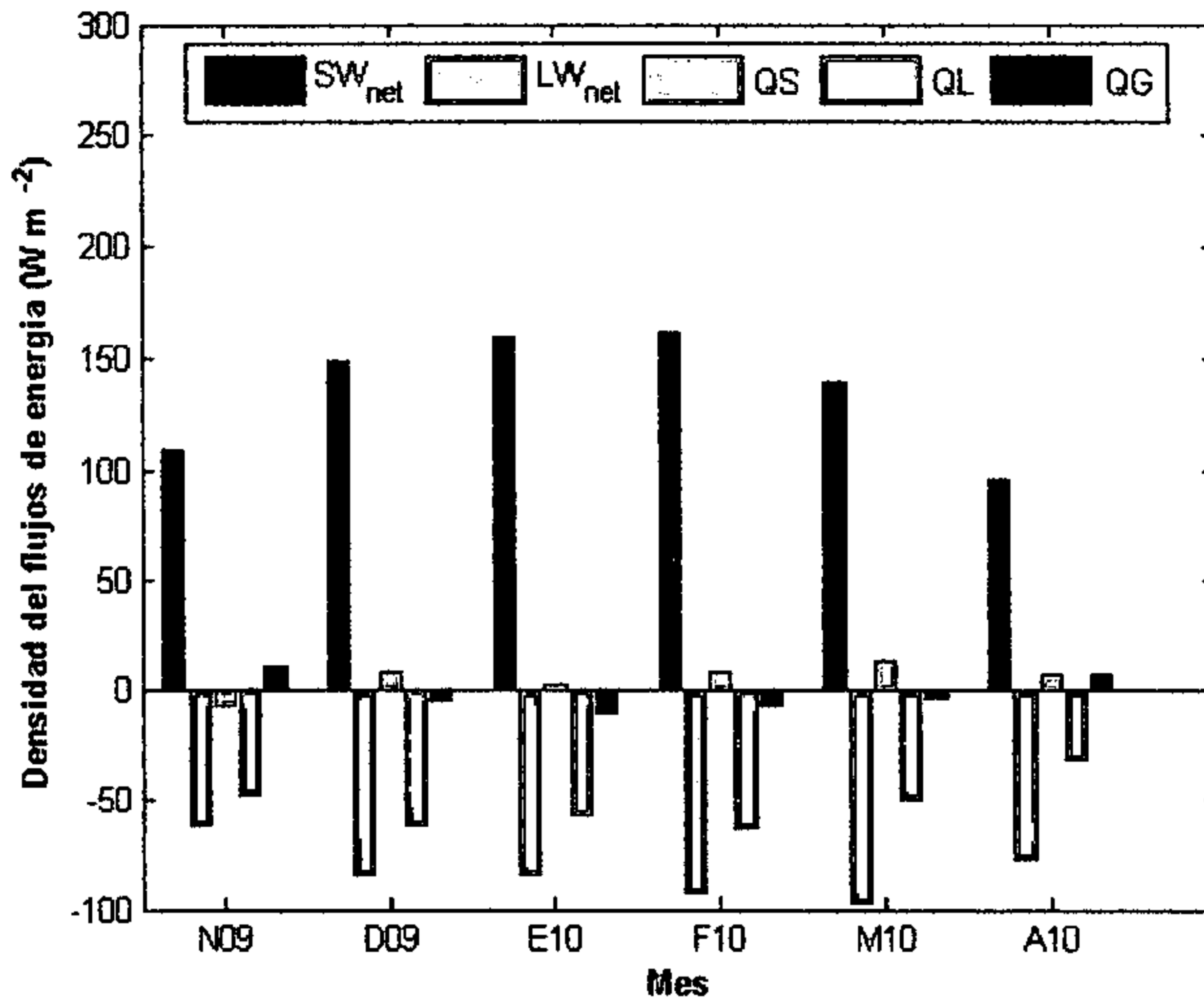


Figura 25. Flujos netos de energía promedio para estación 1 (cumbre) durante el periodo entre noviembre de 2009 y marzo 2010.

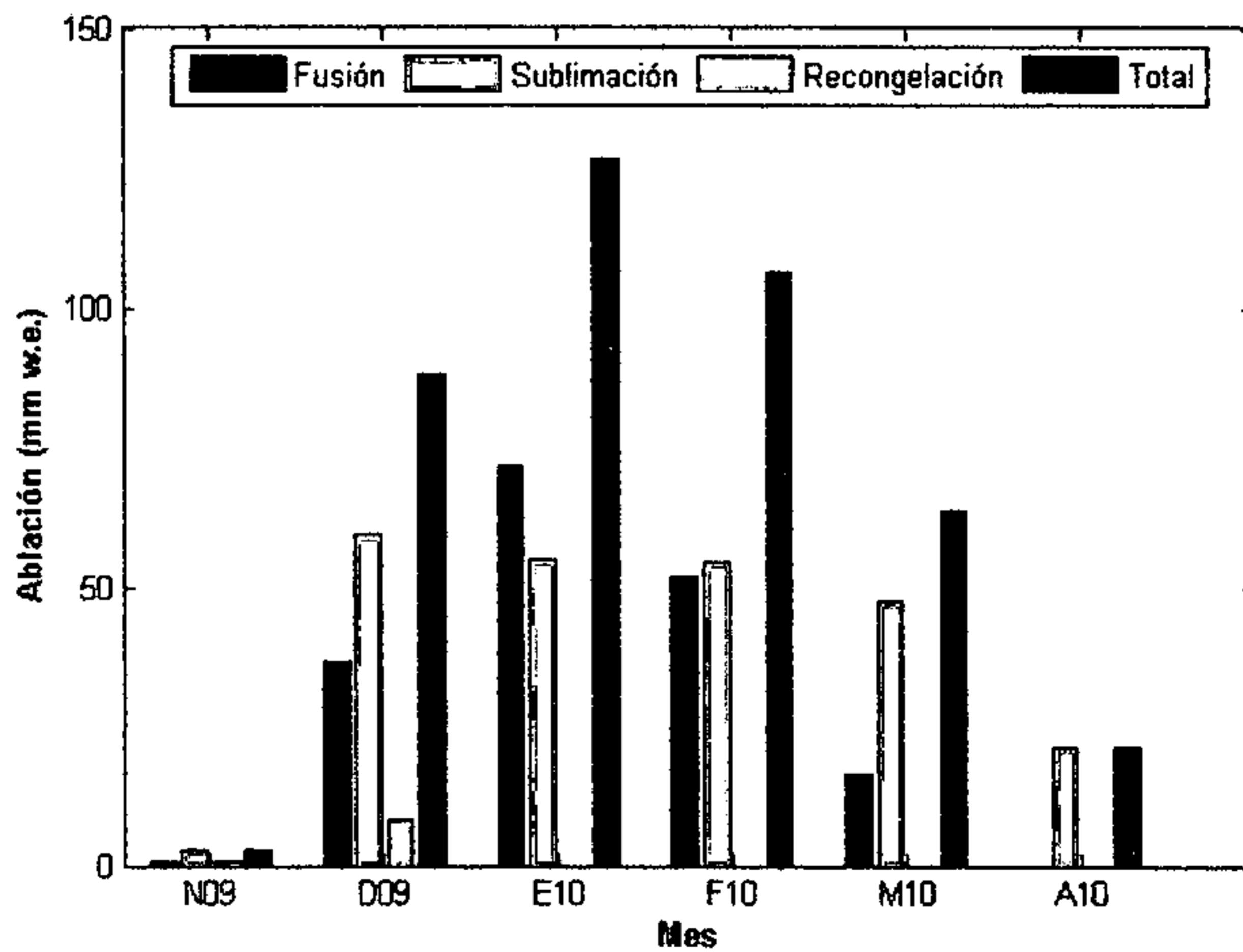


Figura 26. Valores totales mensuales de fusión, sublimación, recongelamiento y ablación neta, en estación 1 (cumbre) entre noviembre de 2009 y marzo de 2010.

En la parte baja del glaciar, la fusión domina la ablación. Solo 6.3% de la ablación se pierde por sublimación, contra 93.7 % perdida por fusión y escurrimiento de agua. En *contraste, en el sector de la cumbre, unos 58% de la ablación se pierde por sublimación y unos 42% por fusión*. El modelo indica que solo 2.1% de la masa perdida por ablación se recongela. Eso implica que unos 40% de la ablación se pierde por escurrimiento de aua. El estudio del testigo de hielo sacado de la cumbre del glaciar en 1999 indicó que la fusión es limitada allí y que la mayoría del agua de fusión se recongela en la nieve/neviza. La discrepancia entre estas dos observaciones podría sugerir que las condiciones en el verano de 2009 están más caloroso que en 1998-99 y que hoy se pierde masa por fusión aún en el sector alto del glaciar.

4.5.3 Efecto del cambio climático futuro

Escenarios climáticos para la región del glaciar Tapado fueron obtenidos por un proceso de regionalización estadística de proyecciones de modelos de circulación general (IPCC, 2007). Tres escenarios diferentes fueron considerados:

1. Escenario B1: El escenario mas conservador para la emisión futura de gas de efecto invernadero. Según este escenario la temperatura en el sector del glaciar Tapado podría subir hasta 2°C en 2080 y las precipitaciones bajarían un 16% en comparación con el promedio actual (~0,54 m.a.e por año, para 1962-99, reconstruido a partir del testigo de hielo por Ginot et al, 2006).
2. Escenario A1B: El escenario el mas usado, correspondiente a un seguimiento de las emisiones, pero de manera controlada. Este escenario resultaría en un calentamiento de 3°C en 2080 y una disminución de precipitaciones de 18.6%.
3. Escenario A2: Es el escenario más pesimista, correspondiendo a un seguimiento de las emisiones pero de manera incontrolada. Este escenario resultaría en un calentamiento de 3.5°C en 2080 y una disminución de precipitaciones de 23.5%.

Las tasas de calentamiento y de cambios relativos de precipitaciones son los promedios de 16 modelos independientes. La variabilidad en las predicciones entre los modelos es mas fuerte para las precipitaciones que para la temperatura (Figura 27) pero casi todos los modelos para los tres escenarios climáticos predicen disminuciones en las precipitaciones mientras que se calienta el clima.

Para cada escenario climático el modelo de balance de masa (energía) fue corrido usando las condiciones climáticas actuales, pero con un cambio en las temperaturas correspondiente al escenario (2-3.5°C). La humedad relativa del aire se conservó constante, lo que significa que la humedad especifica (absoluta) fue ajustada para



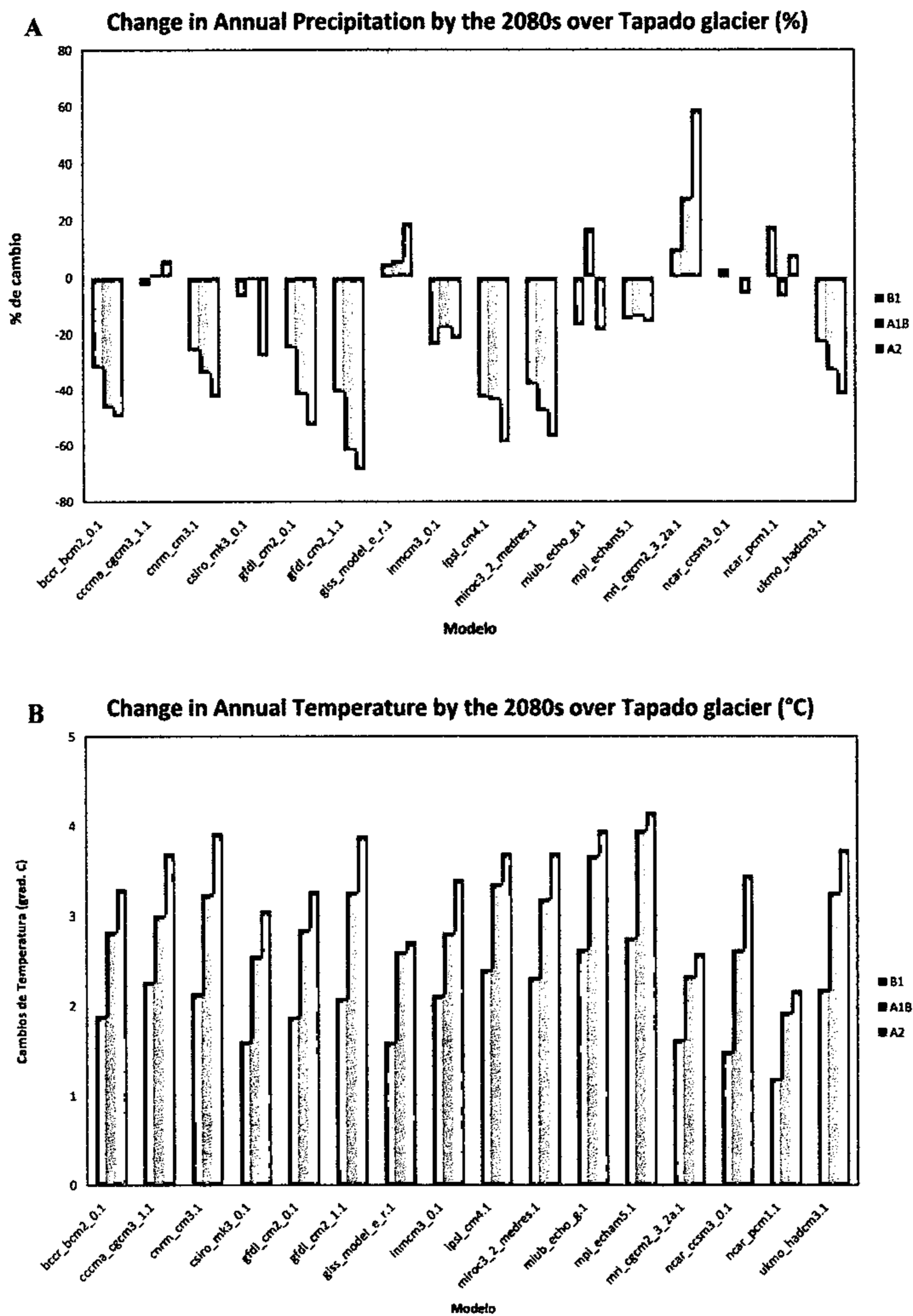


Figure 27. Proyecciones climáticas para el año 2080 sobre el glaciar Tapado, obtenidos por regionalización estadística de 16 modelos de circulación general (IPCC, 2007). (A) Cambios de temperatura del aire, (B) Cambios de precipitaciones (en del promedio actual).



acomodar el aumento en contenido de vapor de agua (ver Corripio et al, 2008). Este ajuste es necesario ya que con el calentamiento del aire, el aire puede contener mas agua, y además, la temperatura del mar también aumenta y hace que mas agua esté disponible para ser transportada hacia la cordillera. Las otras variables meteorológicas no fueron cambiadas (radiación, viento). Los cambios en precipitaciones no fueron consideradas directamente en el modelo ya que no disponemos de suficiente de información sobre la cantidad y distribución de nieve sobre el glaciar.

Para los tres escenarios considerados, las tasas de ablación aumentan debido a un aumento en las tasas de fusión (tablas 12-13). Por ejemplo, bajo el escenario A2, el aumento de la temperatura de 3.5°C causa 1.8 veces más ablación en el lugar de la estación 1 en la cumbre que ocurre al presente. En el lugar de la estación 2 (Plateau= ocurriría 1.2 veces más fusión que ocurre al presente. Mientras que los cambios de temperatura son importantes a baja elevación, el impacto es mayor en las partes altas del glaciar porque el aumento de temperatura permite al flujo de calor de superficie ser positivo (hacia el glaciar), y eso favorece la fusión. La proporción de ablación ocurriendo por fusión también aumenta con la temperatura (tablas 14) para todos los escenarios, lo que favorece la producción de agua de deshielo.

Tabla 12. Ablación actual (BAU) y predicha a la estación 2 (Plateau) bajo tres escenarios de cambio climático.

	BAU ¹	B1	A1B	A2
Fusión	2295	2623	2761	2823
Sublimación	154	118	104	98
Recongelamiento	6	5	5	5
Ablación neta	2443	2735	2860	2917

¹ 'Business as usual' (no cambios)

Tabla 13. Ablación actual (BAU) y predicha a la estación 1 (Cumbre) bajo tres escenarios de cambio climático.

	BAU ¹	B1	A1B	A2
Fusión	177	356	481	548
Sublimación	241	229	219	213
Recongelamiento	9	15	16	15
Ablación neta	409	570	684	745

¹ Business as usual (no cambios)



Tabla 14. Razón fusión/ablación asumiendo no recongelamiento y cambios en la producción de agua de deshielo bajo tres escenarios de cambio climático.

	AWS2 Ratio fusión : ablación	Cambios en producción de agua de deshielo desde 2009/2010 (mm a.e.)	AWS1 Ratio fusión : ablación	Cambios en producción de agua de deshielo desde 2009/2010 (mm a.e.)
BAU	93.7	-	42	-
B1	95.7	328	61	179
A1B	96.4	466	69	304
A2	96.6	529	72	371

Según los escenarios es probable que bajen las precipitaciones durante los próximos 70 años en la zona del glaciar Tapado. La disminución de las precipitaciones, combinado al aumento de las tasas de ablación, mayormente por fusión, disminuiría fuertemente el balance de masa del glaciar. La respuesta dinámica del glaciar a un balance de masa negativo sostenido será un retroceso general del glaciar. Así que la repuesta inicial del glaciar a un calentamiento será un aumento en la producción de agua de deshielo, pero mientras que el balance de masa vuelve mas negativo el área del glaciar también disminuiría, lo que resultara en una contribución hidrológica reducida en el futuro.

5. Conclusiones

Este estudio ha permitido caracterizar las condiciones meteorológicas sobre y alrededor de un glaciar representativo de la zona semiárida de la región Norte Chico en Chile. Además, los resultados han permitido evaluar el balance de masa actual del glaciar así que su contribución hidrológica aproximada. Un modelo de balance de masa fue aplicado a los datos meteorológicos en la cumbre y en el pie del glaciar para modelar la ablación. Mientras que la sublimación domina la pérdida de masa en el sector de la cumbre, (59%), la fusión y así la producción de agua de deshielo domina la parte inferior del glaciar. El modelo fue corrido bajo tres escenarios de cambio climático en la zona: en los tres escenarios la temperatura sube, lo que causa un aumento importante de la fusión en la parte alta del glaciar. Eso causa un aumento en la producción de agua de deshielo. Una reducción en las precipitaciones acompaña el calentamiento global en los tres escenarios. Combinado con el aumento de la ablación, las condiciones más secas resultarán en un balance de masa más negativo para el glaciar. Mientras que la producción de agua de deshielo debería aumentar inicialmente bajo un calentamiento, la reducción del área y volumen del glaciar en repuesta a un balance de masa negativo sostenido resultara en una contribución hidrológica reducida en el futuro.



Lista de participantes al proyecto

Dr. Christophe Kinnard, investigador glaciología y director de proyecto

Dr. Simon Gascoin, investigador hidrología

Dra. Shelley MacDonell, investigador postdoctorado glaciología,

José Araos, profesional glaciología y SIG

Jorge Marín, profesional glaciología y SIG

Roberto Garrido, técnico glaciología

Rodrigo Ponce, técnico glaciología

José-Luis Castro, técnico glaciología

Sébastien Monnier, investigador postdoctorado, geomorfología

Visitantes:

Dr. Mike Demuth, investigador glaciología, Geological Survey of Canada, Canada

Dr. Luke Copland, investigador glaciología, University of Ottawa, Canada

Dr. Hervé Jourde, investigador hidrología, Université de Montpellier, France

Nicolas Brisset, estudiante, Université de Montpellier, France

Romain Rochette, estudiante, Université de Montpellier, France

Adrienne White, estudiante, University of Ottawa



Centro de Estudios Avanzado en Zonas Áridas (CEAZA)

Casilla 599 – La Serena – Chile

Fono 56-51-204378 – Fax 56-51-334741

E-mail ceaza@userena.cl

<http://www.ceaza.cl>

Referencias

- Corripio, J. G. (2004). Snow surface albedo estimation using terrestrial photography. *International Journal of Remote Sensing*, 25(24), 5705–5729.
- Corripio, J. and R. Purves (2005). Surface energy balance of high altitude glaciers in the Central Andes: the effect of snow penitentes. *Climate and hydrology in mountain areas*, 15 (2005).
- Corripio, J, Purves, R. and Rivera, A. (2008): "Modeling climate-change impacts on mountain glaciers and water resources in the Central Dry Andes". In: Orlove, B., Wiegandt, E. & Luckman, B. (Eds.). *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science and Society*, University of California Press, USA, p. 126-135.
- Mölg, T., Cullen, N., Hardy, D.R., Kaser, G., and Klok, L. (2008), Mass balance of a slope glacier on Kilimanjaro and its sensitivity to climate, *International Journal of Climatology*, 28, 881–892, doi:10.1002/joc.1589.
- Favier, V., M. Falvey, A. Rabatel, E. Praderio, and D. López (2009), Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S), *Water Resour. Res.*, 45, W02424, doi:10.1029/2008WR006802.
- Ginot, P., C. Kull, U. Schotterer, M. Schwikowski, and H. W. Gaggeler (2006). Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes). *Climate of the Past*, 2, 21-30.
- Kull, C., Grosjean, M., and Veit, H. (2002). Modeling Modern and Late Pleistocene glacio-climatological conditions in the North Chilean Andes (29 S–30 S), *Climate Change*, 52(3), 359–381.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

