

Aplicación de láser escáner terrestre para el análisis de la distribución espacial del manto de nieve en ambientes subalpino y forestal del Pirineo

Jesús Revuelto Benedí



Trayectoria científica:

Noviembre 2007- Enero 2009. Beca de colaboración y Beca del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Beca de Iniciación a la investigación. Proyecto: “Inteligencia ambiental aplicada a la agricultura de precisión”. Grupo de Diseño Electrónico, Universidad de Zaragoza.

Febrero 2009-Septiembre 2010. Beca de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

Beca de formación de postgraduados. Proyecto: “Adaptación y puesta en marcha de la cadena de predicción de Avalanchas Safrán/Crocus/Mepra en colaboración con MeteoFrance”. Delegación Territorial de AEMET en Aragón.

Trayectoria científica:

Septiembre 2011-Agosto 2015: Beca pre doctoral FPU del ministerio de Educación. Departamento Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Director: **Juan Ignacio López Moreno**

- **Julio 2014- Diciembre 2013:** Visitante Pre-doctoral FPU. Estancia de investigación en el Centre d'Études de la Neige (CNRM-MeteoFrance), Grenoble, Francia.
- **Septiembre 2013- Octubre 2013:** Visitante Pre-doctoral FPU. Estancia de investigación en el WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Davos Suiza.

Desde Noviembre de 2015:

Programme de recherche sur la prévision des crues de l'Arve à Chamonix.

- *Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE), CNRS/UJF*
- *Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie en Environnement IRD / UJF-Grenoble 1 / CNRS / G-INP, LTHE UMR 5564,*
- *Centre d'Etude de la Neige, CNRM-GAME, Météo France -CNRS*

Aplicación de láser escáner terrestre para el análisis de la distribución espacial del manto de nieve en ambientes subalpino y forestal del Pirineo

Jesús Revuelto Benedí



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión

4. Utilización de datos TLS para la mejora de simulaciones del manto de nieve

5. Influencia del bosque en la evolución espacial del manto de nieve

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

El glaciar de Monte Perdido: Monitorización y estudio de su dinámica actual y procesos criosféricos asociados como indicadores de procesos de cambio global.



Escuela Politécnica
Superior - Huesca
Universidad Zaragoza



Universidad de Valladolid



universidad
del país vasco

euskal herriko
unibertsitatea



Centre
Tecnològic
de Telecomunicacions
de Catalunya

J.I. López-Moreno ¹, J.M. García-Ruiz ¹, C. Azorín-Molina ¹, J. Revuelto ¹, A. Serreta ², E. Serrano-Cañada ³, I. Rico ⁴, M. Del Río ⁵, O. Monserrat ⁶, G. Luzi ⁶

1. Dep. Procesos Geoambientales y Cambio Global. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC.

2. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza

3. Dep. Geografía. Universidad de Valladolid

4. Dep. de Geografía, Prehistoria y Arqueología. Universidad del País Vasco

5. Escuela Politécnica de Cáceres. Universidad de Extremadura

6. Geomatic Division. Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

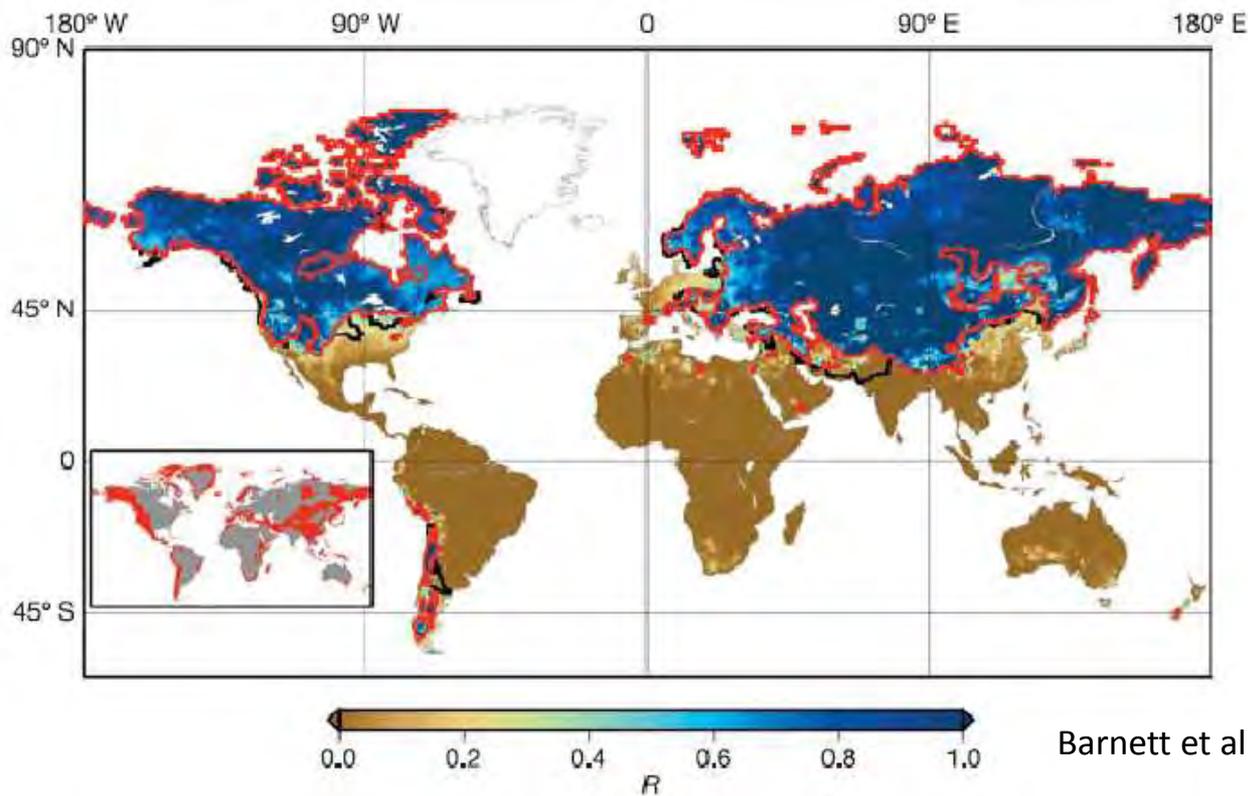
Introducción y objetivos: La importancia de la nieve en la Tierra

El manto de nieve en invierno cubre un **40%** de la **superficie** del hemisferio Norte.

Un sexto de la población mundial depende de la acumulación de agua en estado sólido. (Barnett et al. 2009).

Procesos ambientales se relacionan con la evolución espacio-temporal de la nieve: erosión, ciclos ecológicos de animales y vegetales, evolución de la criosfera,...

En el contexto de **cambio global** la **acumulación y fusión de nieve** se verán marcadamente **afectados** (López- Moreno et al., 2011).



Introducción y objetivos: La nieve en zonas de montaña

En **latitudes medias** las **acumulaciones** significativas de **nieve** ocurren en **zonas de montaña**.
La **topografía** de las zonas de montaña es muy **heterogénea**.



Introducción y objetivos: La nieve en zonas de montaña

La **topografía** y la **vegetación** influyen en la **distribución espacial y temporal del manto de nieve** (Anderton et al., 2004; Trujillo et al., 2007, López-Moreno et al., 2011, Lundquist et al., 2013).

¿Escala espacial y temporal?



>100km



~km



~hm-m



~m-dm

Los procesos que controlan la evolución del manto de nieve en zonas de montaña, debido a su complejidad, aún siguen sin comprenderse en detalle.

Introducción y objetivos: La nieve en zonas de montaña

Es necesario disponer de **información del manto de nieve en zonas de montaña** para mejorar el conocimiento de su evolución espacio-temporal.



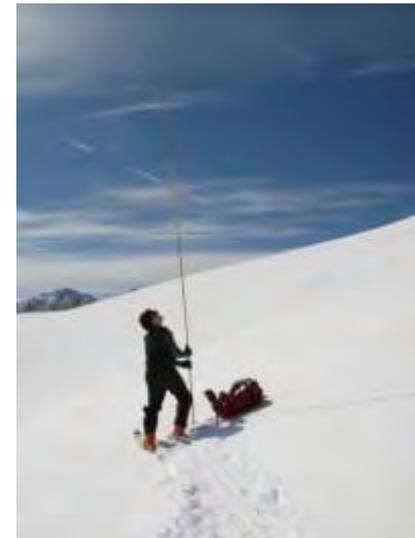
¿Cómo medir la distribución del manto de nieve?

- Mediciones manuales
- Teledetección

Satélites
LiDAR



“Fotografías” de
un instante
preciso



¿Qué variables podemos medir?

- Hidrología: Espesor, densidad, extensión espacial
- Avalanchas: Tipo de grano, resistencia, gradiente térmico...
- Ecología: persistencia temporal
- Indicador climático

Introducción y objetivos: La nieve en zonas de montaña

Es necesario disponer de **información del manto de nieve en zonas de montaña** para mejorar el conocimiento de su evolución espacio-temporal.

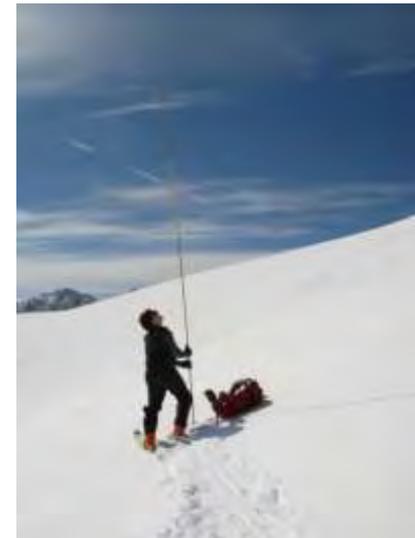
¿Cómo medir la distribución del manto de nieve?

- Mediciones manuales
- Teledetección

Satélites
LiDAR



“Fotografías” de
un instante
preciso



La evolución del manto de nieve es simulada con distintas aproximaciones:

- Estadística espacial (McCreight et al., 2012; Winstral y Marks 2014).
- Índices de temperatura (Brubaker et al., 1996, Hock, 2003).
- Modelos de base física (Barlelt and Lehning 2002, Brun et al., 1992, Herrero et al., 2009).

Introducción y Objetivos

El manto de nieve se describe por un gran número de variables.

Desde un punto de vista hidrológico, la variable más importante es el *Snow Water Equivalent* (SWE): Producto espesor de nieve y densidad.

Actualmente no es posible medir la distribución espacial de la densidad ni del SWE.

La variabilidad espacial del espesor de nieve es mayor que la de la densidad (Marchand y Killingtveit, 2004; Mizukami y Perica, 2008; Pomeroy y Gray, 1995).



La variabilidad espacial del SWE está fuertemente influida por la del espesor de nieve.

Introducción y objetivos: ¿Qué, dónde y porqué?

Estudiar la **dinámica actual del manto de nieve a pequeña escala (< 100ha) en dos ambientes característicos de los Pirineos**, aportando una nueva perspectiva a las **simulaciones distribuidas** del manto de nieve, al **combinarlas con técnicas de teledetección**.

Estudio realizado durante tres temporadas invierno-primavera en el que se establecen los siguientes objetivos:

1. Aplicar un Láser Escáner Terrestre (TLS) para monitorizar el espesor nieve en el Pirineo.
2. Determinar la influencia de la topografía en la distribución del espesor de nieve.
3. Generar cartografías diarias espesor de nieve durante el periodo de fusión.
4. Utilizar datos TLS para mejorar las simulaciones de un modelo físico del manto de nieve.
5. Determinar la influencia del bosque en la evolución del manto de nieve.

Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

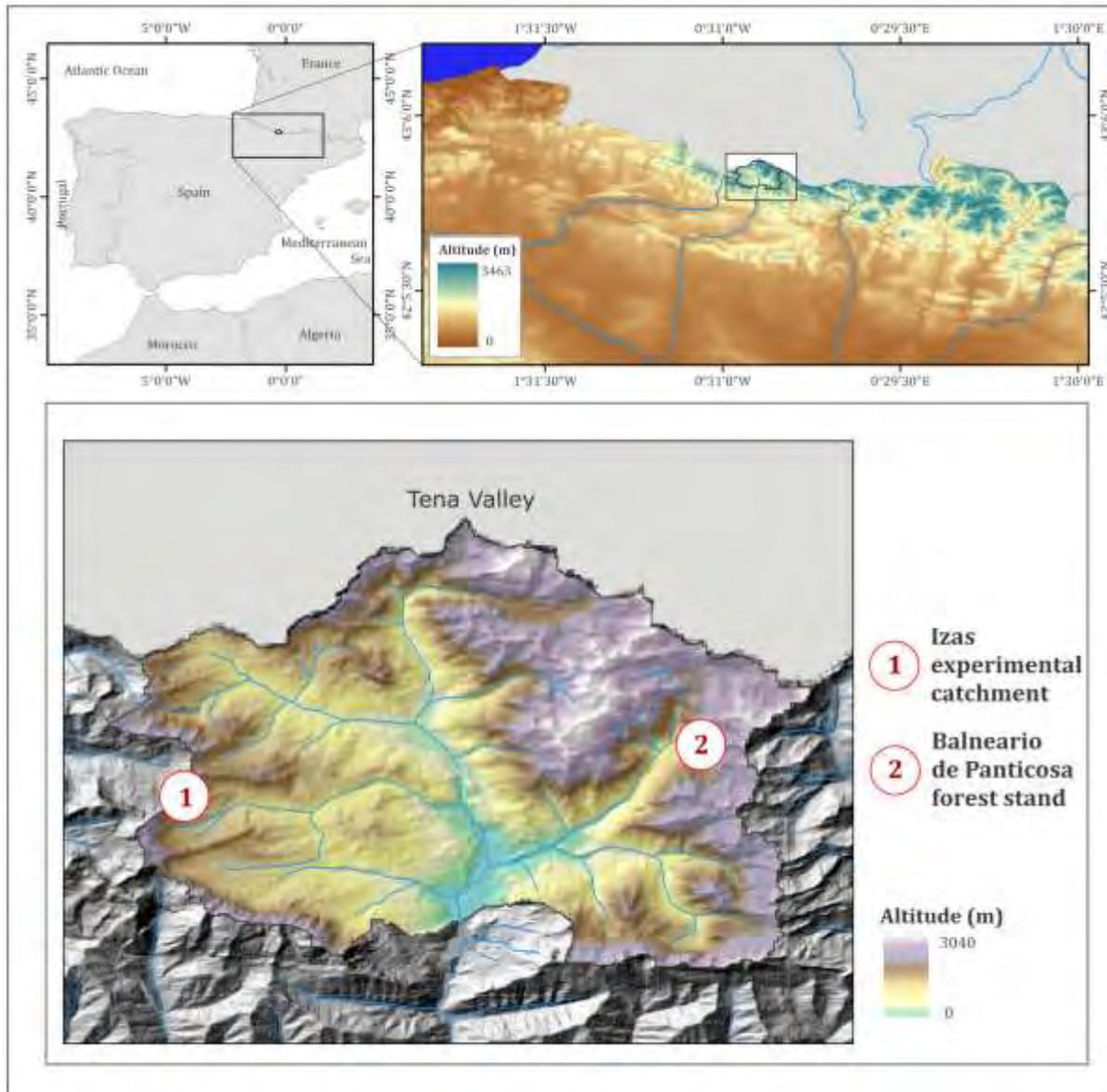
Pinar del Balneario de Panticosa

Zona de estudio: Los Pirineos

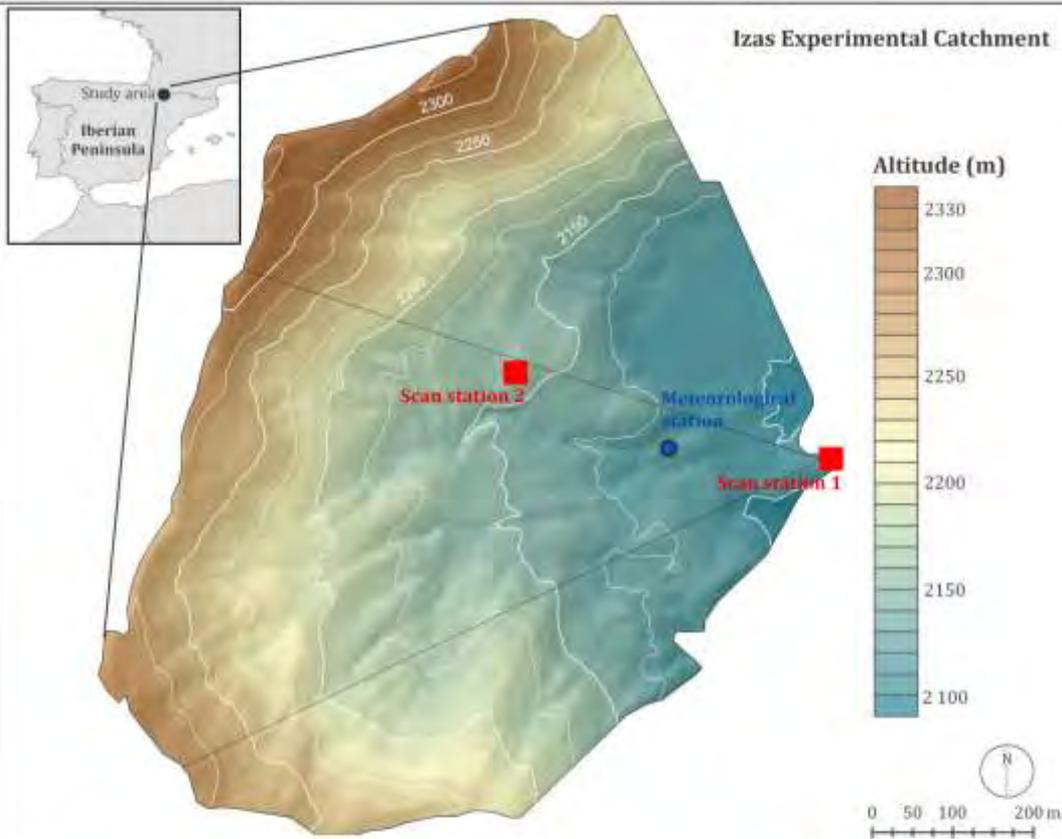
- Cordillera montañosa situada en **latitudes medias**.
- **Transición climática** entre Atlántico y Mediterráneo.
- **Elevada variabilidad** climática interanual (Vicente Serrano y López-Moreno, 2007).
- Cabecera de ríos que vierten a zona **Mediterránea**.
- Elevada **dependencia hídrica** de la nieve (López-Moreno y García-Ruiz, 2004).
- Las proyecciones de **cambio climático** prevén reducción de la duración del **manto de nieve** (López-Moreno et al., 2009).



Zona de estudio: El valle de Tena



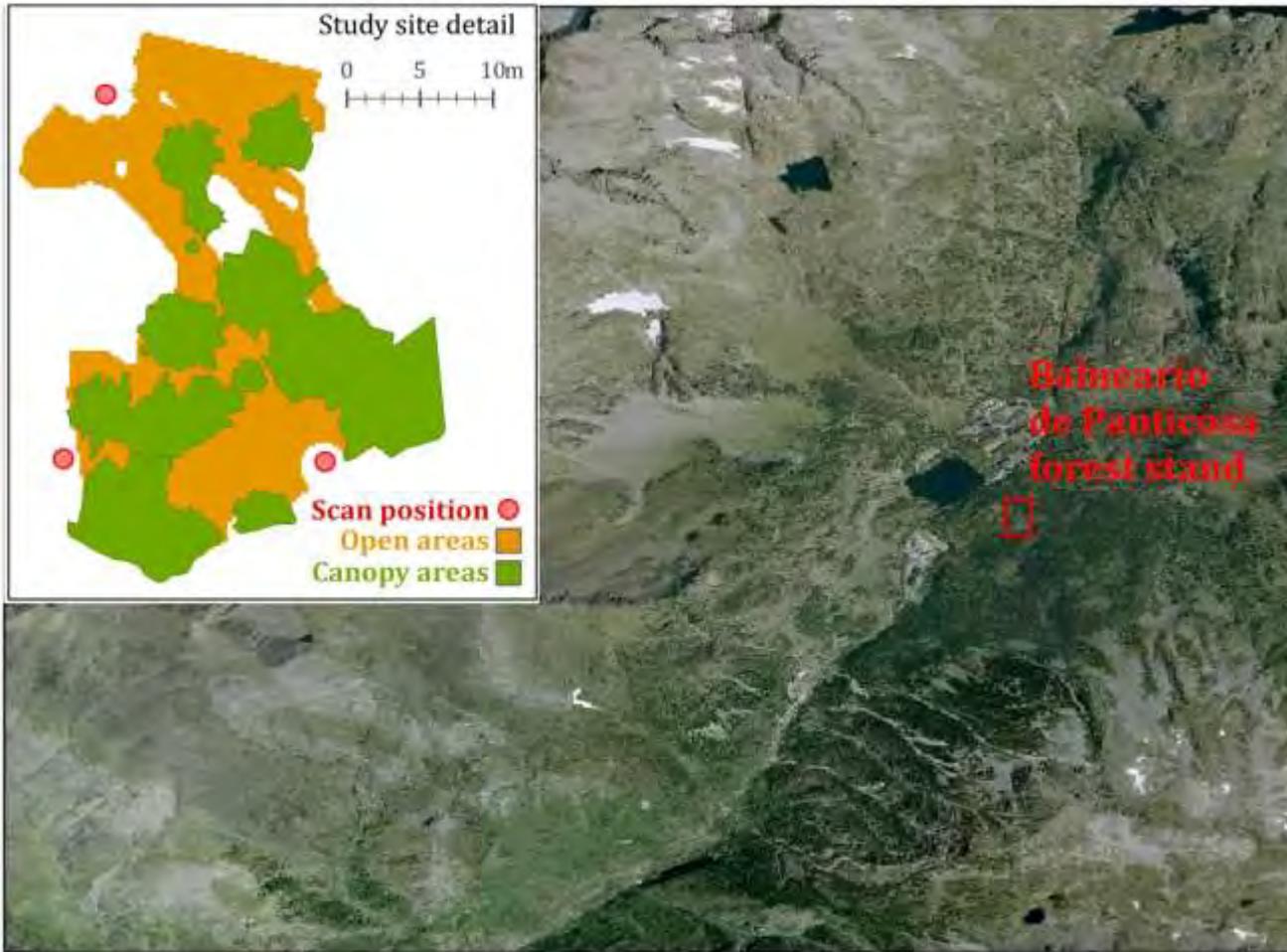
Zona de estudio: Cuenca Experimental de Izas



- Monitorizada desde finales de los 80
- 2000-2300 m s.n.m
- 55ha (33 ha aforadas)
- Topografía suave (16º)
- Pasto sublapino



Zona de estudio: Pinar del balneario de Panticosa



- Zona forestal de *Pinus sylvestris*
- Elevación 1700m
- 1000m²
- 17 árboles

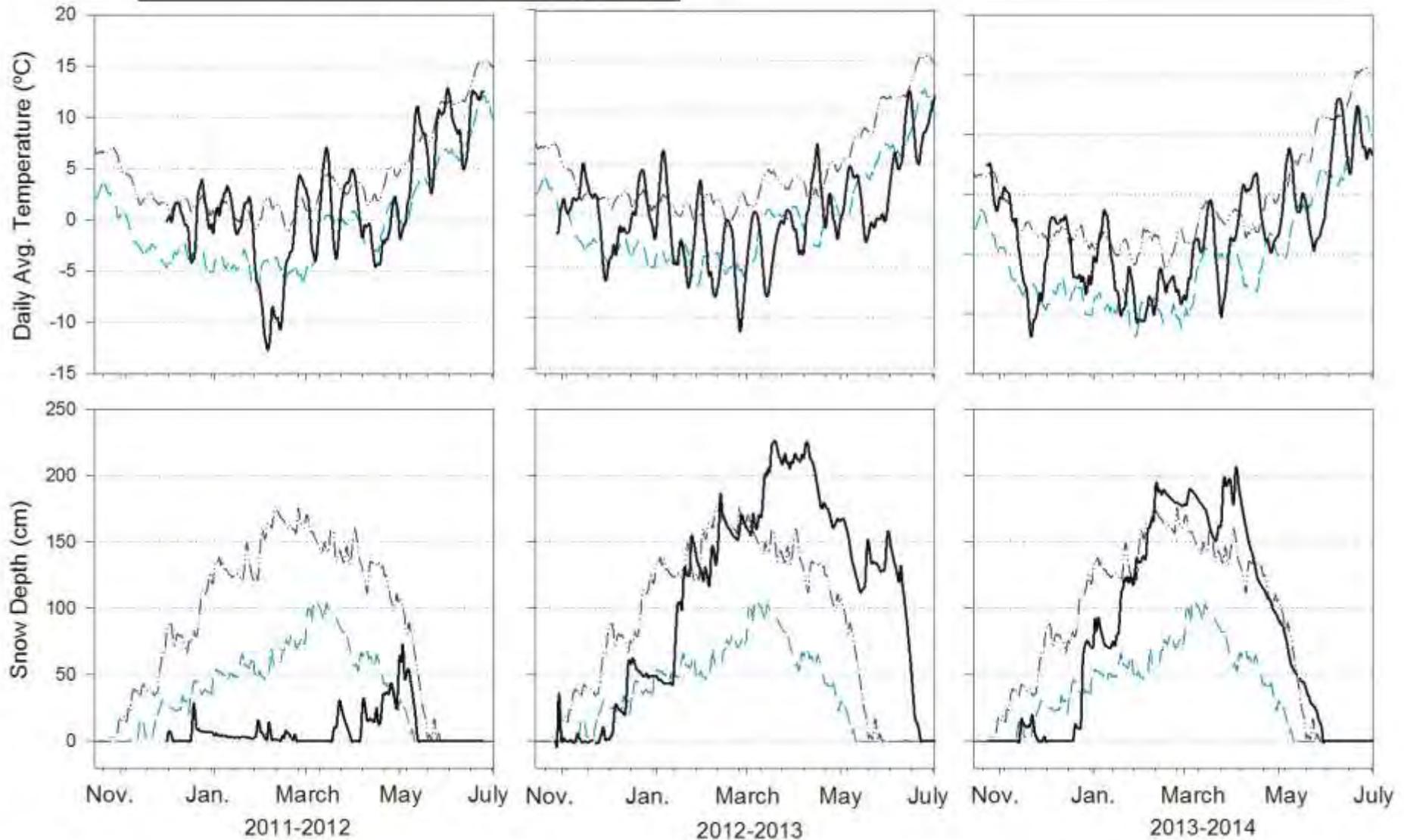
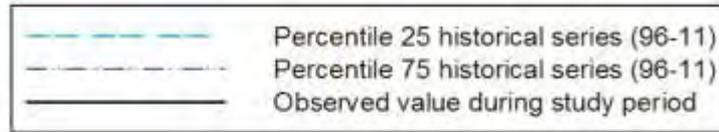


Zona de estudio: Climatología periodo de estudio

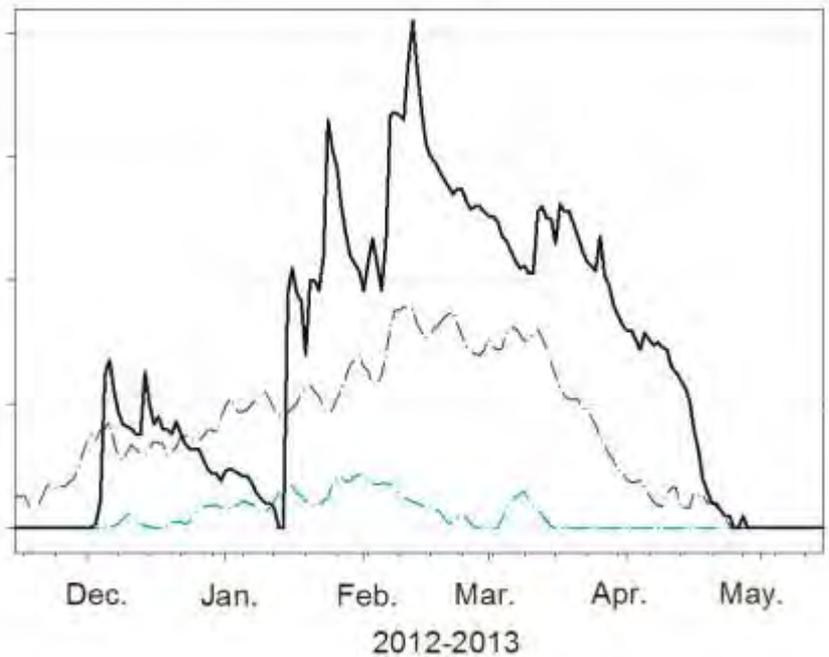
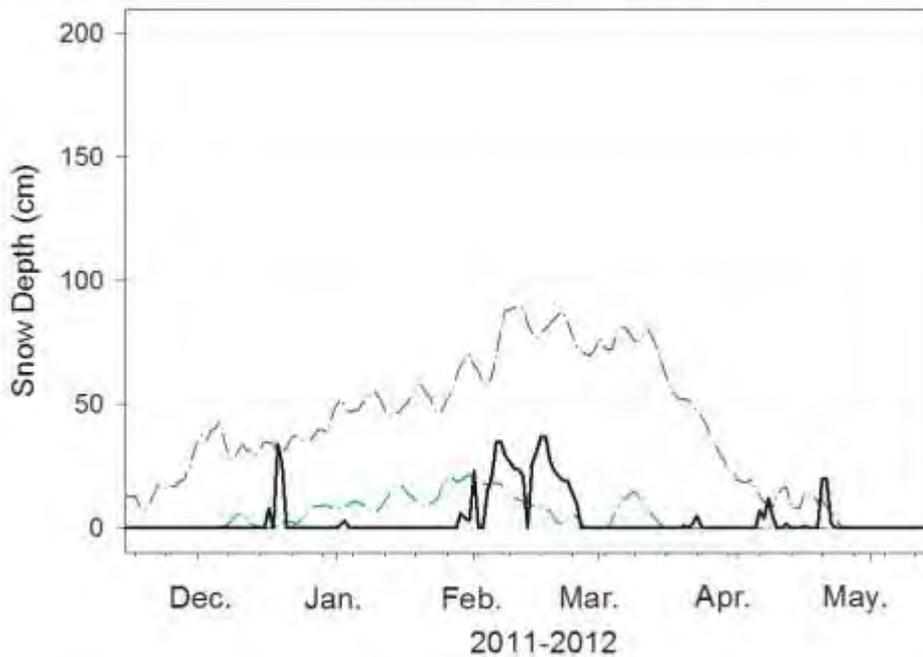
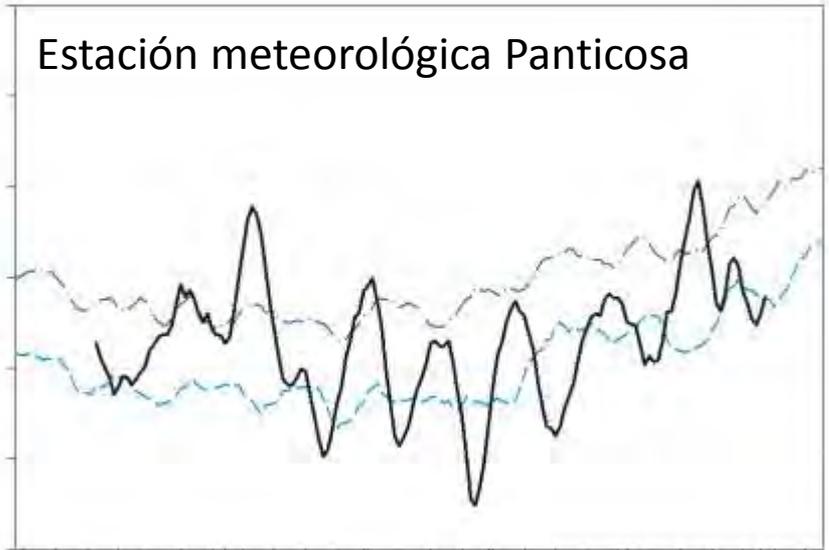
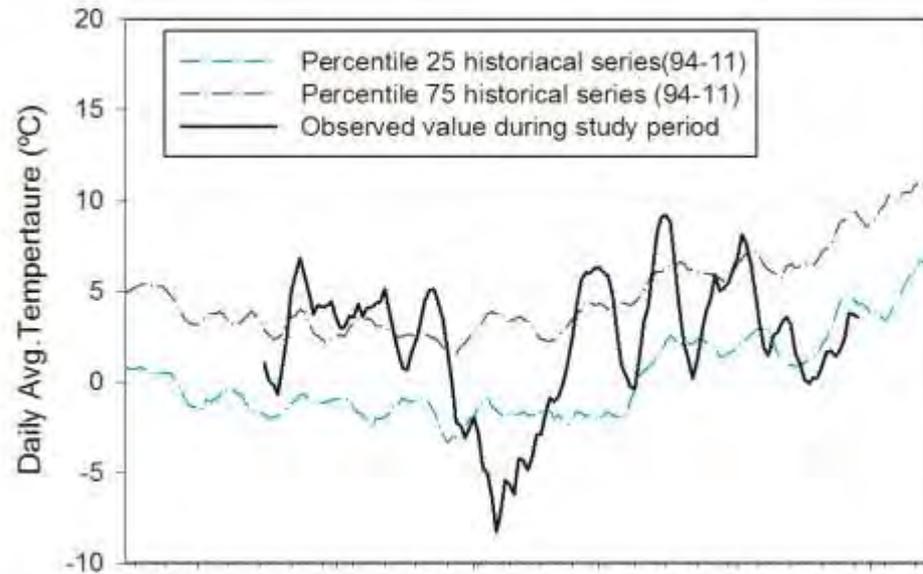


Zona de estudio: Climatología periodo de estudio

Estación meteorológica Izas



Zona de estudio: Climatología periodo de estudio



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Metodología

LIDAR: *Laser Distance and Ranging* or *Light Detecting and Ranging*

Instrumento que obtiene información tridimensional de objetos reales mediante emisión y detección de luz láser.

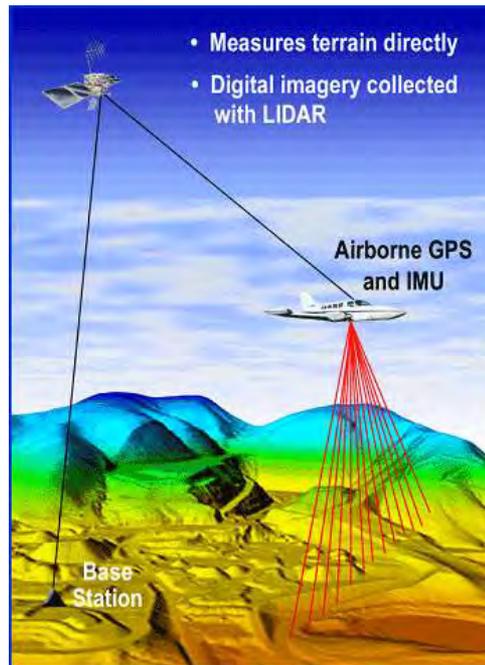
Según su modo de obtención de información: terrestre o aerotransportado

Técnicas LIDAR:

- Tiempo de vuelo
- Diferencia de fase
- Interferometría

Según técnica diferencias:

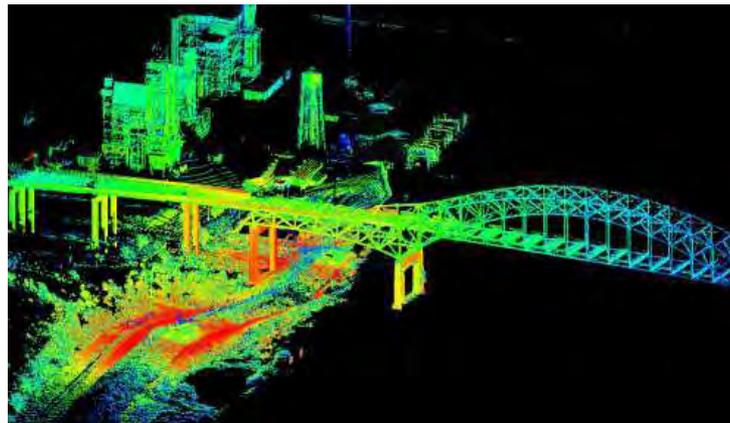
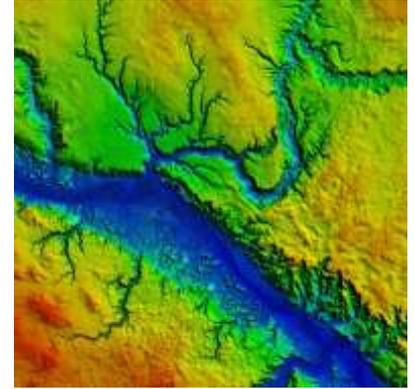
- Velocidad muestreo
- Resolución
- Distancia de trabajo
- Longitudes de onda



1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Metodología

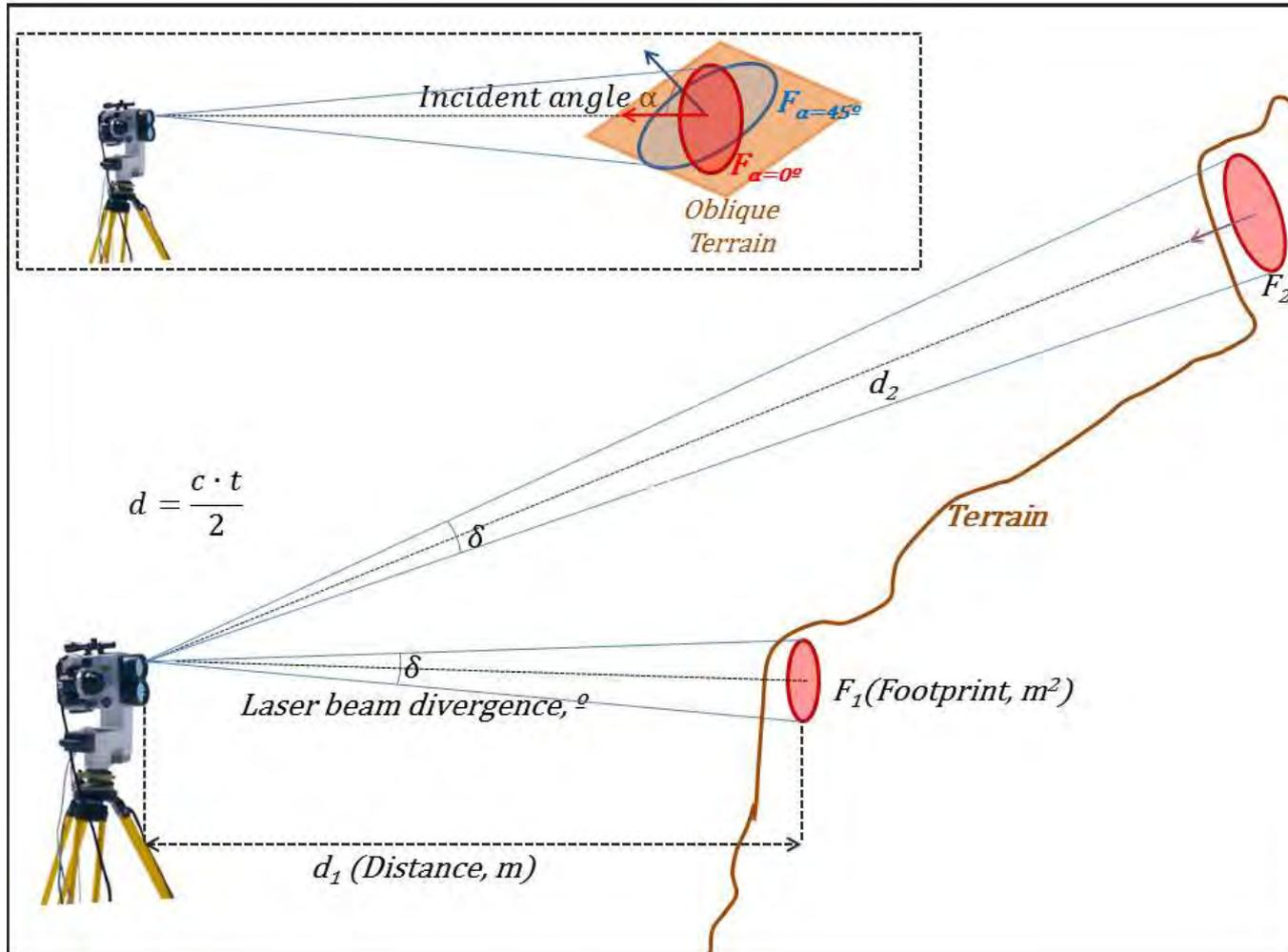
Aplicaciones:

- Arqueología
- Gestión forestal: crecimiento vegetal
- Topografía
- Detección de velocidad
- Deslizamientos de laderas
- Erosión
- Control industrial
- Minería



1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Metodología

Tecnología LiDAR (laser imaging detection and ranging)



Láser Escáner Terrestre (TLS) de largo alcance:

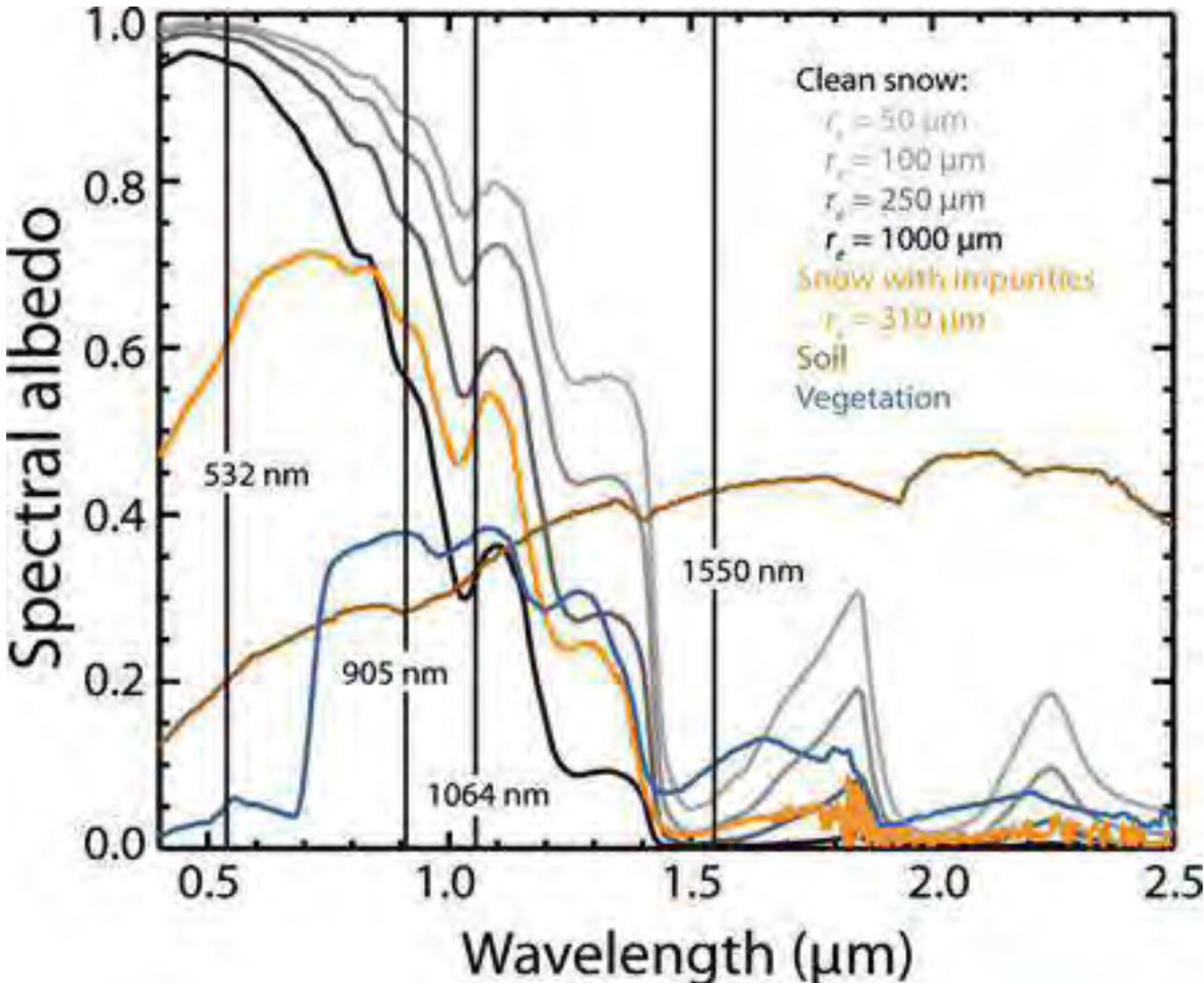
RIEGL LPM-321:

- Alcance 6km
- Resolución mínima 0,018° (a 1000m 0,3m)
- Divergencia haz 0,046°
- Long. Onda: 905nm

(Deems et al., 2013; Prockop 2008)

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Metodología

Tecnología LiDAR (laser imaging detection and ranging)



Láser Escáner Terrestre (TLS) de largo alcance:

RIEGL LPM-321:

- Alcance 6km
- Resolución mínima 0,018° (a 1000m 0,3m)
- Divergencia haz 0,046°
- Long. Onda: 905nm

(Deems et al., 2013; Prockop 2008)

1. Adquisición TLS distribución espesor de nieve: Metodología

Terrestrial Laser Scanner



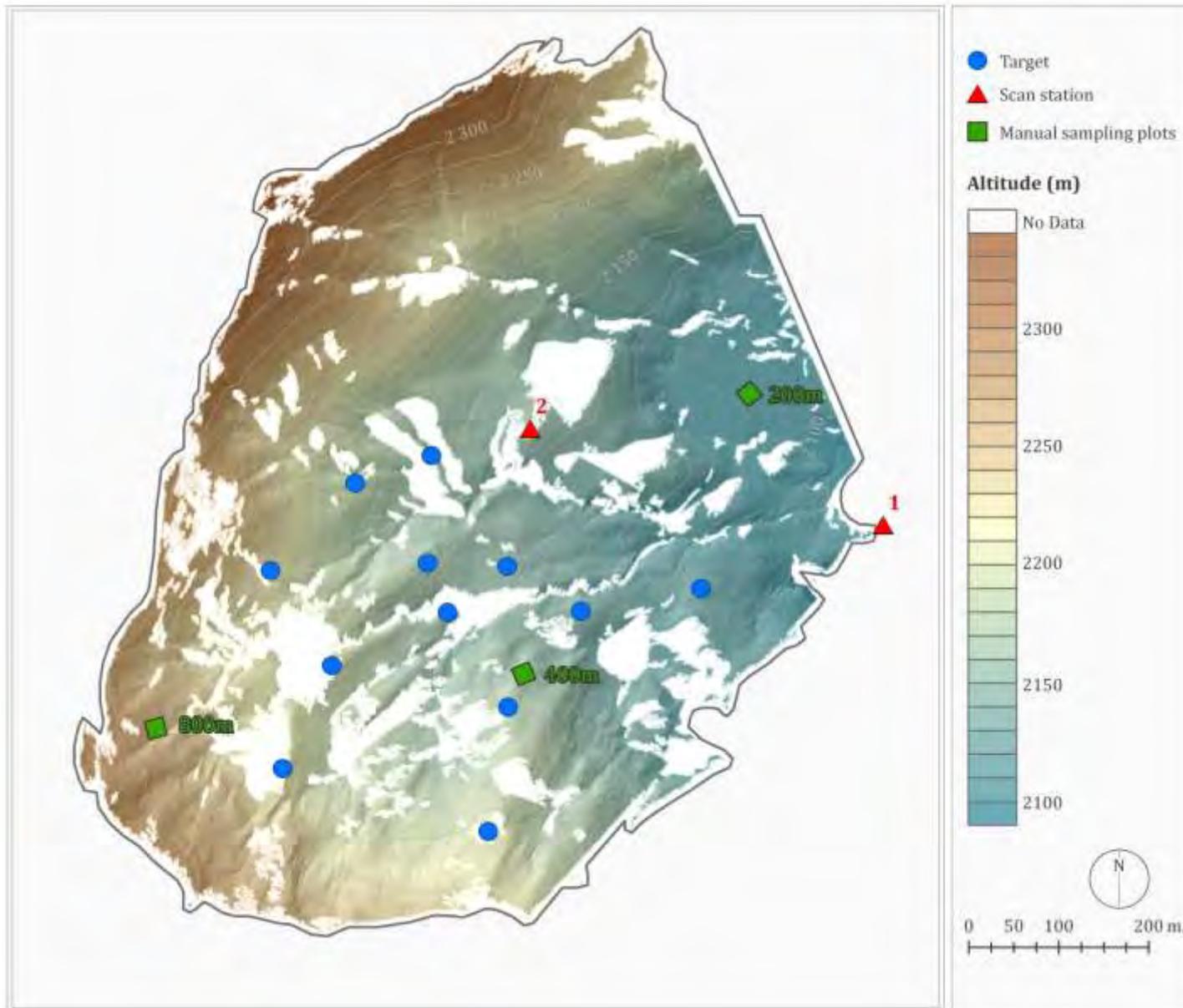
High resolution analysis of field areas.

- Maximum scanning distance dependent upon
 - (1) terrain and
 - (2) scanner limit
 - (3) users accuracy limits

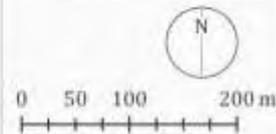
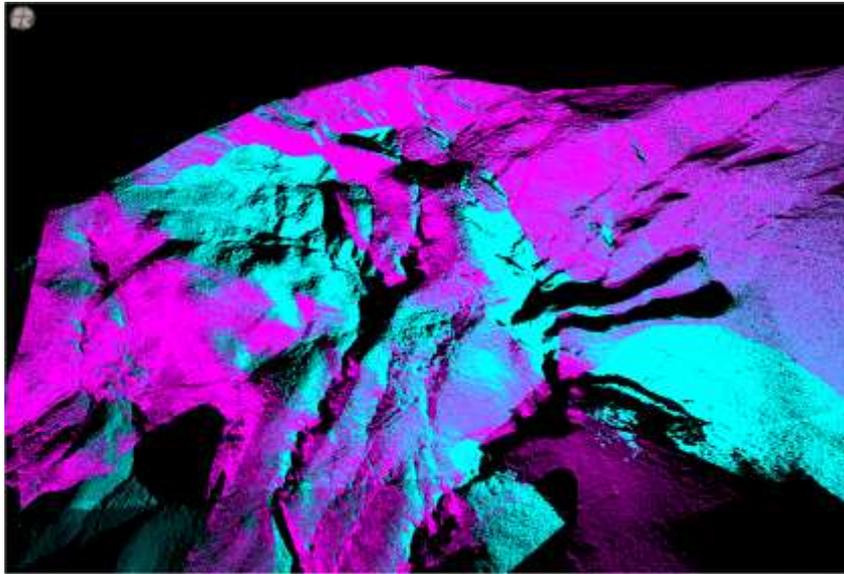


1. Adquisición TLS distribución espesor de nieve: Metodología

Toma de datos: Diseño muestreo



1. Adquisición TLS distribución espesor de nieve: Metodología



1. Adquisición TLS distribución espesor de nieve: Metodología

Toma de datos

Escaneo:

- 1) Adquisición coordenadas reflectores
- 2) Corrección atmosférica (P, T, RH)
- 3) Escaneo distintas zonas
- 4) Cada 1h 30' repetir 1) y 2)

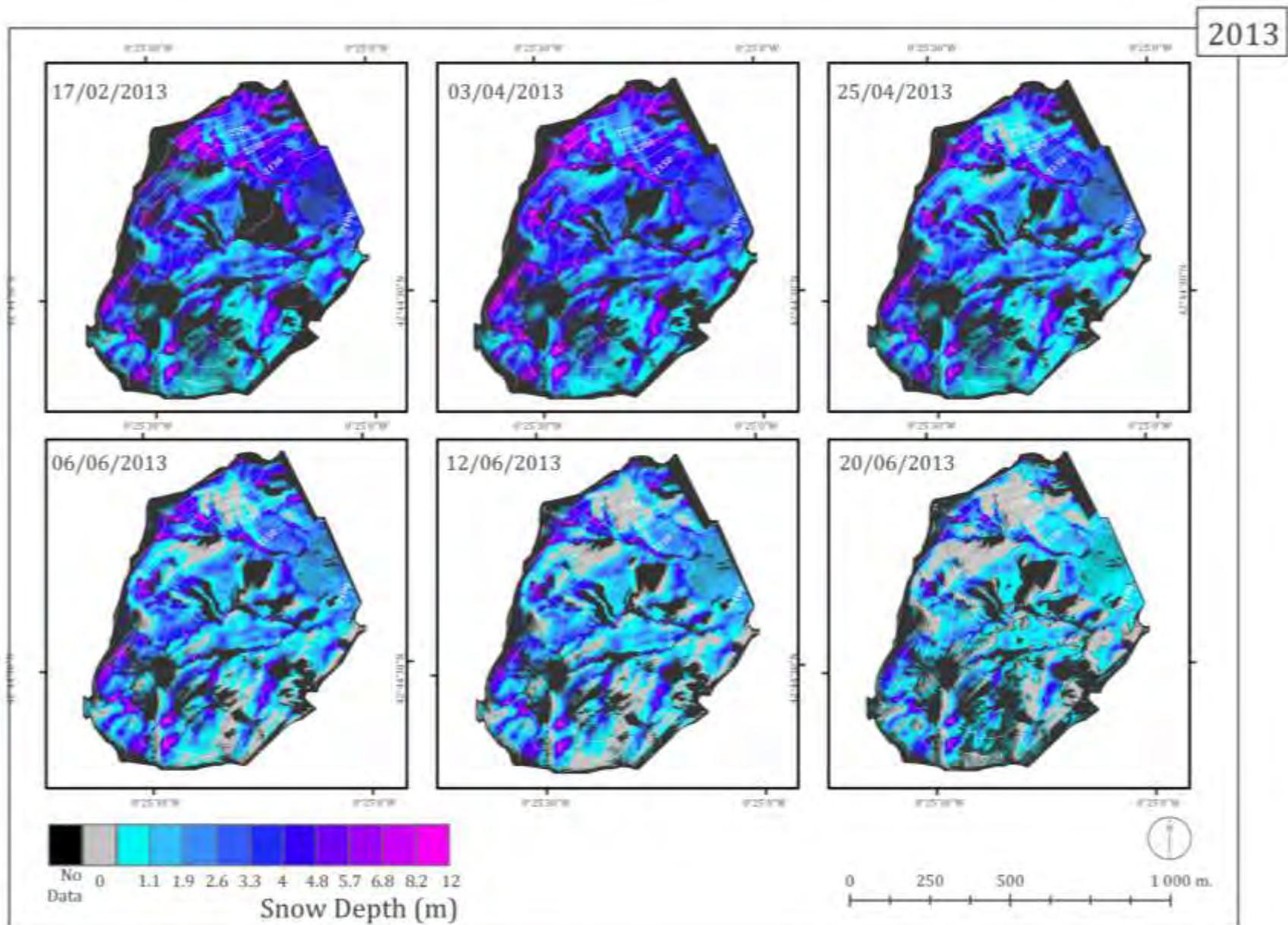


Post-proceso:

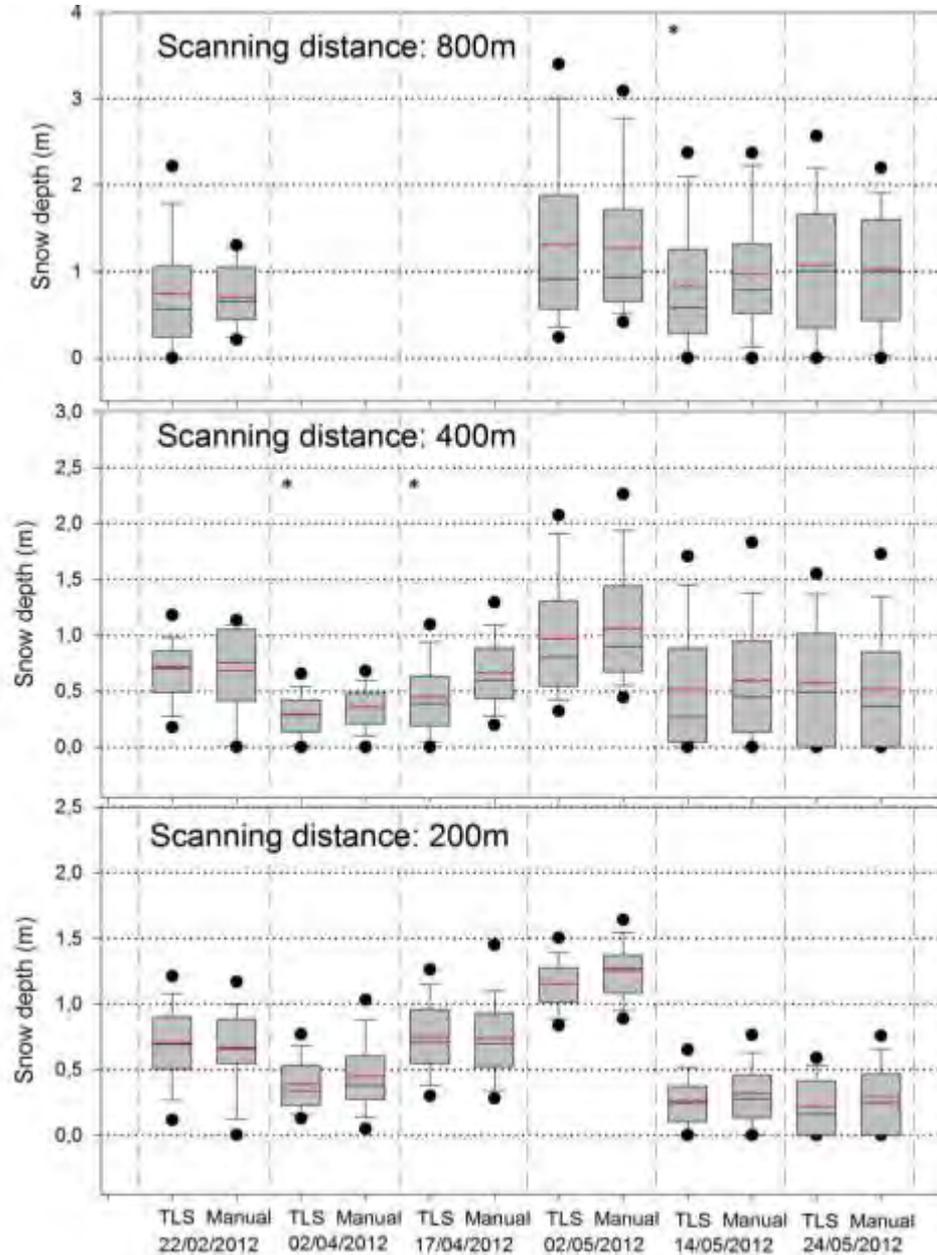
- 1) Transformación de coordenadas comunes días escaneo y globales
- 2) Diferencia entre nubes de puntos (Nieve-No nieve): obtención espesores
- 3) Rasterización resultados

Producto final: mapas distribución espacial del espesor de nieve

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Resultados



1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Resultados



vs TLS

Error absoluto medio: 0,07m

Distancia aplicación TLS medición
espesor de nieve: 1000m

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS: Conclusiones

- 16 mapas de espesor de nieve durante 3 temporadas
- Tamaño pixel 1m
- Error estimado $<0,1\text{m}$
- Primera aplicación sistemática $> 500\text{m}$
- Creación base de datos en Pirineos



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Metodología

Análisis estadístico distribución espacial

Espesor de nieve  Variables topográficas

Variables topográficas consideradas:

- Elevación
- Pendiente
- Curvatura
- Radiación solar potencial (Fu y Rich, 2002)
- Easting
- Northing
- *Topographic Position Index (TPI, Weiss, 2001)*
- *Maximum upwind slope (Sx, Winstral et al., 2002)*

2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Metodología

Análisis estadístico distribución espacial

Espesor de nieve

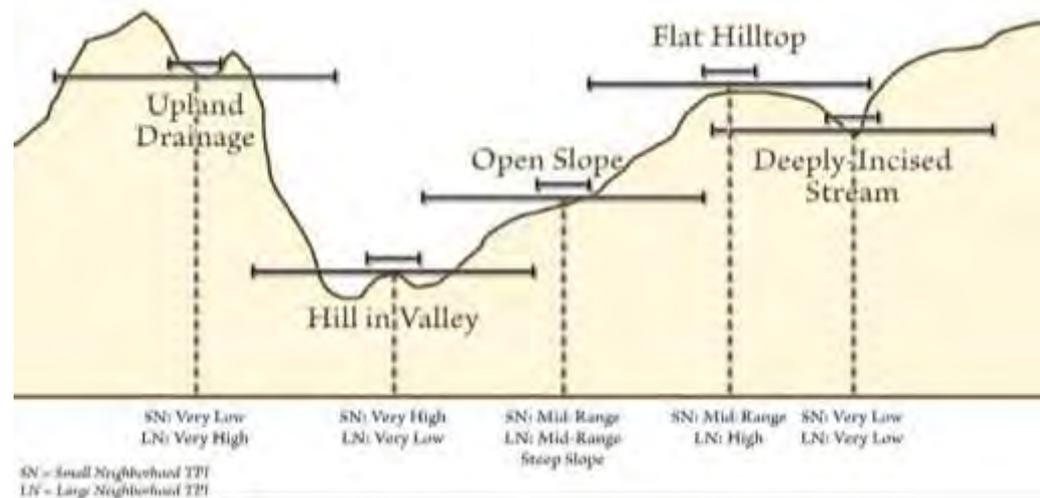


Variables topográficas

- *Topographic Position Index (TPI, Weiss, 2001)*

$$TPI(x_i, y_i) = z_o(x_i, y_i) - \overline{z(x_i, y_i)}$$

$$\overline{z(x_i, y_i)} = \frac{1}{n_R} \sum_{v \in R} z_v(x_v, y_v)$$



2. Influencia de la topografía en la distribución del espesor de nieve: Metodología

Análisis estadístico distribución espacial

Espesor de nieve

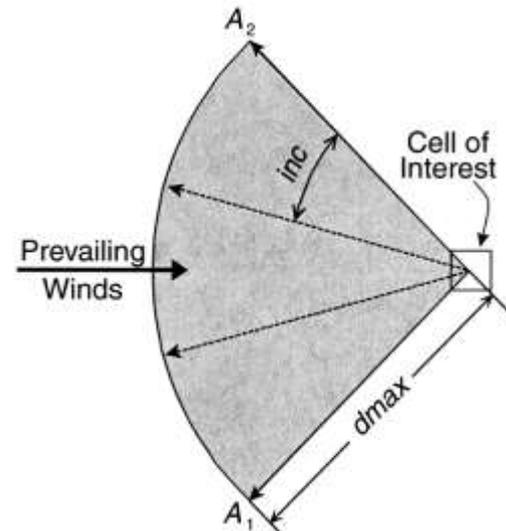
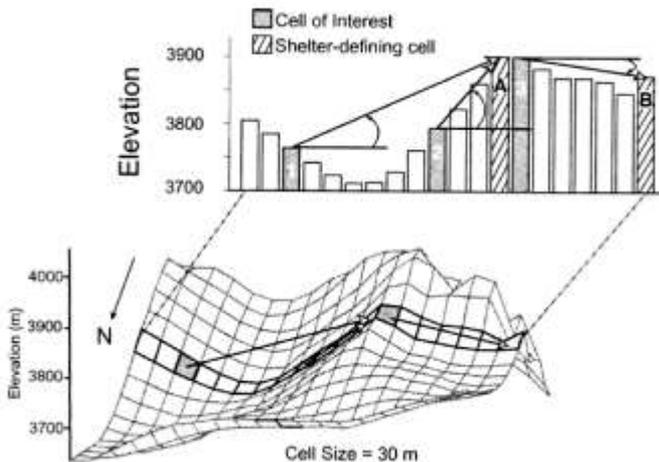


Variables topográficas

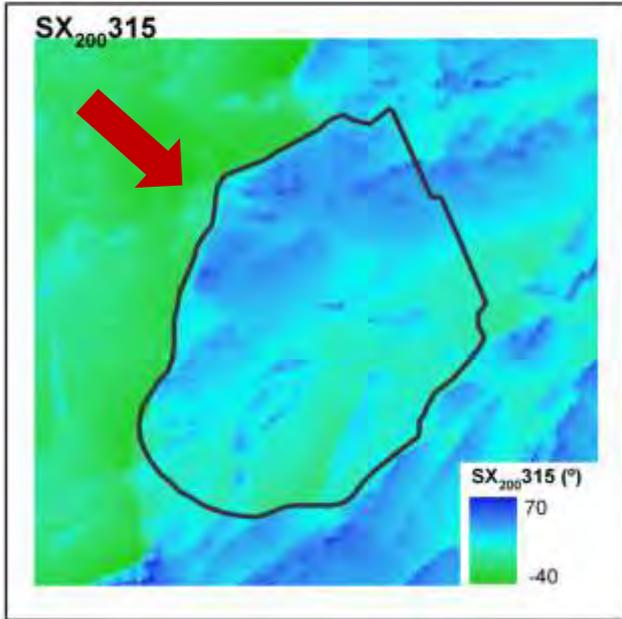
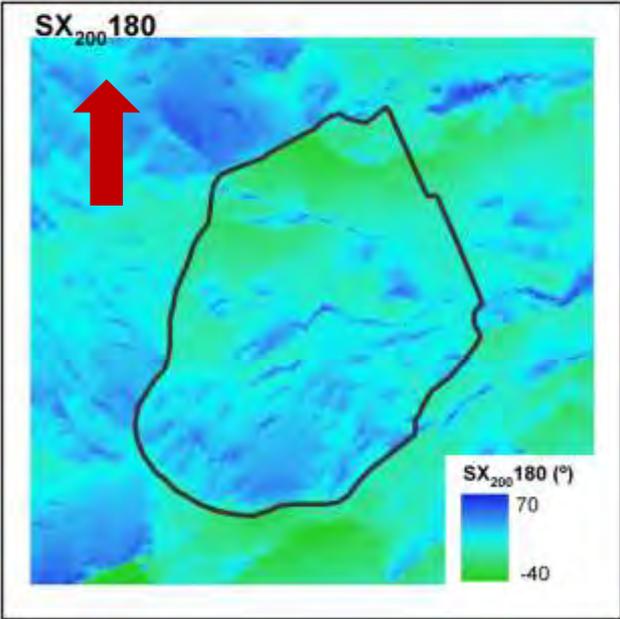
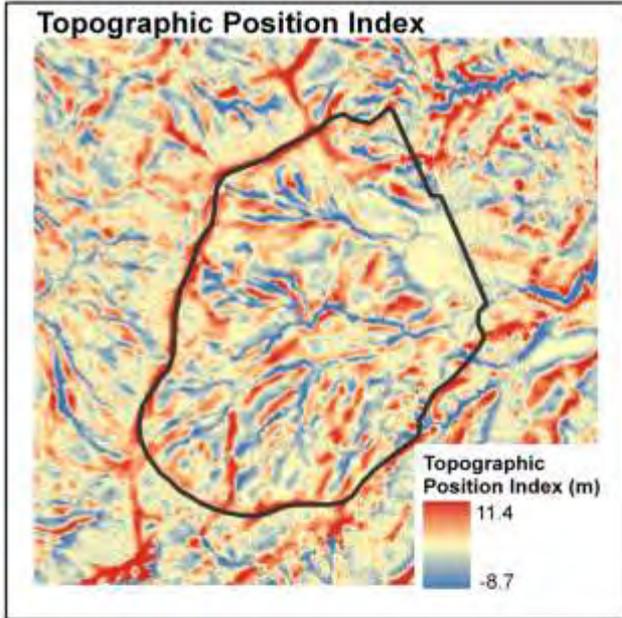
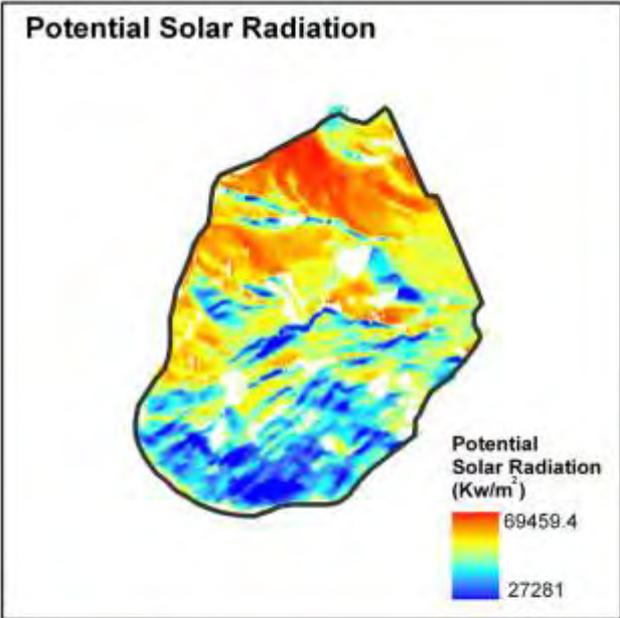
- *Maximum upwind slope* (S_x , Winstral et al., 2002)

$$S_{x_{A,d_{max}}}(x_i, y_i) = \max \left[\tan^{-1} \left(\frac{z(x_v, y_v) - z(x_i, y_i)}{[(x_v - x_i)^2 + (y_v - y_i)^2]^{1/2}} \right) \right]$$

$$\bar{S}_{x_{d_{max}}} = \frac{1}{n_v} \sum_{A=A_1}^{A_2} S_{x_{A,d_{max}}}(x_i, y_i)$$



2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Metodología



2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Metodología

Análisis estadístico distribución espacial

Espesor de nieve  Variables topográficas

20000 datos /día muestreo
Resolución espacial 5m
12 días (2011/12, 2012/13)

- 1. Coeficiente correlación Pearson:**
Variables individuales vs espesor
Monte Carlo (1000 repeticiones, 100 muestras)
Intervalo confianza 95% ($\alpha < 0,05$, $r = \pm 0,197$)
- 2. Regresión Lineal Múltiple (MLR)**
Umbral variables incluida: $\alpha < 0,05$
Muestras aleatorias 1000 casos selecc. variables
Ajuste final 15000 casos (5000 casos validación)
$$z_i = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$$
- 3. Árboles de regresión binaria (BRT)** (Erxleben et al., 2002; Molotch et al., 2005)
Selección variable que minimiza cuadrado residuos (Brieman, 1984)
División hasta varianza explicada $< 1\%$
Final nodos 15, > 500 casos/nodo
15000 casos ajuste, 5000 validación

2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Resultados

Persistencia inter e intra-anual

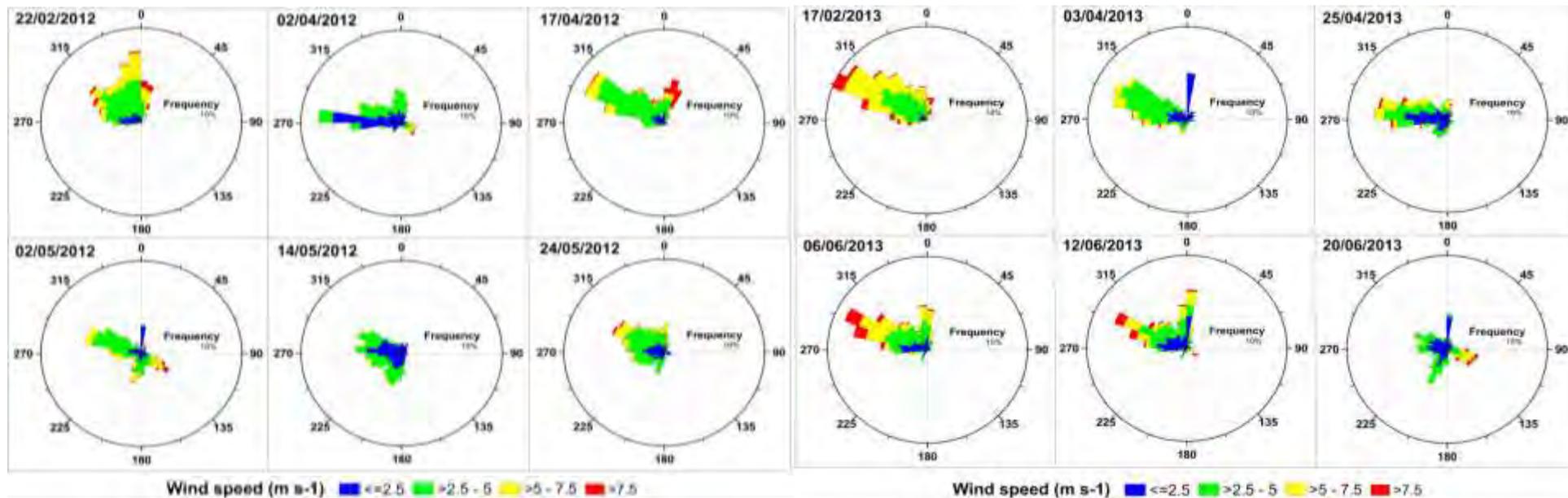
1. Análisis distancias radio búsqueda:

TPI: 25m

Sx: 200m

2. Análisis direcciones búsqueda Sx

Direcciones Sx días muestreo → dirección vientos dominantes



2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Resultados

Persistencia inter e intra-anual

3. Análisis todas variables topográficas

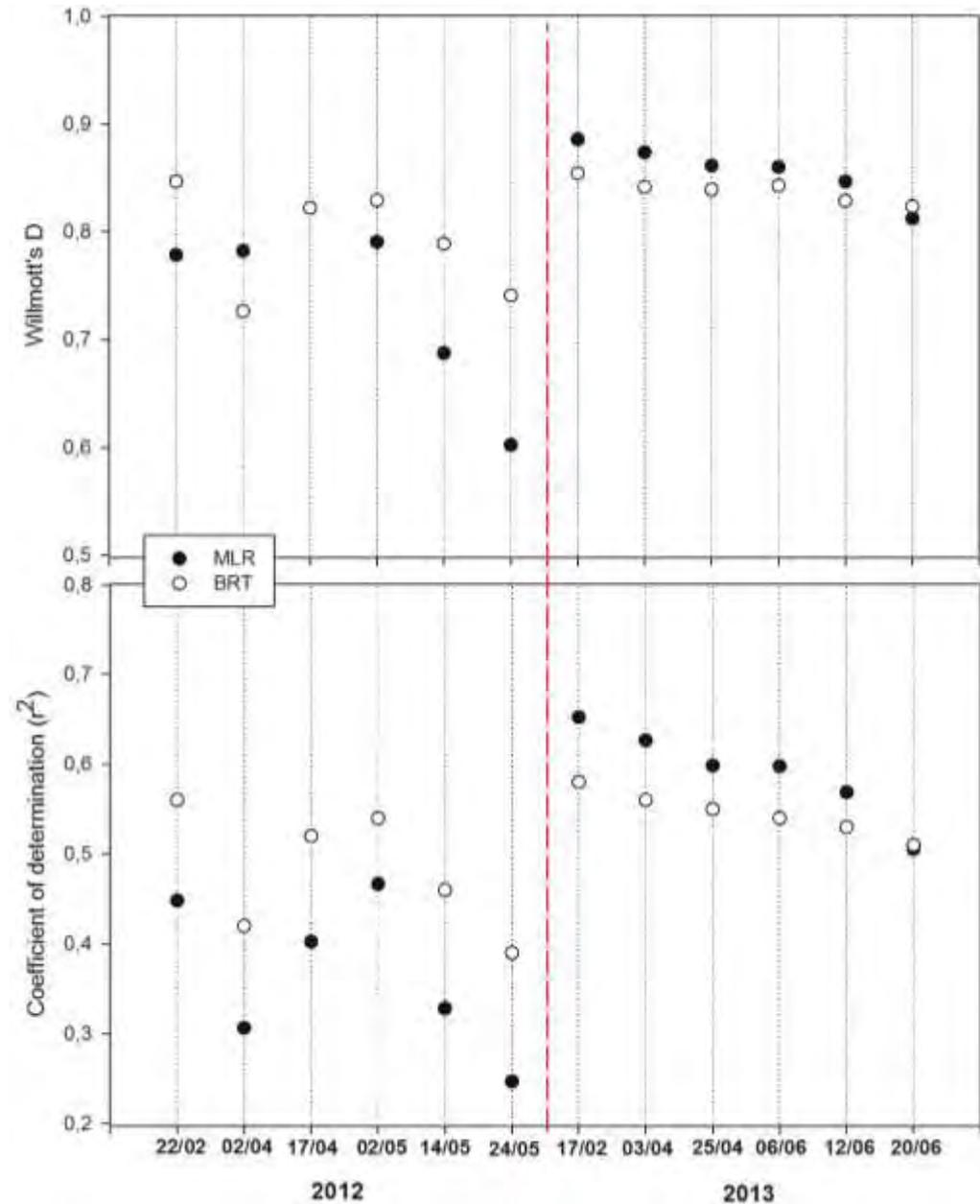
	Snow season 2011-2012						Snow season 2012-2013					
	22/02	02/04	17/04	02/05	14/05	24/05	17/02	03/04	25/04	06/06	12/06	20/06
Elev.	0.09	0.26*	0.16	0.10	0.29*	0.19	0.09	0.18	0.13	0.18	0.21*	0.26*
Slope	0.06	0.18	0.02	-0.03	0.20*	0.03	0.25*	0.27*	0.20*	0.20*	0.21*	0.26*
Curv	-0.44*	-0.45*	-0.47*	-0.49*	-0.41*	-0.37*	-0.39*	-0.40*	-0.40*	-0.39*	-0.38*	-0.38*
North	-0.06	0.00	0.04	0.19	0.07	0.11	-0.38*	-0.27*	-0.19	-0.09	-0.06	-0.11
East.	0.09	0.21*	0.13	0.13	0.13	0.11	0.25*	0.26*	0.27*	0.22*	0.18	0.14
Rad	0.05	0.04	-0.06	-0.22*	-0.12	-0.11	0.36*	0.21*	0.10	-0.09	-0.12	-0.23*
TPI25	-0.56*	-0.46*	-0.54*	-0.58*	-0.40*	-0.32*	-0.66*	-0.68*	-0.68*	-0.66*	-0.63*	-0.61*
Sx	0.22*	0.33*	0.34*	0.44*	0.32*	0.23*	0.56*	0.52*	0.49*	0.45*	0.42*	0.43*

2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Resultados

Persistencia inter e intra-anual

Modelos estadísticos: capacidad explicativa para cada día muestreo

- MLR
- BRT



2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Resultados

Persistencia inter e intra-anual

MLR

	Snow season 2011-2012						Snow season 2012-2013					
	22/02	02/04	17/04	02/05	14/05	24/05	17/02	03/04	25/04	06/06	12/06	20/06
TPI	-0.69	-0.53	-0.60	-0.59	-0.48	-0.40	-0.78	-0.72	-0.73	-0.80	-0.74	-0.72
Sx		0.11	0.28	0.26	0.20	0.16	0.36	0.31	0.43	0.37	0.38	0.31
Elev.	0.09	0.22	0.34	0.27	0.27	0.35		0.14		0.08		0.13
Slope		-0.25	-0.29	-0.24	-0.21	-0.21		-0.10	-0.14	-0.16	-0.09	-0.15
North	-0.22	0.13	-0.16				-0.12	-0.11	-0.11			
East.	0.10						0.29	0.25	0.25	0.31	0.23	0.20

$$z_i = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_n x_n$$

BRT

	Snow season 2011-2012						Snow season 2012-2013					
	22/02	02/04	17/04	02/05	14/05	24/05	17/02	03/04	25/04	06/06	12/06	20/06
TPI	83.2	78.8	75.0	71.7	74.0	66.9	49.1	56.4	64.4	71.2	69.9	77.5
Sx			4.6	12.7	13.4	10.8	45.9	23.1	23.0	21.8	20.1	12.5
Elev.	5.7	6.8	13.2	9.1	8.2	15.2	5.0	5.7	5.0	3.3	5.9	5.4
Slope	1.7	5.4	5.7	6.5	3.2	7.0			2.1			
North	9.3	8.1	1.5		1.3			14.7	4.3	2.4	2.9	3.6
East.									1.2	1.3	1.1	1.0

Varianza explicada por cada variable (0 a 100)

2. Influencia de la topográfica en la distribución del espesor de nieve: Conclusiones

Influencia de la topografía en la distribución del manto de nieve:

- Importancia curvatura: TPI 25m
- Exposición viento dirección dominante: Sx 200m
- Elevación: aumento durante fusión
- Importante persistencia intra-anual



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión

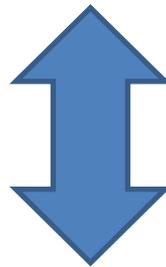
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. Generación cartografías diarias espesor de nieve durante fusión: Metodología

Generación de cartografías diarias del espesor de nieve durante el periodo de fusión a pequeña escala (Izas, temporadas 2011-12, 2012-13, 2013-14).

Permite cubrir limitaciones temporales de monitorización TLS.

- Demostrada utilidad DDF (*degree-day factor*) para reconstrucción manto de nieve con datos satélite (Hassan 2012, Molotch 2009).



- Reciente incorporación fotografía time-lapse para la monitorización de la evolución del manto de nieve a pequeña escala (Parajka et al., 2012).

3. Generación cartografías diarias espesor de nieve durante fusión: Metodología

Fotografía time-lapse Cuenca Experimental de Izas (Campbell CC640)



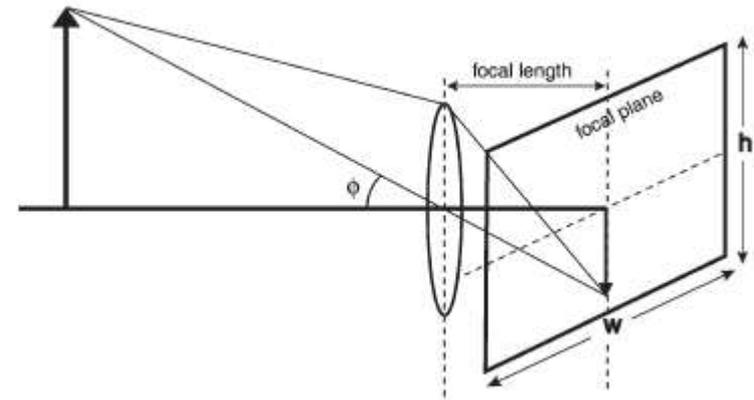
3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Metodología

Proyección información RGB fotos al MDE (Corripio, 2004):

a) Transformación óptica:

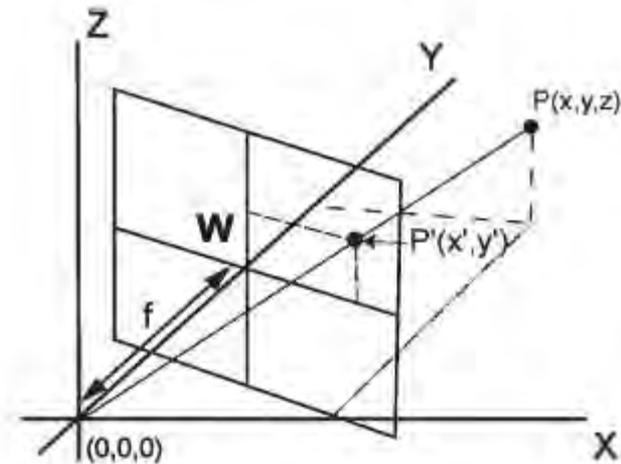
Tamaño chip cámara

Distancia focal, aberración lente

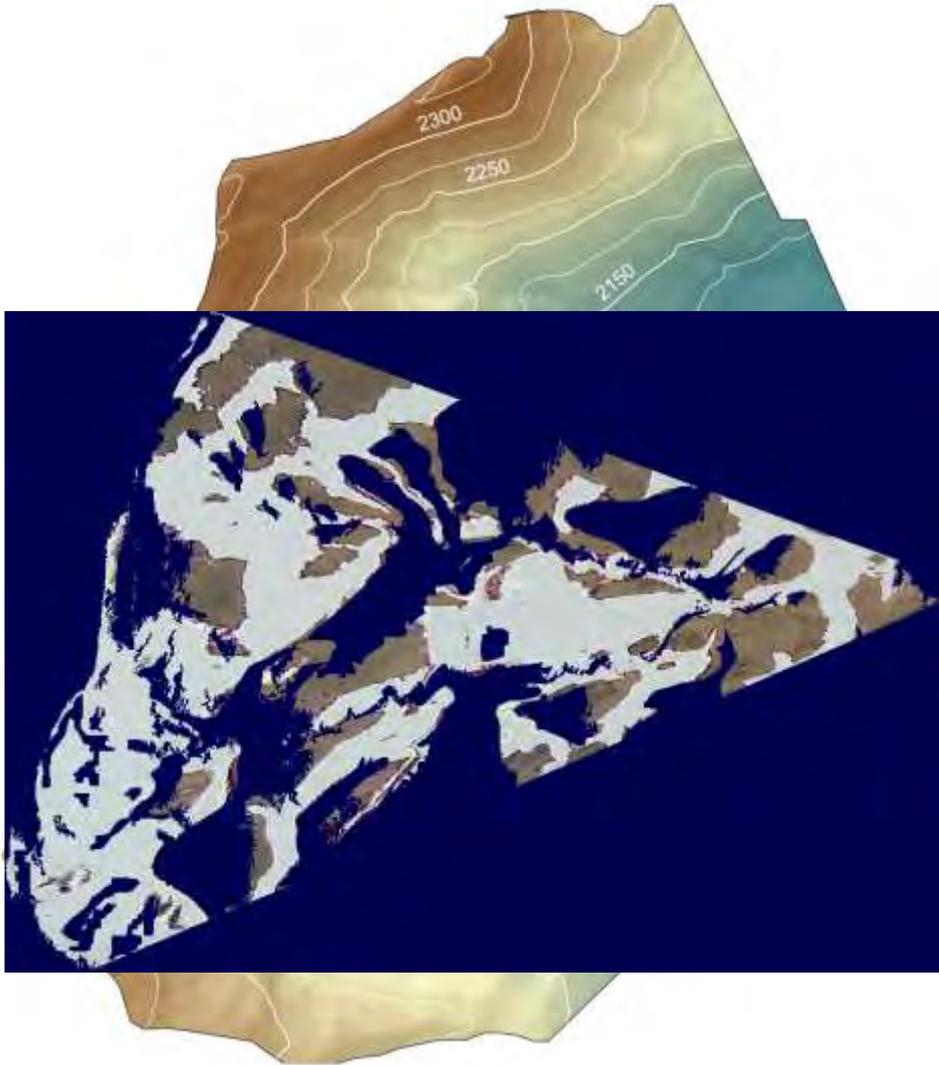


b) Proyección perspectiva foto.

Correspondencia pixel \longleftrightarrow Ptos. terreno (12)



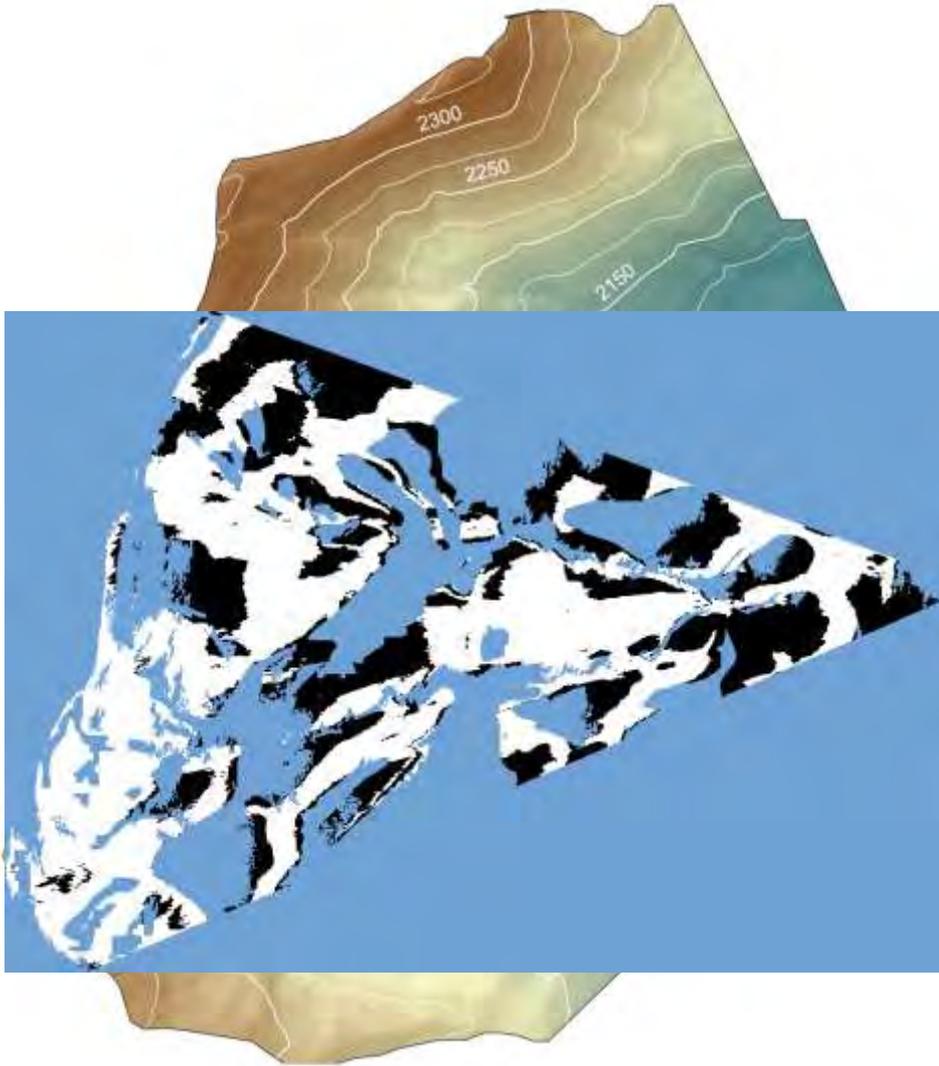
3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Metodología



Resolución espacial: 1 m

- MDE
- SCA (Superficie Cubierta por Nieve)

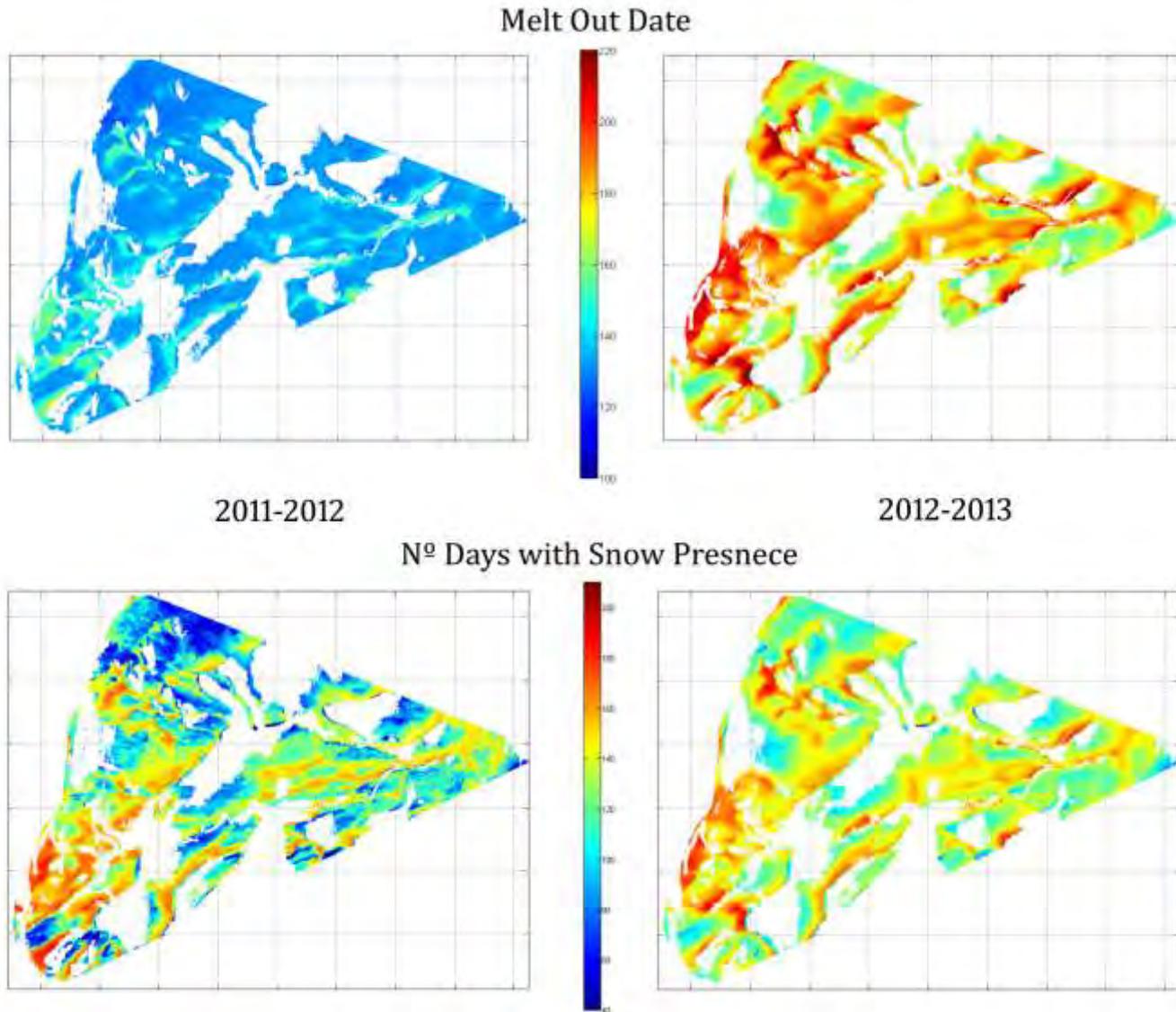
3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Metodología



Resolución espacial: 1 m

- MDE
- SCA (Superficie Cubierta por Nieve)

3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Metodología



3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Metodología

¿Cómo se genera un mapa del espesor de nieve?

1. Información MOD (último día presencia nieve para cada pixel)
2. Método índice de temperatura DDF (De Walle y Rango, 2008)

$$M = \begin{cases} 0 & T_a < 0^\circ\text{C} \\ DDF(T_a - T_b) & T_a > 0^\circ\text{C} \end{cases}$$

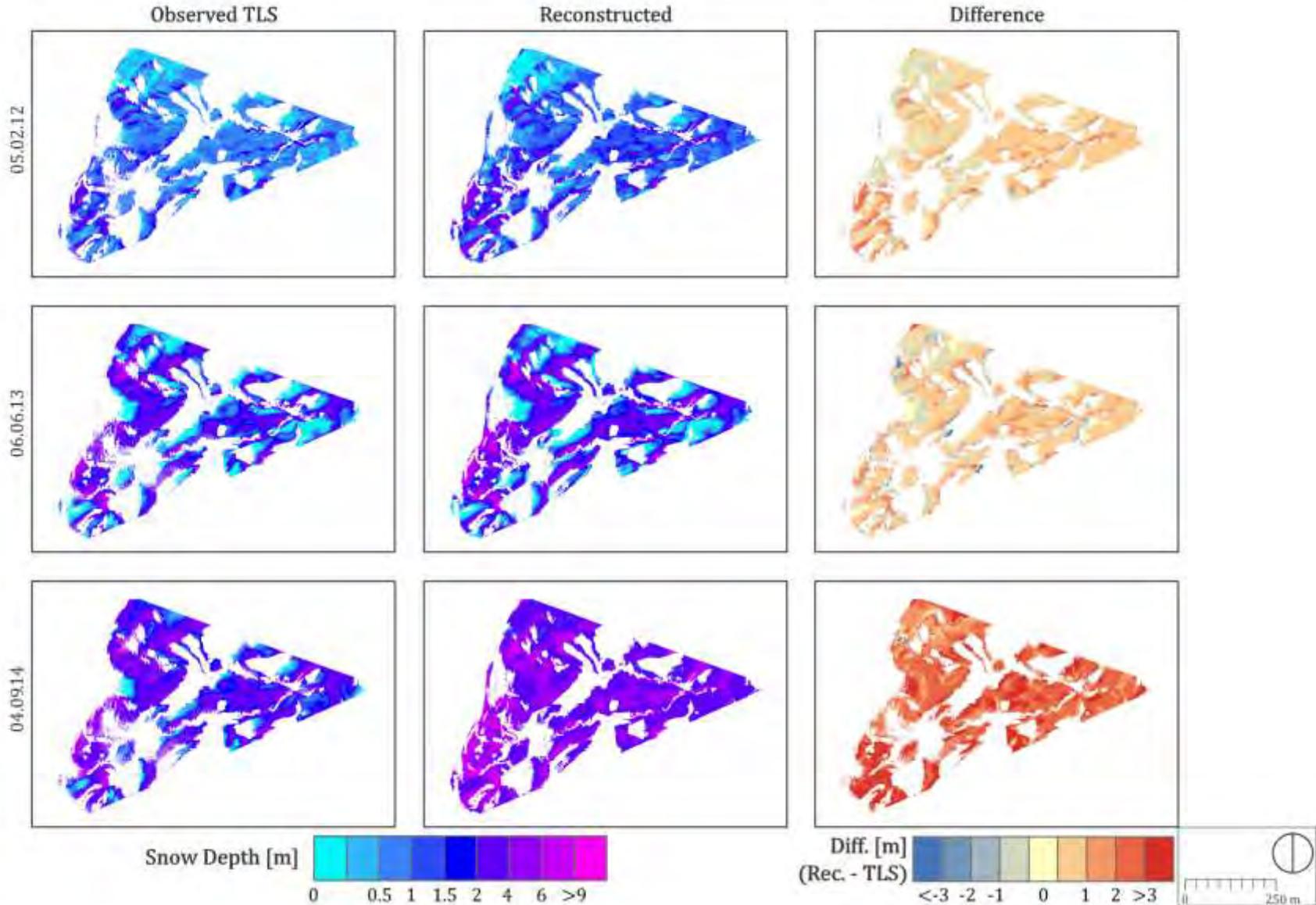
Pasos reconstrucción:

- a) Obtención DDF estación meteorológica durante periodo de fusión
 - 2011-12: 0,16 cm °C⁻¹ day⁻¹
 - 2012-13: 0,13 cm °C⁻¹ day⁻¹
 - 2013-14: 0,15 cm °C⁻¹ day⁻¹
- b) Reconstrucción diaria:
 - ∀ celda con MOD > día reconstruido, suma $M = f(T_a, DDF)$
 - b.1) DDF cte. en toda cuenca
 - b.2) DDF espacialmente corregido con datos TLS
 - Calibración 2012 (poco espesor nieve)
 - Calibración 2013 (mucho espesor nieve)

3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Resultados

Reconstrucción: Mapas generados inicio periodo fusión

DDF cte. en toda cuenca



3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Resultados

Mapas generados días escaneo TLS

DDF cte. en toda cuenca

Date		RMSE	r^2	Vrec(m3)	Vdif(%)
2012	2 nd May	0.81	0.63	1.48E+05	31
	14 th May	0.62	0.64	5.29E+04	15
	24 th May	0.35	0.64	2.06E+04	9
2013	6 th June	0.42	0.72	3.41E+05	15
	12 th June	0.40	0.73	2.83E+05	13
	20 th June	0.38	0.77	1.84E+05	12
2014	9 th April	0.53	0.59	6.14E+05	44
	5 th May	0.58	0.72	4.08E+05	38

3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Resultados

Mapas generados días escaneo TLS

DDF espacialmente corregido TLS

Date	Adjust.	RMSE	r ²	Vrec(m3)	Vdif(%)
2 nd May 2012	2012	0.54	0.68	1.21E+05	14
	2013	0.74	0.66	8.01E+04	-30
14 th May 2012	2012	0.35	0.65	4.70E+04	6
	2013	0.64	0.61	3.95E+00	-10
24 th May 2012	2012	0.25	0.64	1.87E+04	3
	2013	0.32	0.62	1.26E+04	-40
6 th June 2013	2012	1.04	0.68	3.01E+05	10
	2013	0.34	0.80	2.72E+05	1.5
12 th June 2013	2012	1.03	0.71	2.56E+04	8
	2013	0.37	0.75	2.15E+04	-7
20 th June 2013	2012	1.06	0.68	1.95E+04	18
	2013	0.42	0.71	1.36E+05	-3
9 th April 2014	2012	0.92	0.57	6.83E+05	51
	2013	0.31	0.67	3.01E+05	-10
5 th June 2014	2012	1.02	0.65	2.95E+05	15
	2013	0.35	0.72	2.36E+05	-3

3. Generación cartografías diarias manto de nieve durante fusión: Conclusiones

Cartografía espesor de nieve generadas

- Generados mapas de espesor de nieve durante periodo de fusión.
- Permite crear una base de datos para mejorar la comprensión de procesos áreas inivadas.
- Método simple con datos adquiridos automáticamente.
- Mejora con calibración TLS: Desviaciones volumen <20%.
- Posible limitación: fuertes acumulaciones y extensión espacial.



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

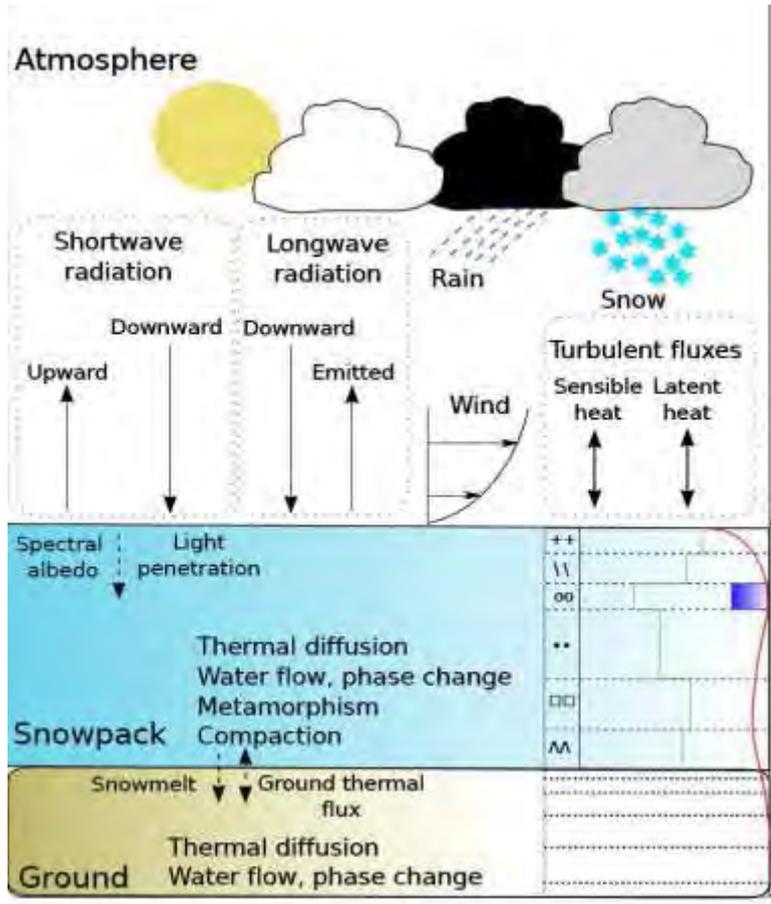
2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión

4. Utilización de datos TLS para la mejora de simulaciones del manto de nieve

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Metodología



Modelo base física simulación manto de nieve
Crocus (Brun et al., 1989, 1992, Vionnet et al., 2012):

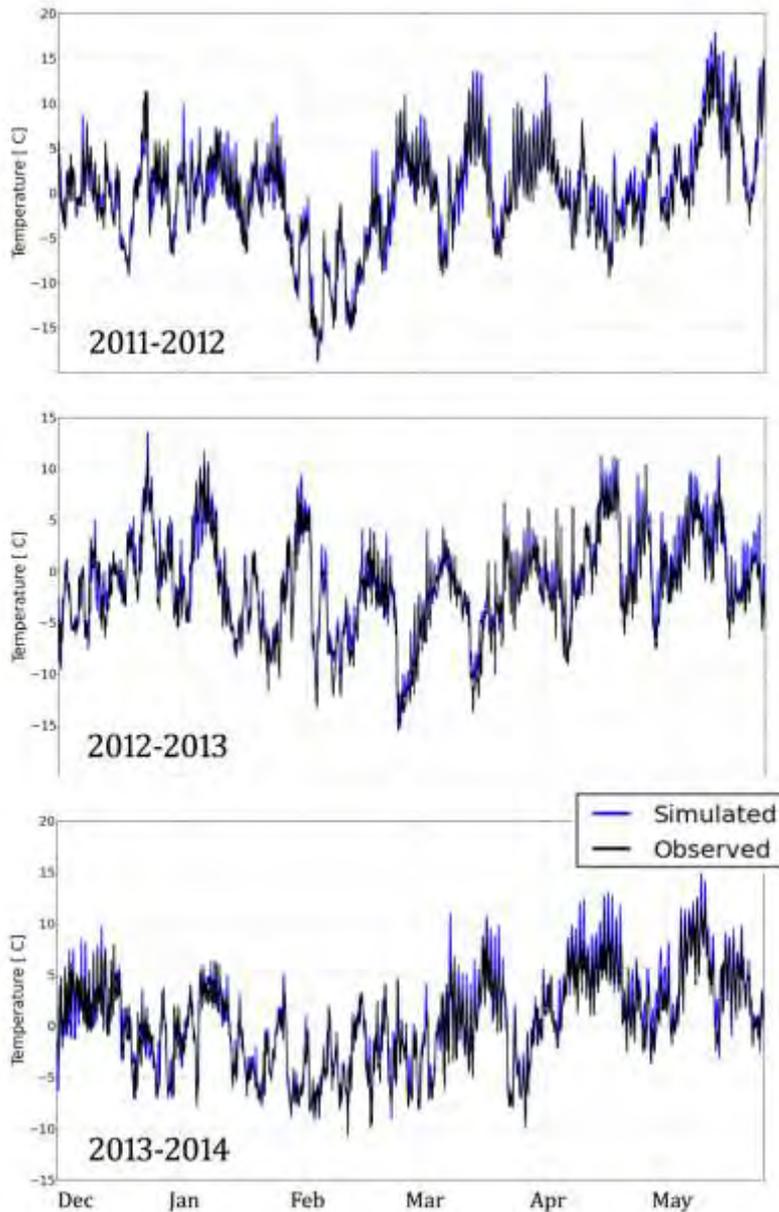
- Modelo multicapa
- Simula balance de masa y energía (entre capas y cristales de nieve)
- Necesita forzamiento atmosférico (SAFRAN)

Objetivo: Incluir efectos topográficos a pequeña escala (10-200m) en simulaciones manto de nieve.

4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Metodología



4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Metodología



SAFRAN:

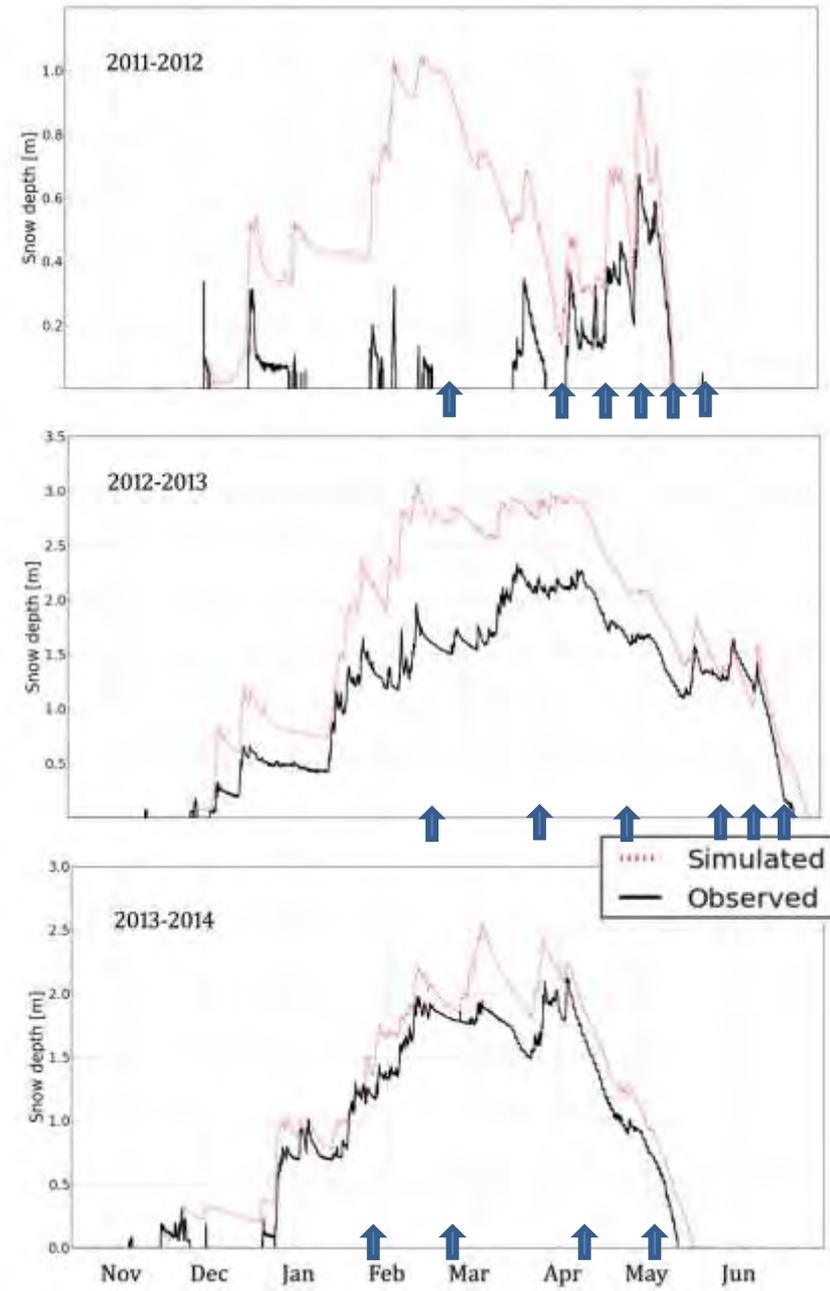
- Validación temperatura: $RMSE=1,54^{\circ}C$
- Viento medido torre meteo distribuido espacialmente (Winstral et al., 2009)

4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Metodología

Simulación Crocus en la estación meteorológica:

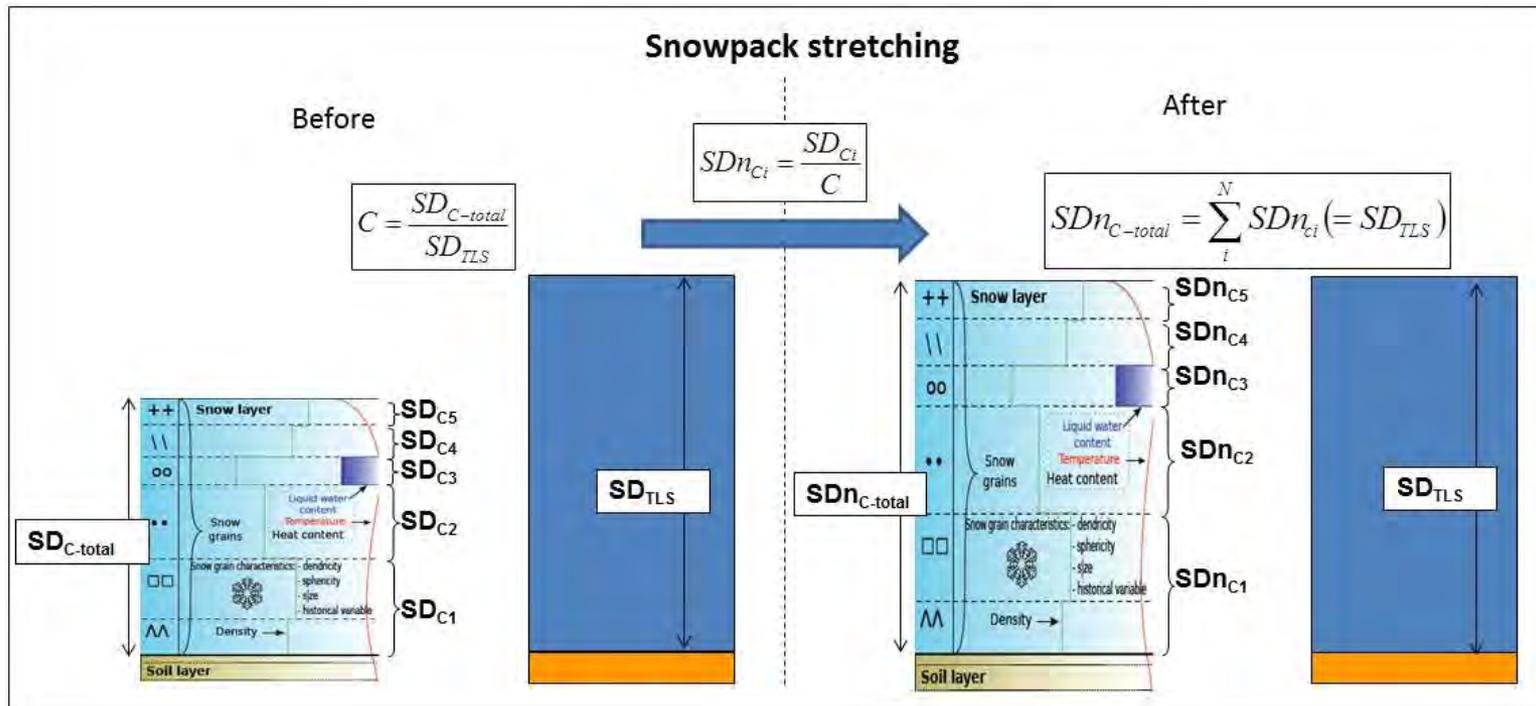
Existen desviaciones en espesor de nieve simulado

- Errores modelo meteorológico (precipitación)
- Erosión por viento



4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Metodología

Ajuste de la distribución del espesor de nieve simulada a los datos observados:
“Snowpack stretching”



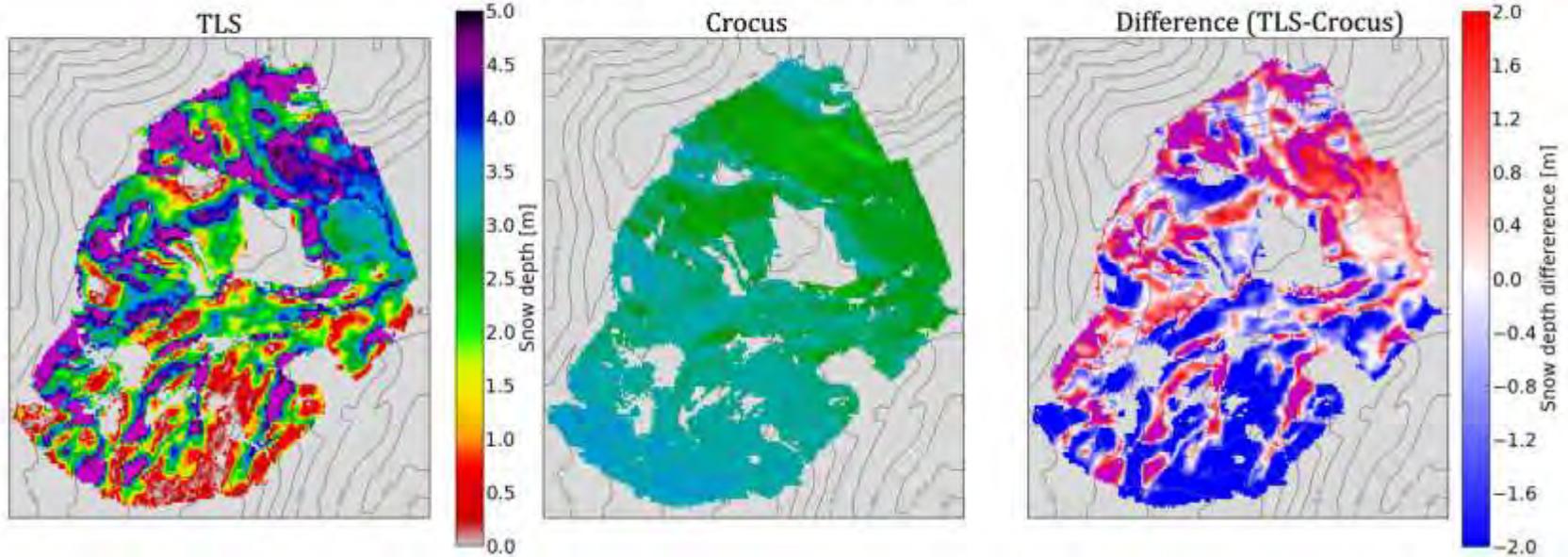
3 simulaciones evolución manto de nieve e Izas (2011-12, 2012-13, 2013-14):

- Todas adquisiciones TLS: *AllStretch*
- Corrección TLS antes fusión: *MeltStretch*
- Sin corrección(validación): *NoStretch*

4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Resultados

Simulación Crocus distribuida

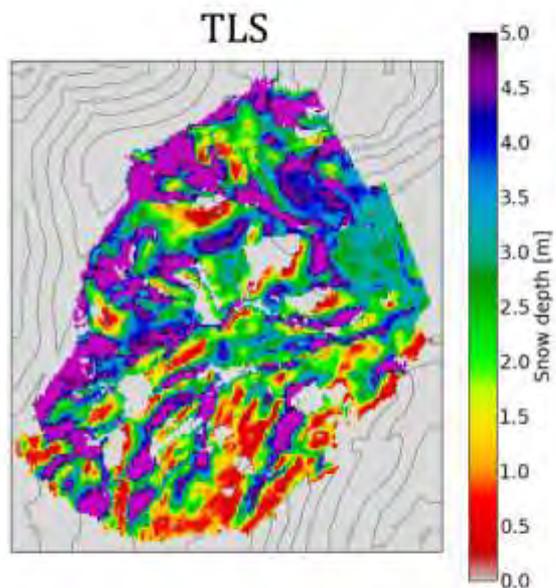
17 Feb. 2013 snow depth distribution



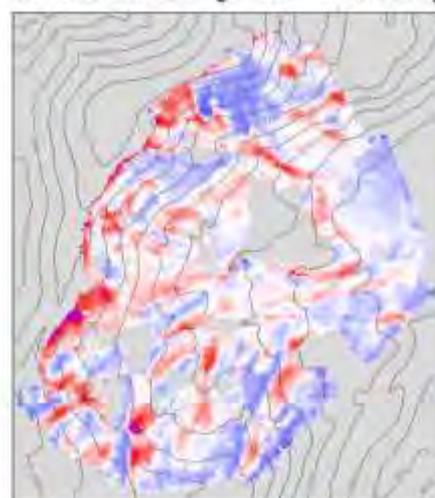
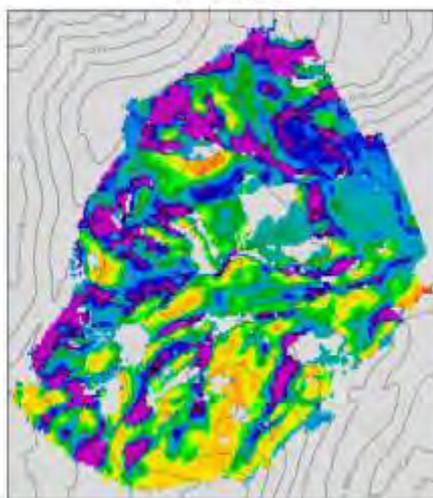
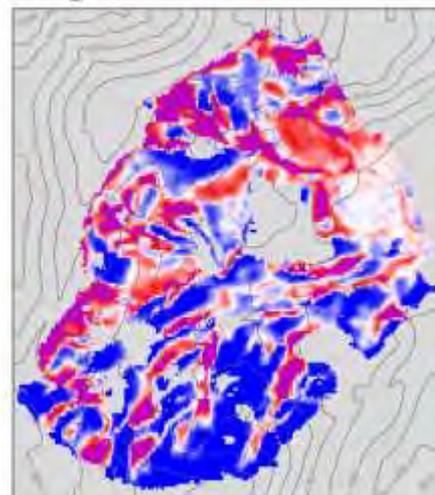
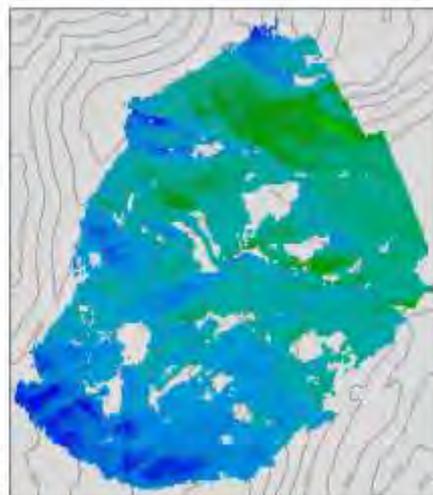
4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Resultados

Simulación Crocus distribuida

3 April 2013 snow depth distribution



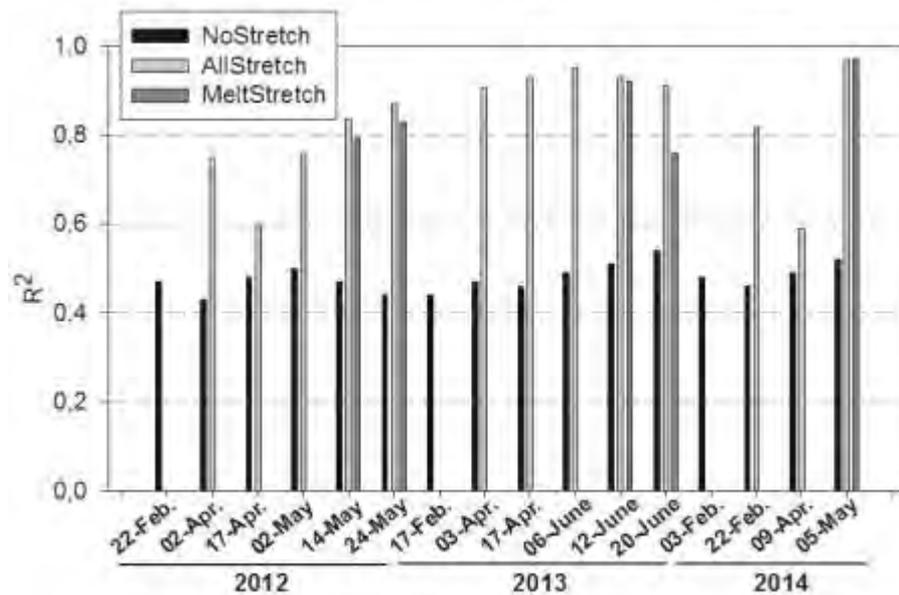
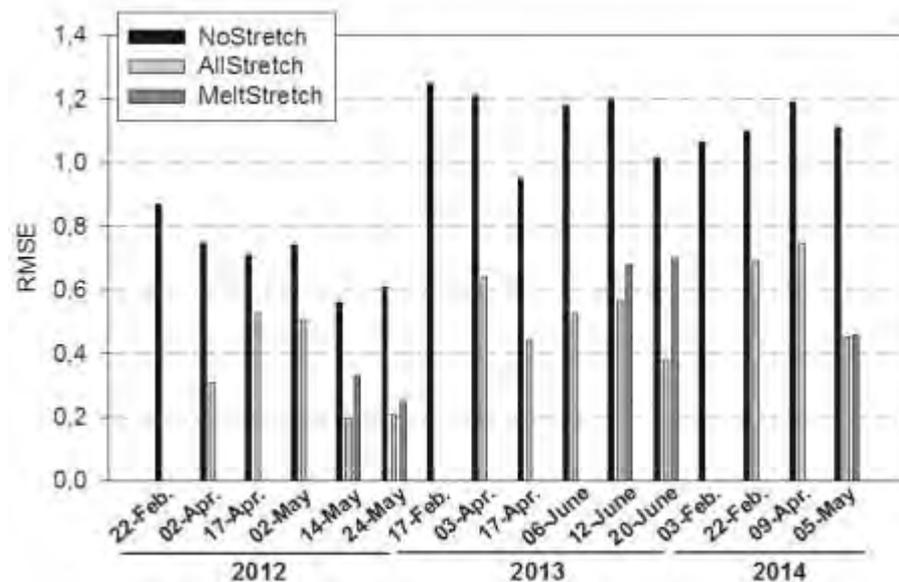
No stretching



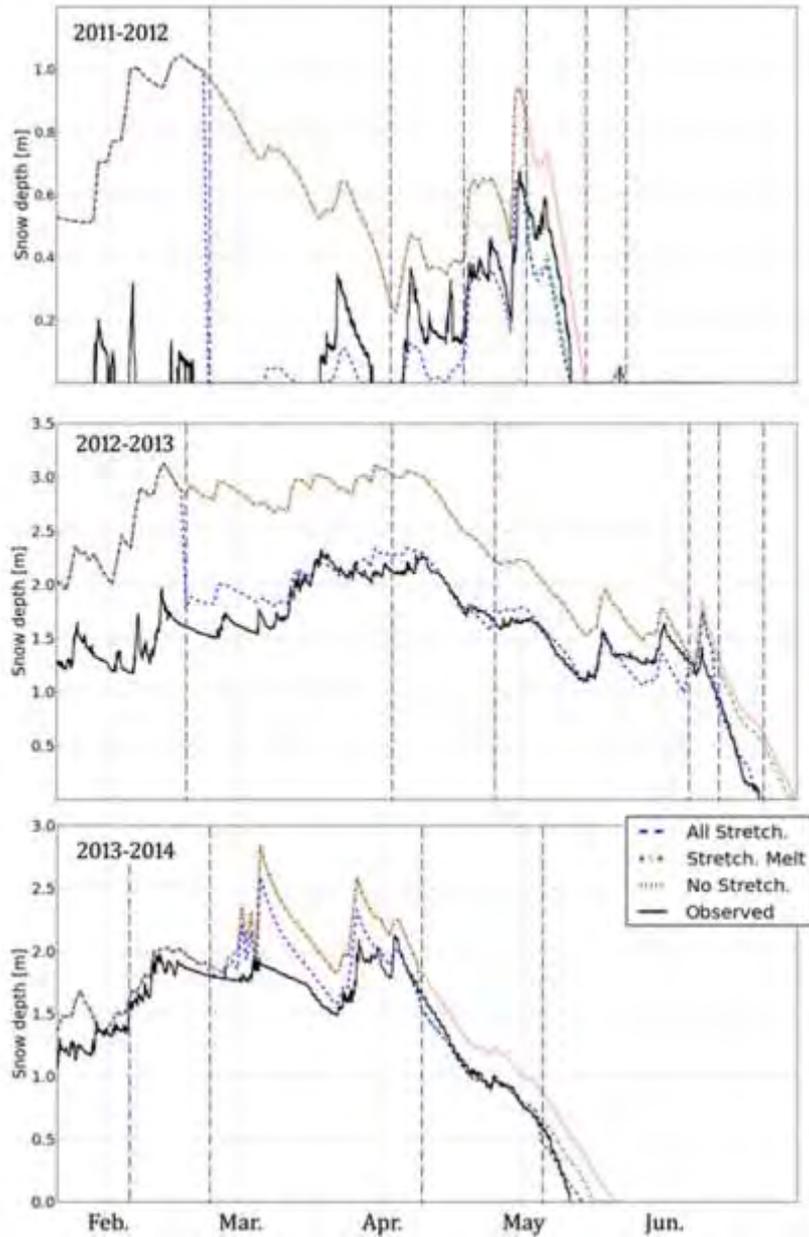
4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Resultados

Simulación distribuida:

- Estimaciones de error



4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Resultados



Evolución temporal simulaciones:

- Torre meteorológica

4. Utilización datos TLS para mejorar simulaciones del manto de nieve: Conclusiones

Corrección de simulaciones de un modelo de base física con datos TLS:

Método que permite corregir de manera distribuida algunas de las limitaciones actuales de los modelos:

- Permite incluir efecto topografía.
- Corrige desviaciones simulaciones meteorología.



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión

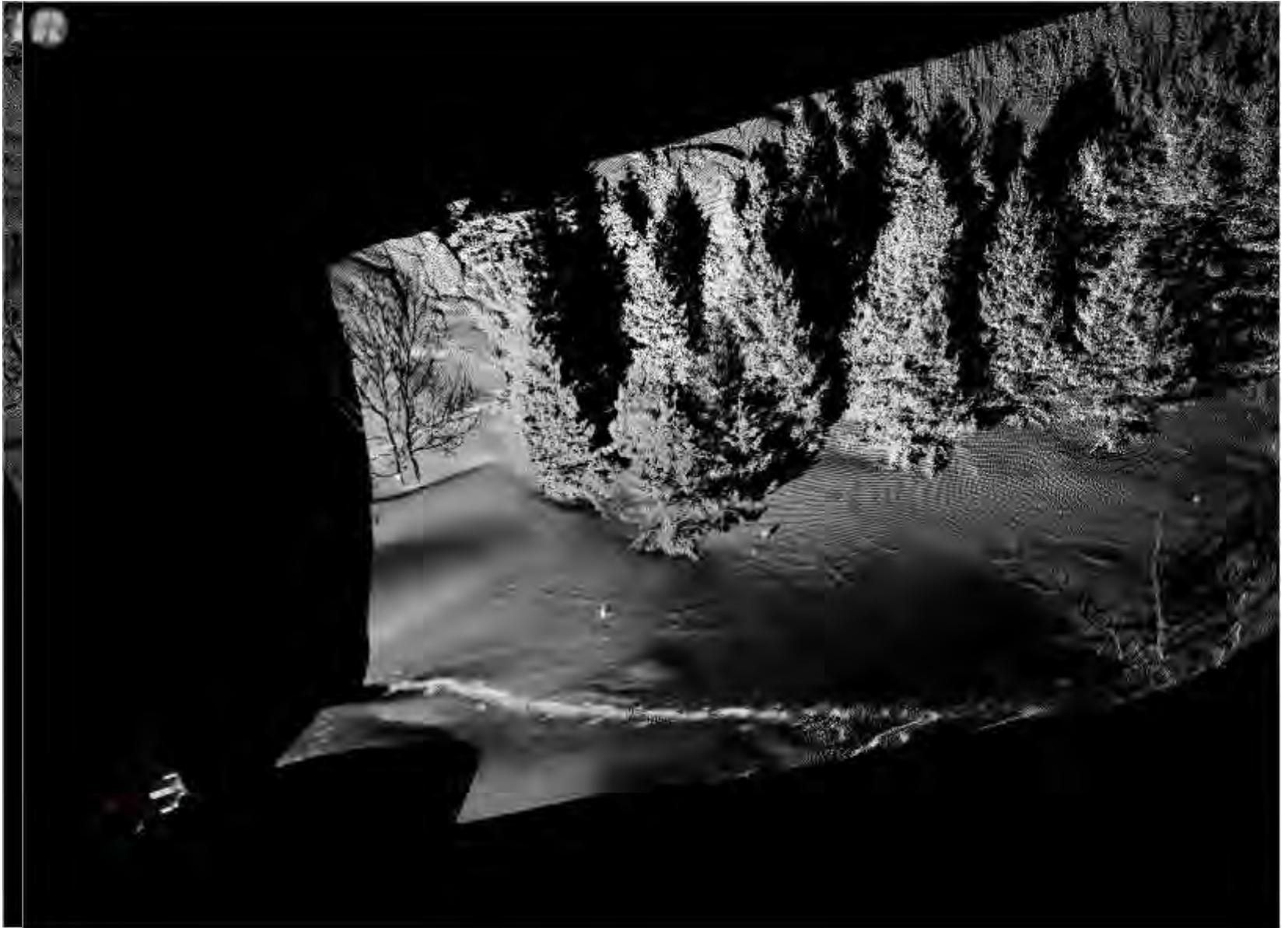
4. Utilización de datos TLS para la mejora de simulaciones del manto de nieve

5. Influencia del bosque en la evolución espacial del manto de nieve

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

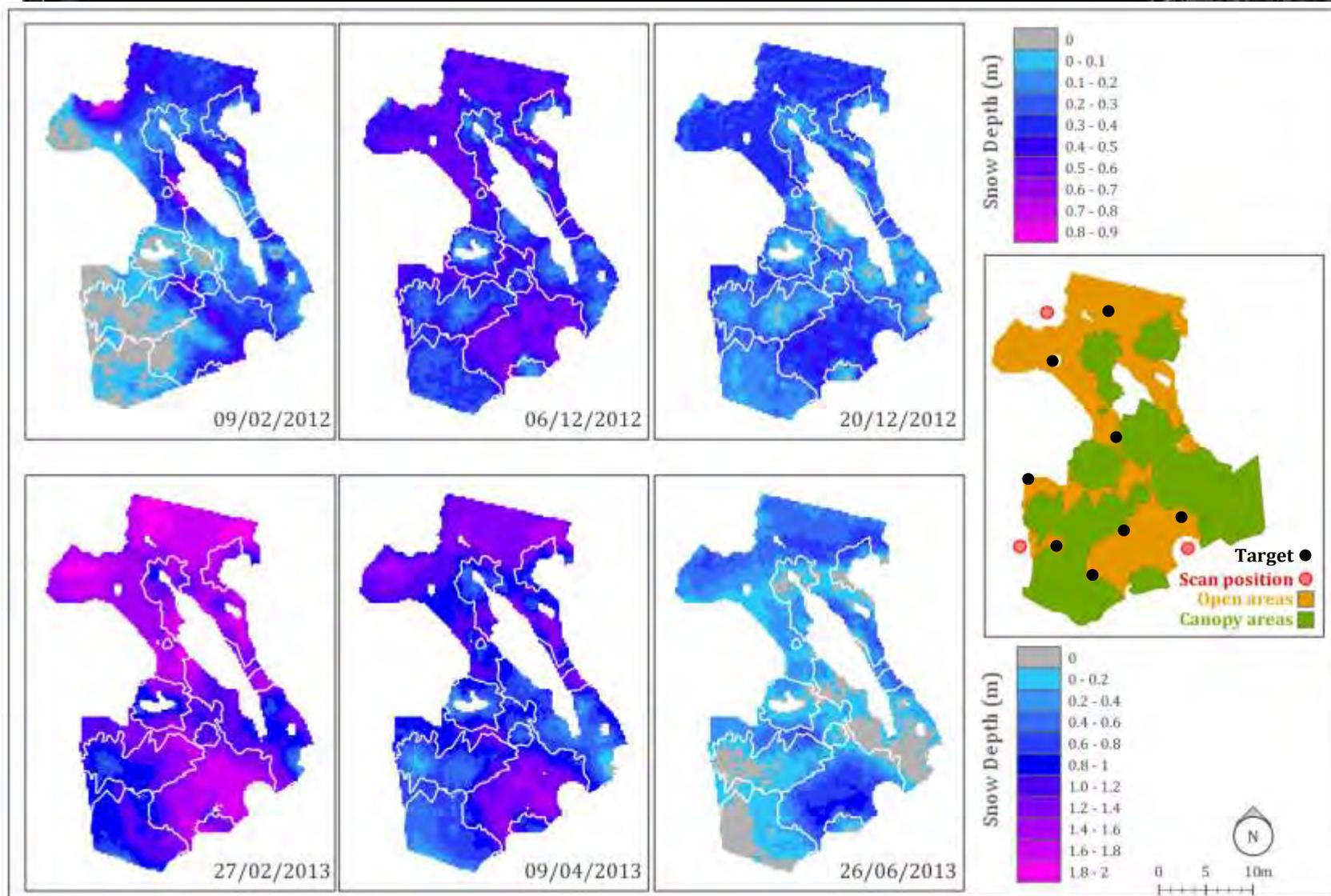
5. Influencia bosque distribución manto de nieve: Metodología

Adquisición espesor de nieve en zona forestal



5. Influencia bosque distribución manto de nieve: Metodología

Adquisición espesor de nieve en zona forestal



5. Influencia bosque distribución manto de nieve: Metodología

Determinar influencia a pequeña escala del dosel forestal en la distribución espacio-temporal del manto de nieve.

- 20 mapas distribución de nieve (alta resolución, 11000celdas/día)
- 2 temporadas invernales (climatologías muy contrastadas)
- Distribución espacial troncos y copas árboles

Análisis aplicados:

- Análisis de Componentes Principales (Baeriswyl y Rebetez 1997)
 - Limite componentes analizada: 10% varianza explicada
 - Rotación Varimax (Richman, 1986)
 - ModoT: Variables días, casos celdas (anomalías respecto acumulación media diaria)
- Evolución espesor de nieve VS distancia tronco

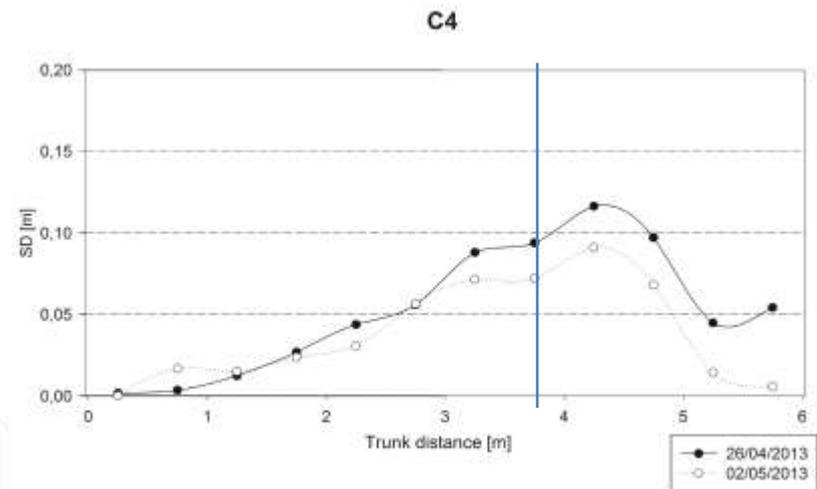
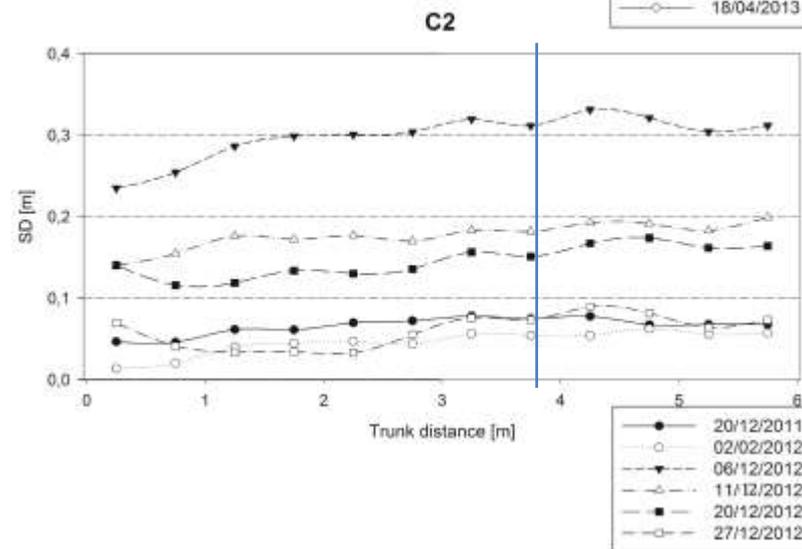
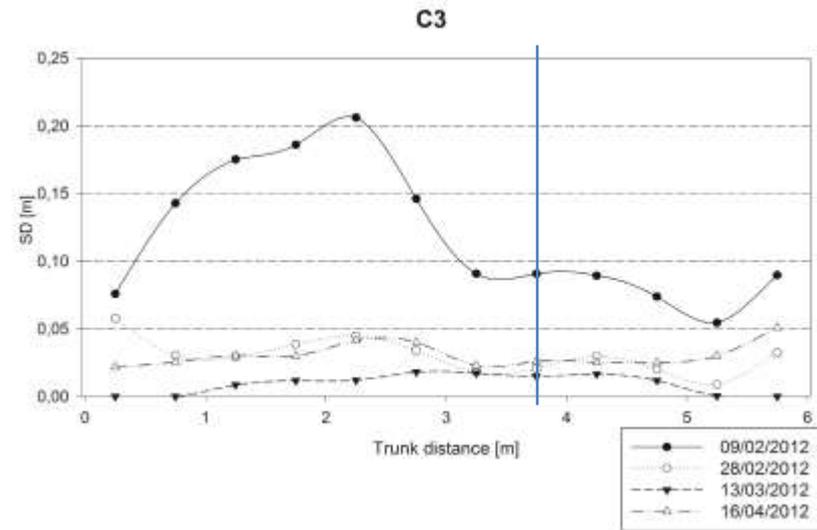
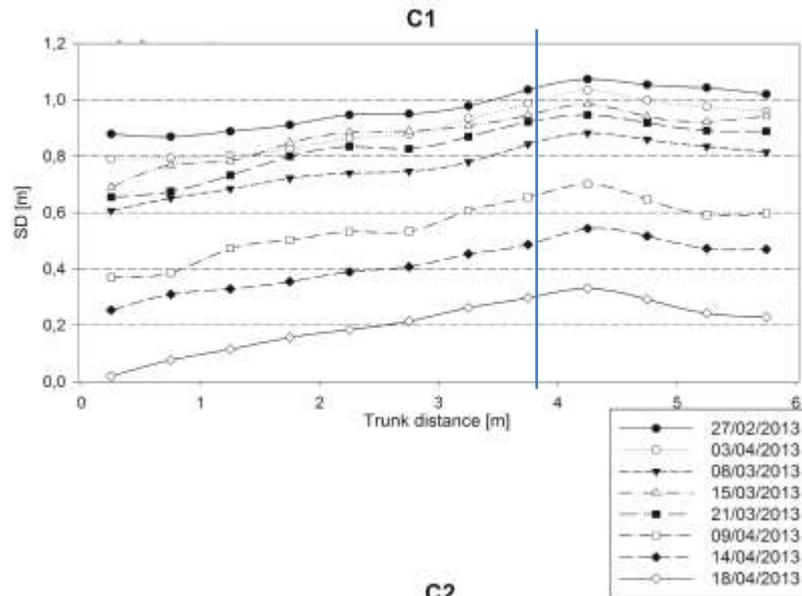
5. Influencia bosque distribución manto de nieve: Resultados

Análisis PCA días muestreados

PCA component	Survey date	Open AvgSD [m]	Canopy AvgSD [m]	Diff.Open-Cnpy [%]	Avg Dif. %
C1 Espesor elevado	27/02/2013	1.53	1.11	28	37
	04/03/2013	1.45	1.04	28	
	08/03/2013	1.29	0.90	30	
	15/03/2013	1.53	1.04	32	
	21/03/2013	1.45	0.98	33	
	09/04/2013	1.14	0.67	41	
	14/04/2013	0.96	0.51	46	
	18/03/2013	0.73	0.29	60	
C2 Espesor reducido	20/12/2011	0.16	0.08	52	52
	02/02/2012	0.15	0.05	69	
	06/12/2012	0.49	0.32	36	
	11/12/2012	0.30	0.19	37	
	20/12/2012	0.30	0.15	51	
	27/12/2012	0.22	0.07	70	
C3 Acción viento	09/02/2012	0.26	0.13	50	53
	28/02/2012	0.14	0.03	81	
	13/03/2012	0.03	0.01	68	
	16/04/2012	0.02	0.01	14	
C4 Final temporada	26/04/2013	0.41	0.10	76	78
	02/05/2013	0.30	0.06	80	

5. Influencia bosque distribución manto de nieve: Resultados

Análisis PCA días muestreados



5. Influencia bosque distribución manto de nieve: Conclusiones

- Primera aplicación TLS para medir espesor de nieve en zona forestal.
- Reducción media espesor bajo árboles: 49%
- Mayores espesores: menores diferencias zonas cubiertas dosel- zonas abiertas.
- Fusión aumenta diferencias zonas cubiertas dosel- zonas abiertas.
- Duración manto zonas cubiertas < zonas abiertas (Temperatura DJF >-1°C, Lundquist et al., 2013).



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión

4. Utilización de datos TLS para la mejora de simulaciones del manto de nieve

5. Influencia del bosque en la evolución espacial del manto de nieve

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

El glaciar de Monte Perdido: Monitorización y estudio de su dinámica actual y procesos criosféricos asociados como indicadores de procesos de cambio global.



Escuela Politécnica
Superior - Huesca
Universidad Zaragoza



Universidad de Valladolid



universidad
del país vasco euskal herriko
unibertsitatea



J.I. López-Moreno ¹, J.M. García-Ruiz ¹, C. Azorín-Molina ¹, J. Revuelto ¹, A. Serreta ², E. Serrano-Cañada ³, I. Rico ⁴, M. Del Río ⁵, O. Monserrat ⁶, G. Luzi ⁶

1. Dep. Procesos Geoambientales y Cambio Global. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC.
2. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza
3. Dep. Geografía. Universidad de Valladolid
4. Dep. de Geografía, Prehistoria y Arqueología. Universidad del País Vasco
5. Escuela Politécnica de Cáceres. Universidad de Extremadura
6. Geomatic Division. Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya



1911
Abbé L. Gaurier



2009
Gabriel Nogué

*Pierre René (2013).
Glaciers des Pyrénées: le
rechauffement climatique en
images. Ed. Cairn*



1857
Aimé Civiale



2010
Gabriel Nogué

*Pierre René (2013).
Glaciers des Pyrénées: le
rechauffement climatique en
images. Ed. Cairn*

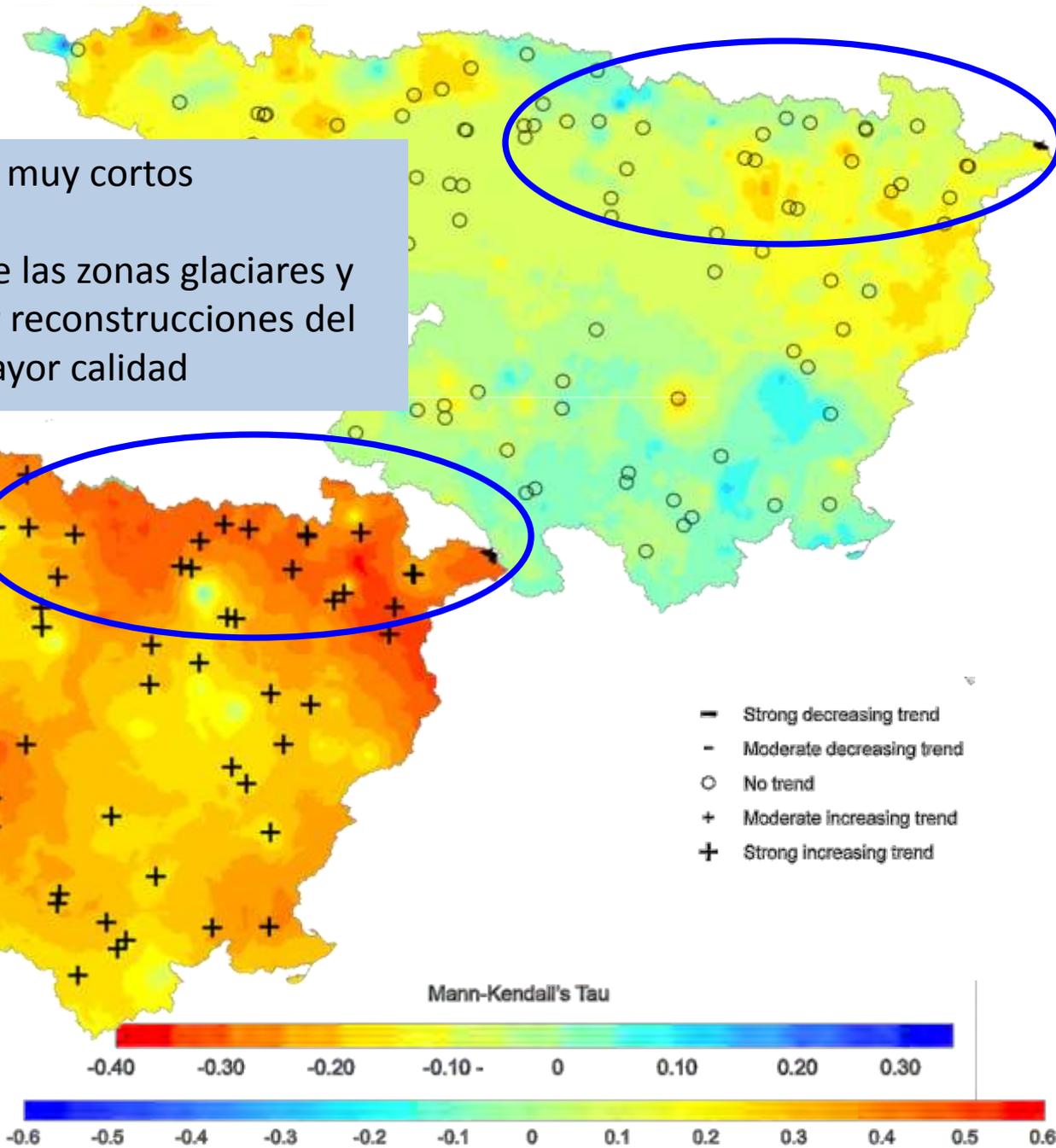
Clima

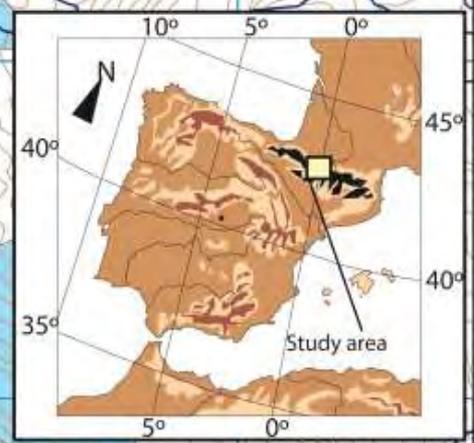
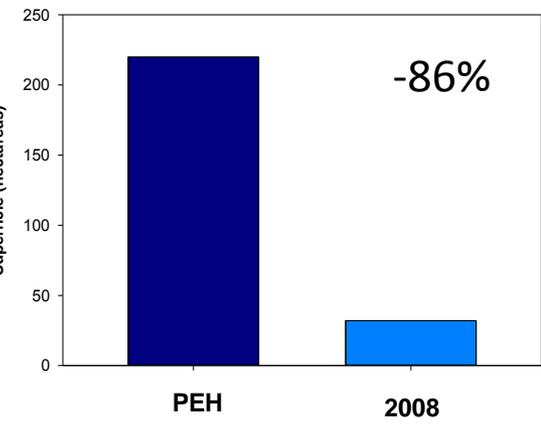
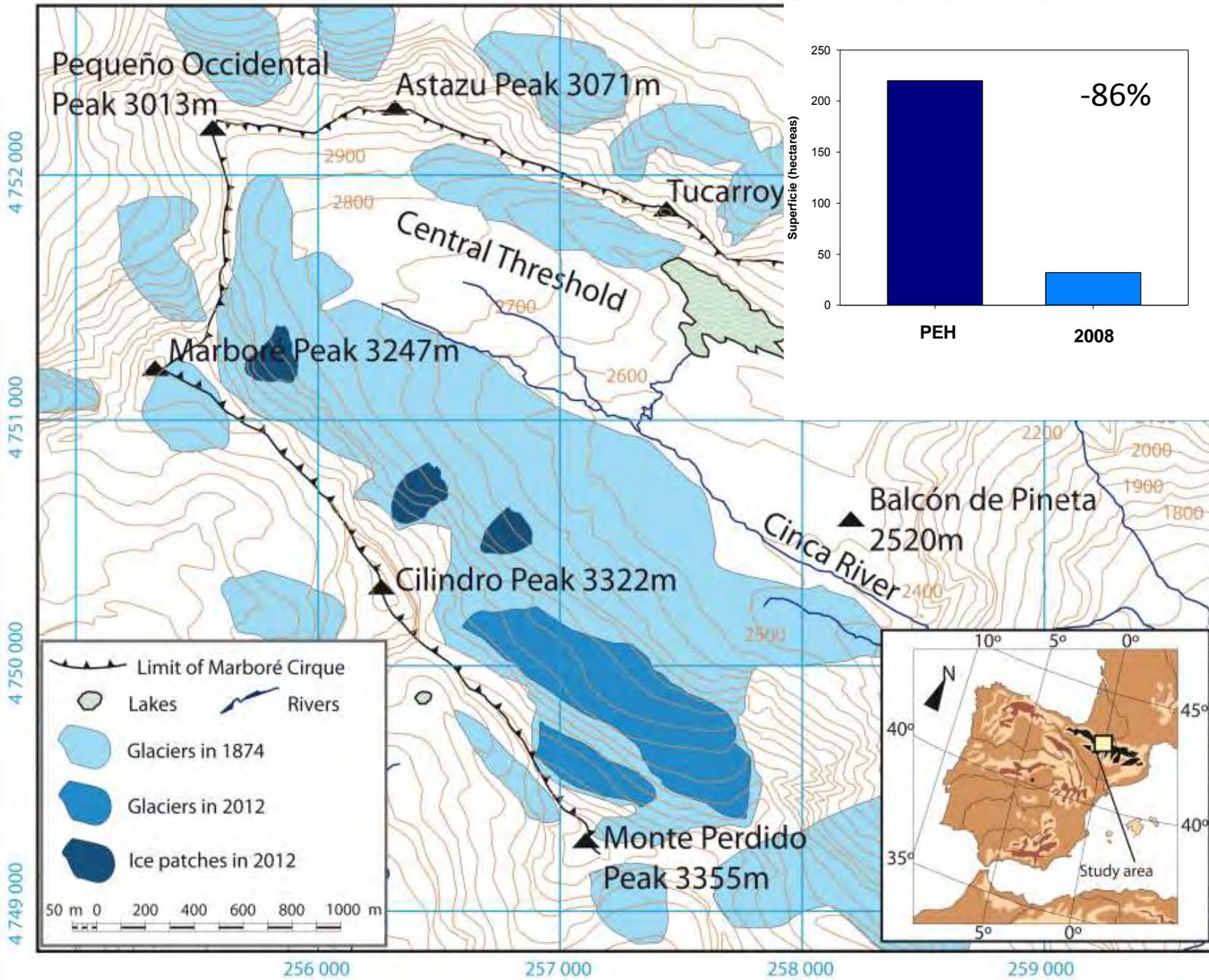
Tendencias 1950-2010

Registros climáticos muy cortos

Conocer la dinámica actual de las zonas glaciares y periglaciares permite generar reconstrucciones del clima pasado de mayor calidad

Temperatura





1981
Foto: J.M. García-Ruiz



B.G.A., 8 (2007): 31-60

A. Julián & J. Chueca



Figura 3. Pérdidas de extensión (se indican los perímetros glaciares en 1981 y 1999) y de espesor de hielo (1981-1999) en el glaciar Superior de Monte Perdido.

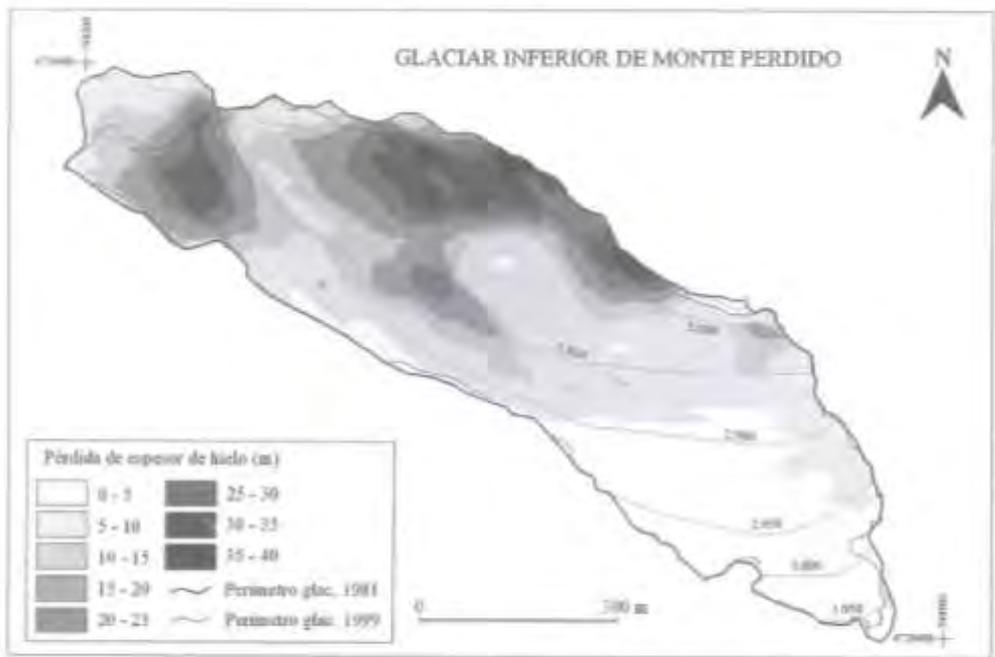
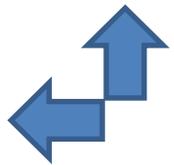


Figura 4. Pérdidas de extensión (se indican los perímetros glaciares en 1981 y 1999) y de espesor de hielo (1981-1999) en el glaciar Inferior de Monte Perdido.

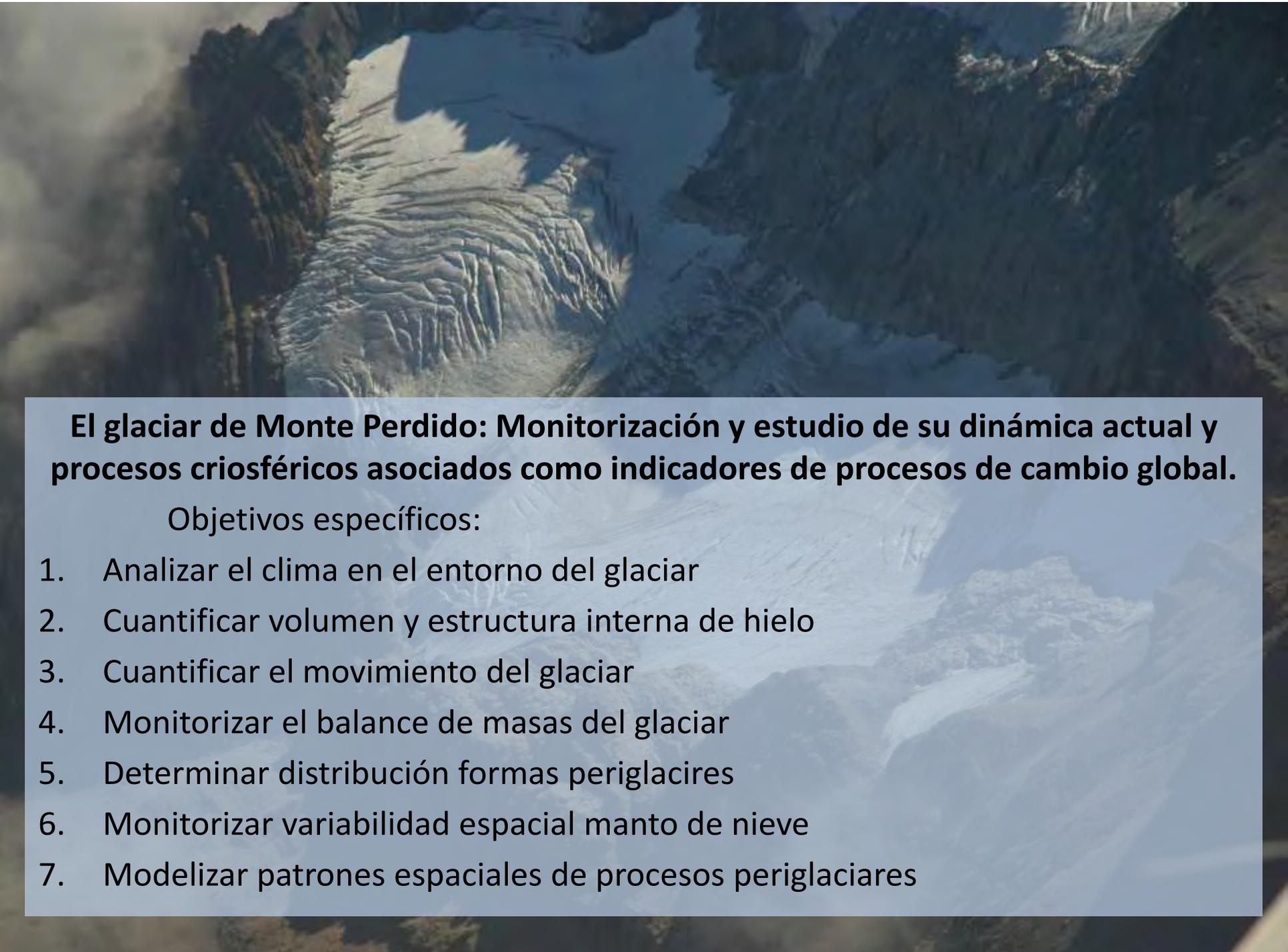
Superior: 6.2 metros

Inferior: 8.7 metros



Pérdida media de espesor

• Error medio estimado 2.12 mts

An aerial photograph of a glacier flowing through a mountain valley. The glacier is a light blue-grey color, contrasting with the dark, rocky terrain of the surrounding mountains. The valley floor is filled with the glacier's flow, showing some internal structures and shadows. The sky is a pale blue, and the overall scene is a high-altitude, rugged landscape.

El glaciar de Monte Perdido: Monitorización y estudio de su dinámica actual y procesos criosféricos asociados como indicadores de procesos de cambio global.

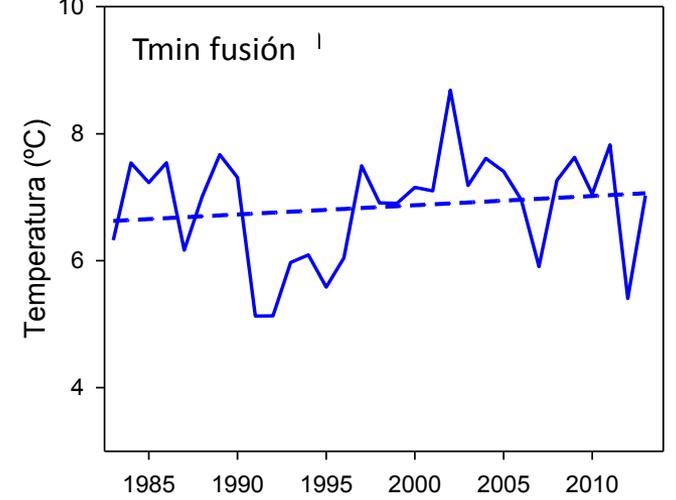
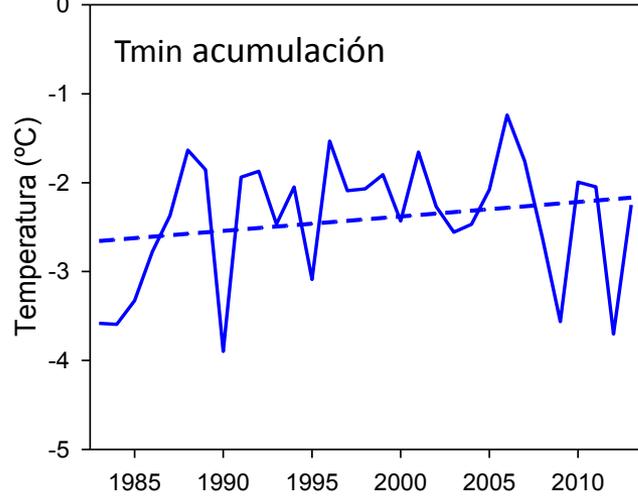
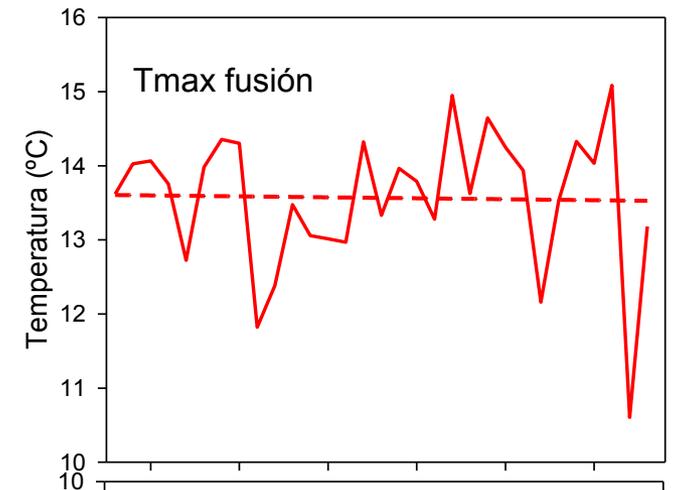
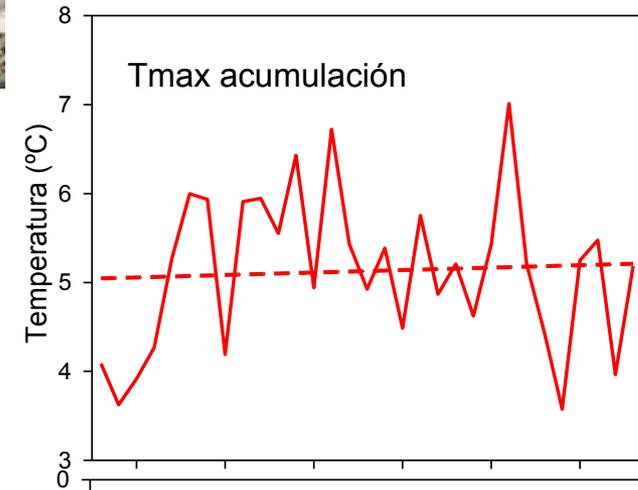
Objetivos específicos:

1. Analizar el clima en el entorno del glaciar
2. Cuantificar volumen y estructura interna de hielo
3. Cuantificar el movimiento del glaciar
4. Monitorizar el balance de masas del glaciar
5. Determinar distribución formas periglaciares
6. Monitorizar variabilidad espacial manto de nieve
7. Modelizar patrones espaciales de procesos periglaciares



1. Analizar el clima en el entorno del glaciar

Estación más próxima con registro "largo": Goriz





En las últimas tres décadas el glaciar ha mostrado un fuerte deterioro.



Las condiciones climáticas no explican claramente dicho deterioro.

1. Analizar el clima en el entorno del glaciar



Microestación meteorológica
(T^a, HR, Radiación, V viento)



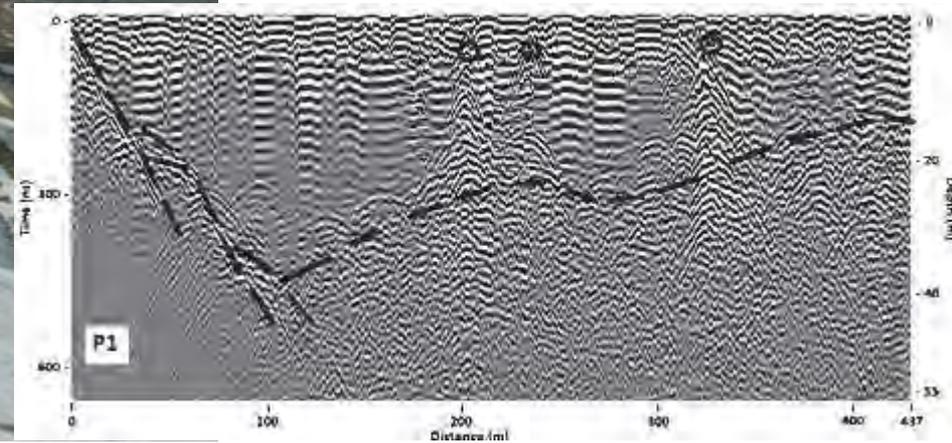
2. Cuantificar volumen y estructura interna de hielo

Utilización *Ground Penetrating Radar* (GPR): Georadar RAMAC/GPR (Måla GeoScience)

- Equipo multifrecuencia: 200-500MHz



Campaña medición:
Abril-Mayo 2016



3. Cuantificar el movimiento del glaciar

Interferometría *Ground-Based SAR* : IBIS-L

- Medición cambios en tiempo real (periodo largo)
- Emisión en banda microondas con variaciones posición del sistema

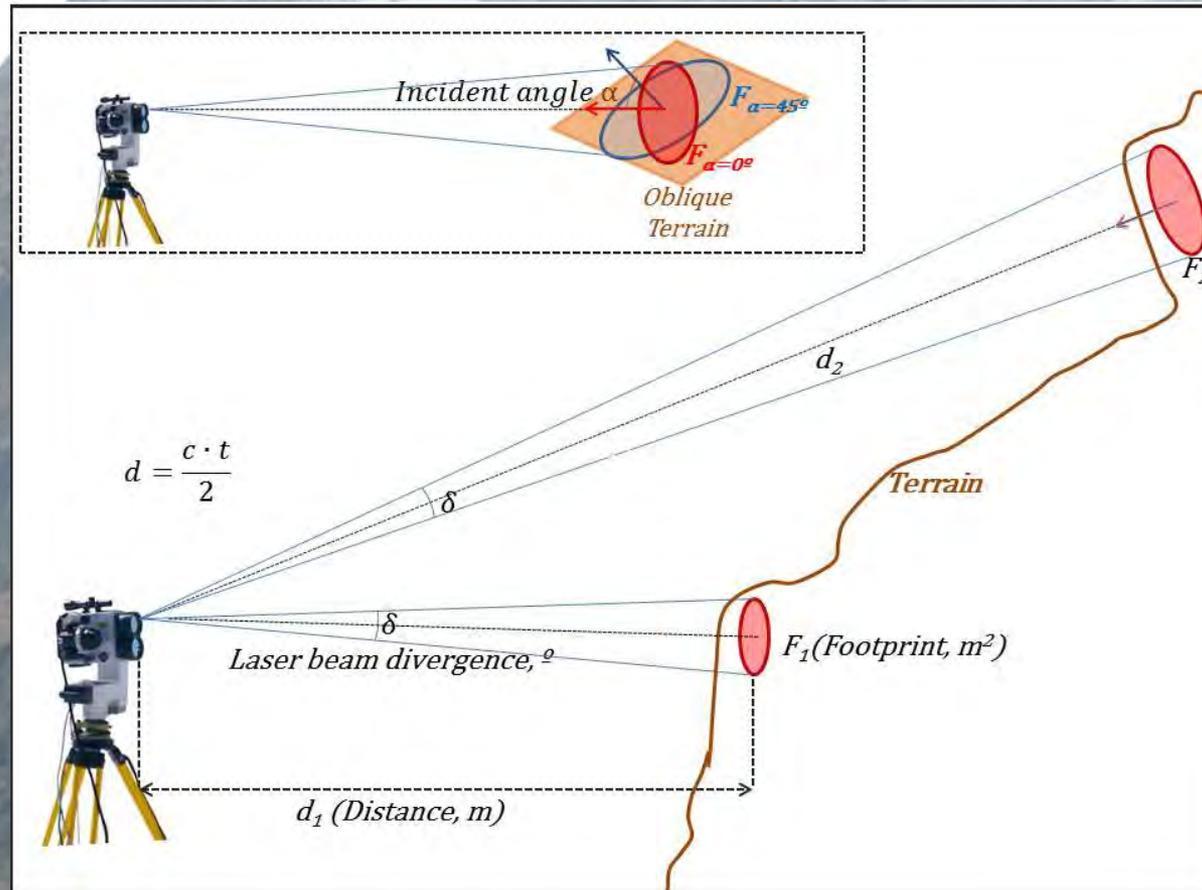


Primera medición
realizada:
Julio-Septiembre 2015

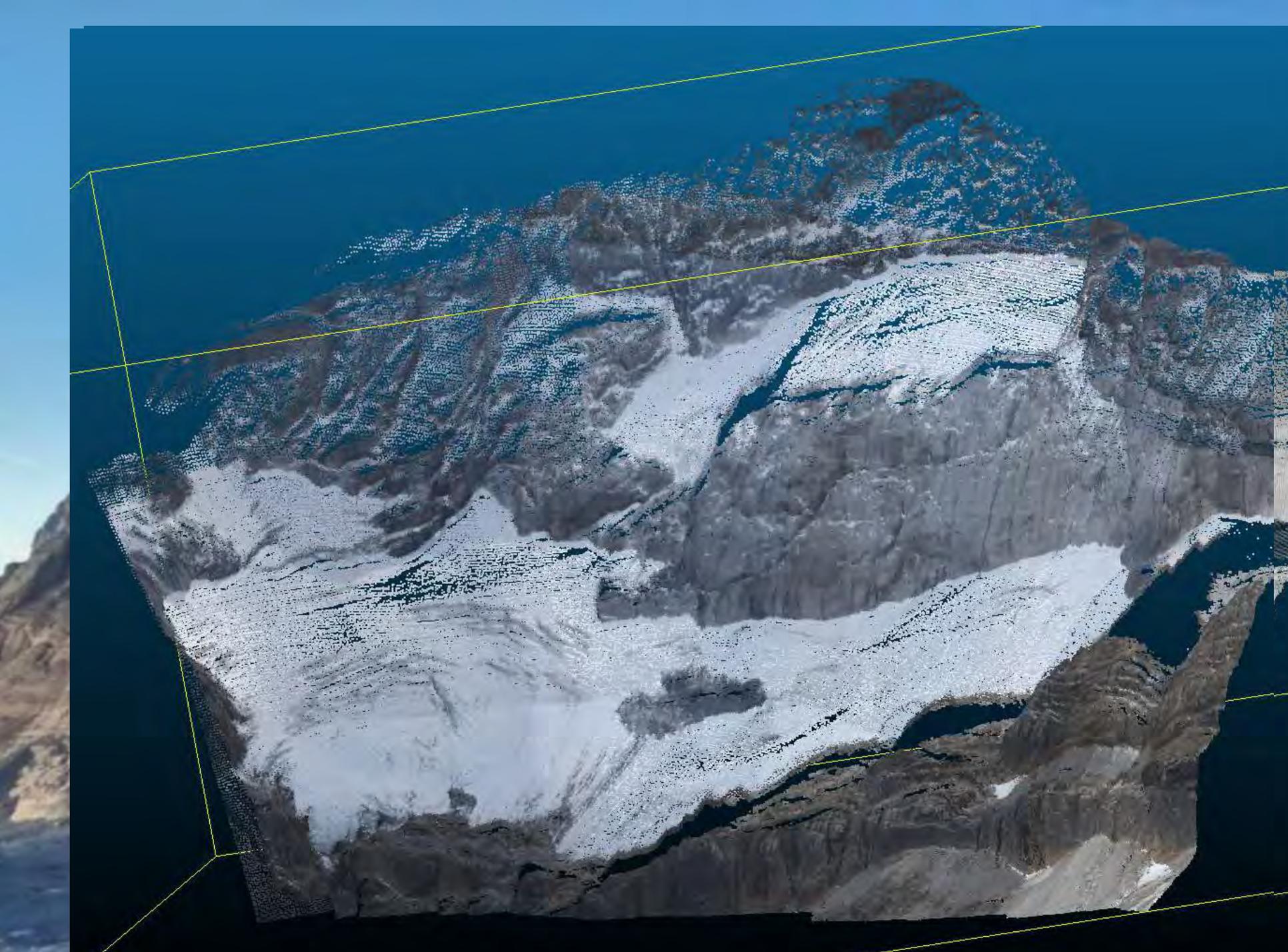
4. Monitorizar el balance de masa del glaciar

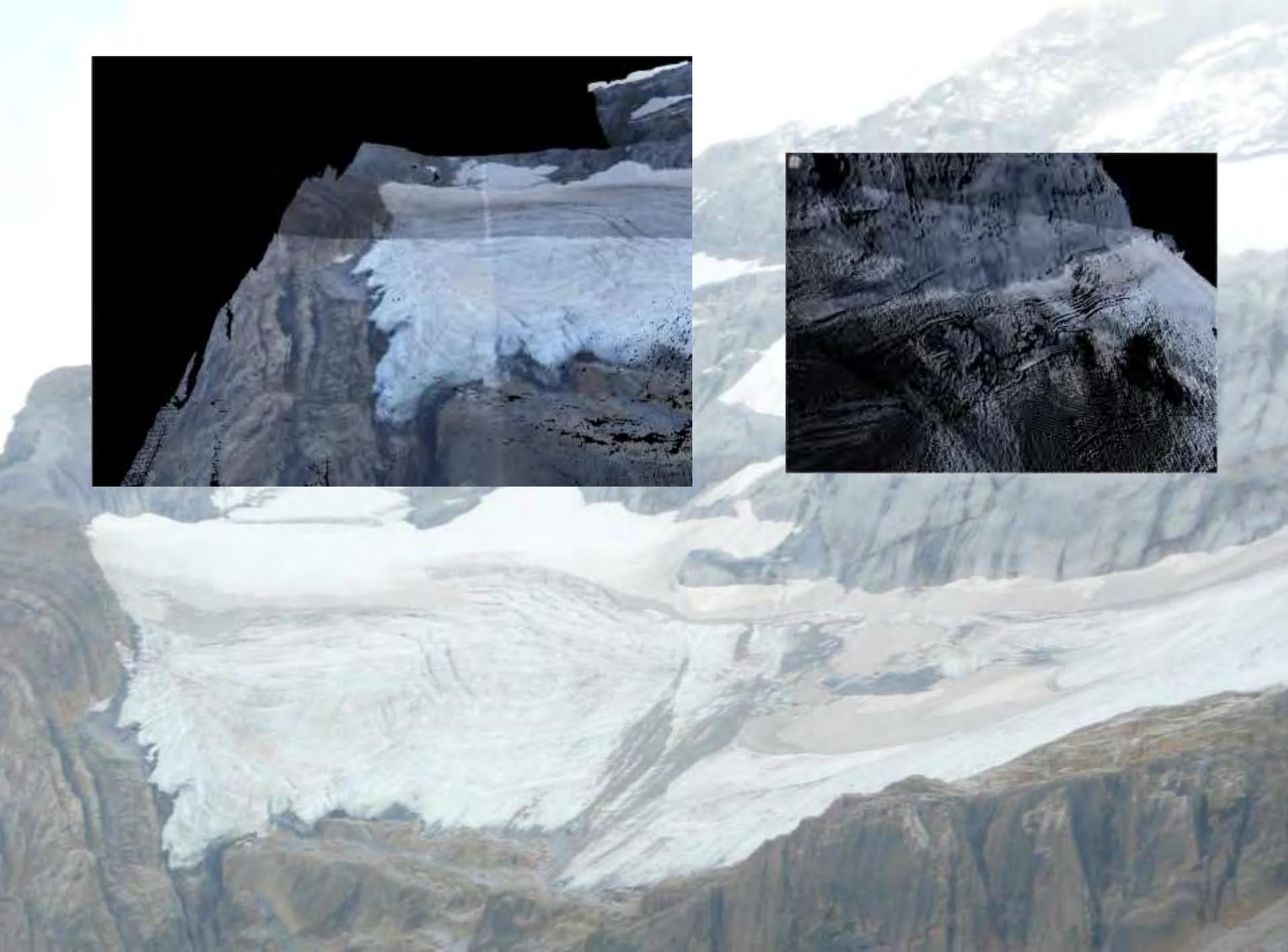
Aplicación Tecnología LiDAR con un Láser Escáner Terrestre (TLS): RIEGL LPM-321

- Distancia de escaneo: 1500-3000 m.
- Tiempo de escaneo aprox. 12 horas
- Georeferenciación: dianas móviles, coordenadas con GPS en modo RTK
- Resolución final de la información: 1,25-0,7ptos/m² (0,027°-0,036°)









Hasta la fecha 7 mediciones TLS:

- 5 mediciones en mínimo anual (finales septiembre): 2011 a 2015
- 2 mediciones en máximo anual (finales abril): 2014 y 2015

Año 2011-12

**Invierno particularmente seco
y verano muy cálido**

Año 2012-13

**Invierno particularmente
húmedo y verano fresco,
especialmente las máximas**

Año 2013-14

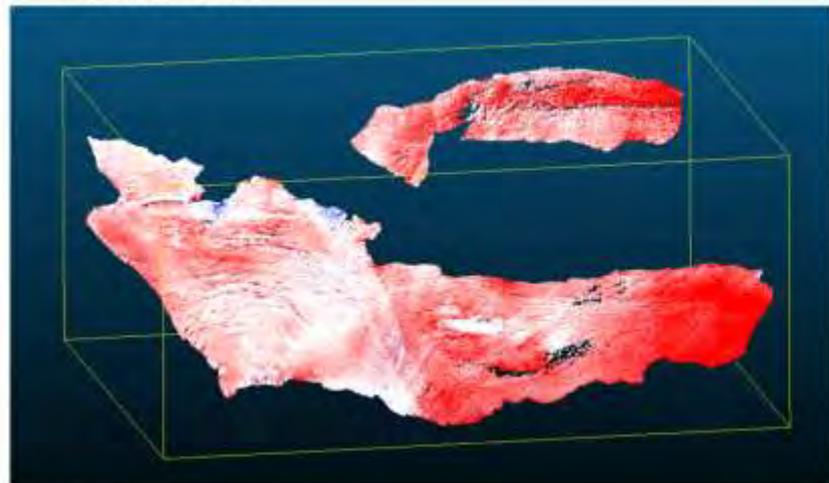
**Invierno muy húmedo y verano
fresco, especialmente las
máximas**

Año 2014-15

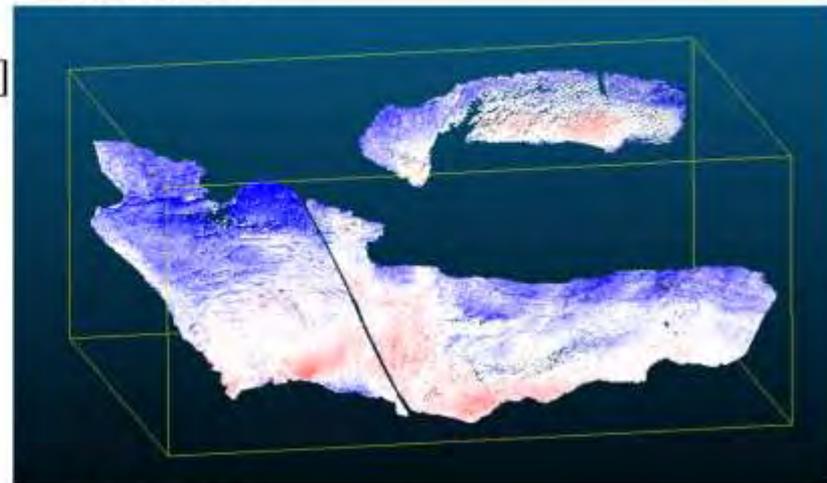
**Invierno húmedo y verano con
cálido muy prolongado**

Cambios en espesor de hielo (mínimo anual):

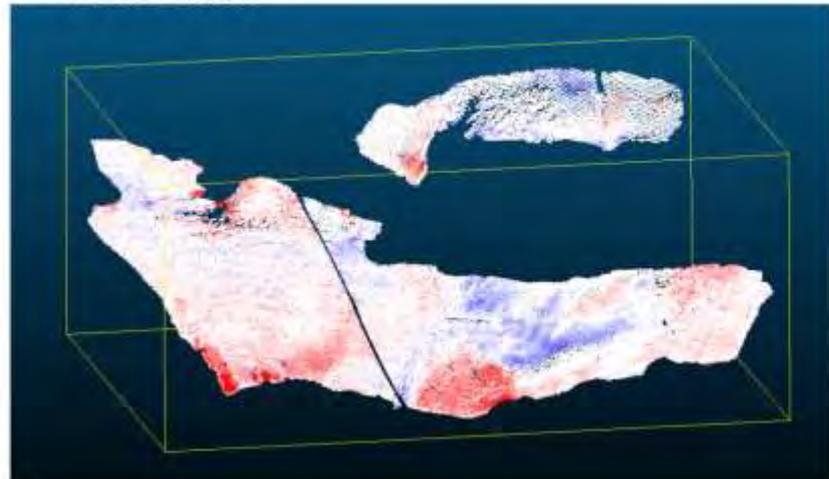
2011-2012



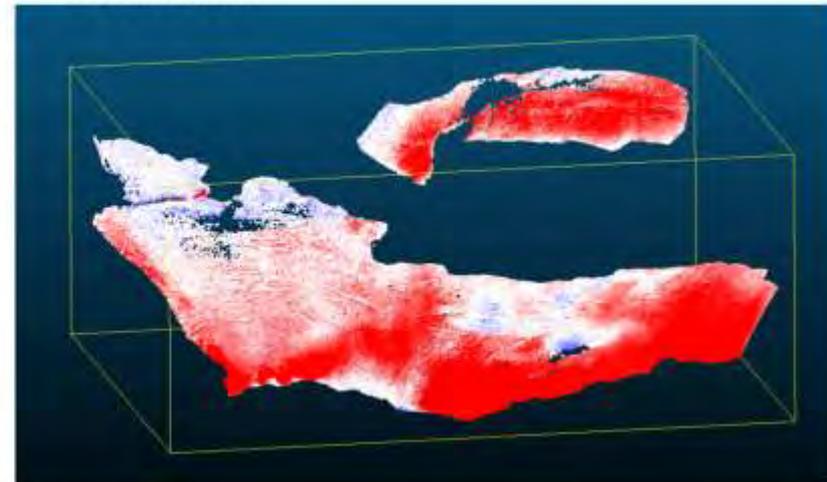
2012-2013



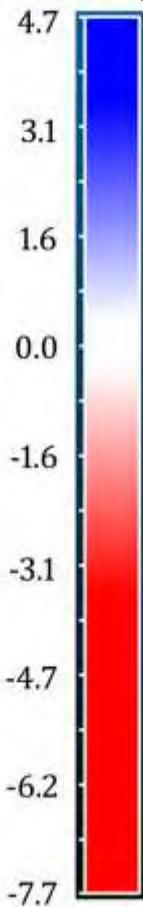
2013-2014



2011-2014



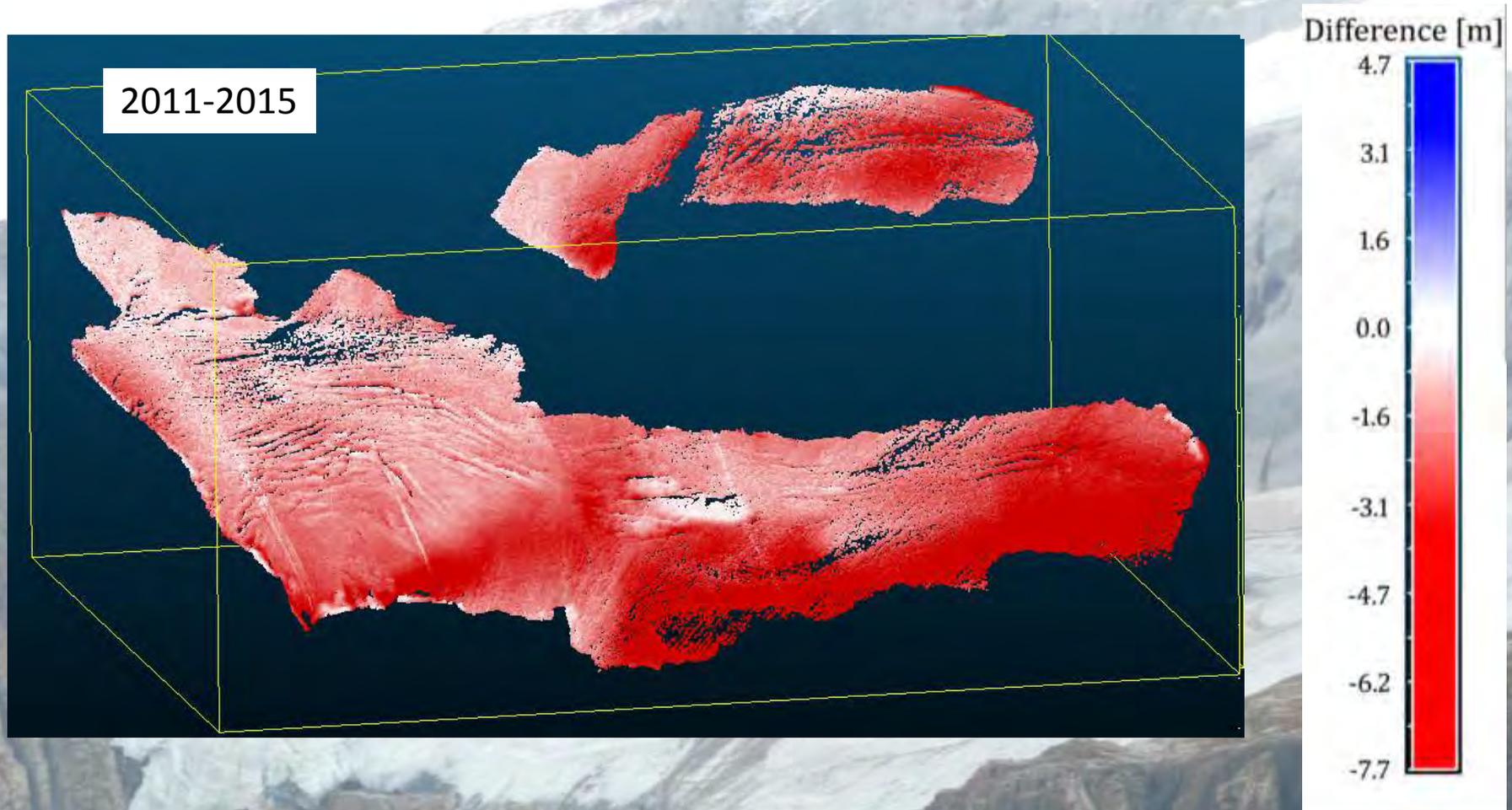
Difference [m]



Cambios en espesor de hielo:

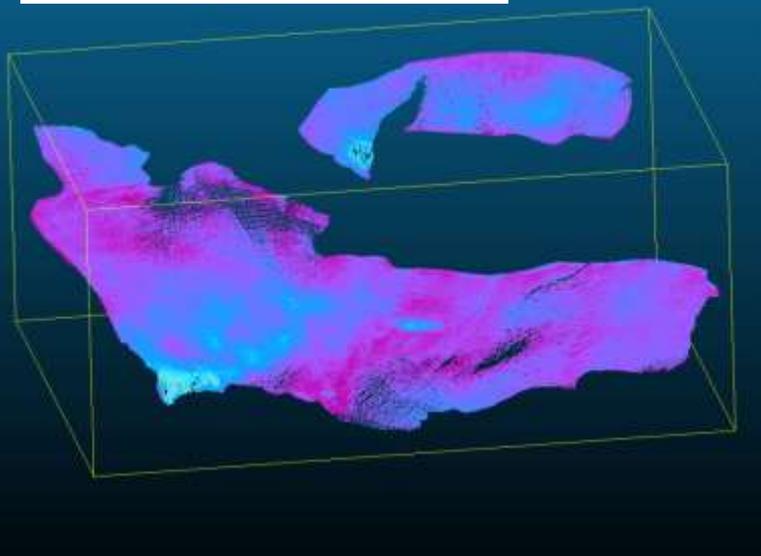
Posibles factores de variabilidad espacial:

- Altitud
- Exposición a la radiación solar
- ¿Distribución de la acumulación de nieve en invierno?

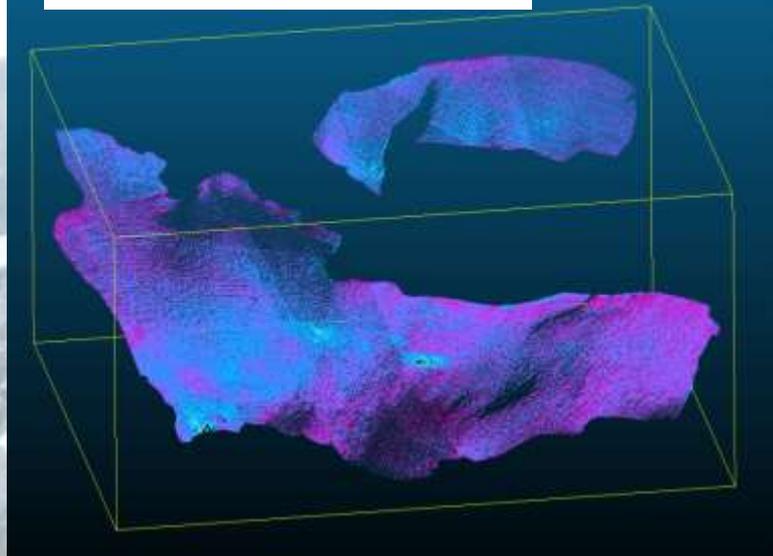


Distribución espesor de nieve sobre el glaciar (máximo-mínimos):

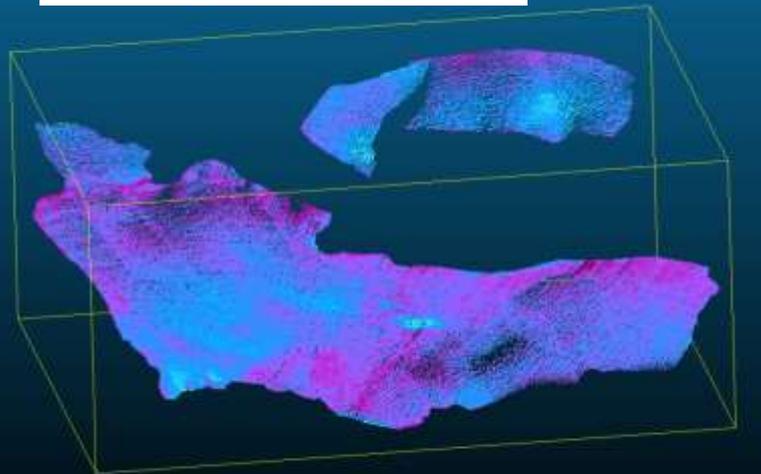
Mayo 2014- Sept 2013



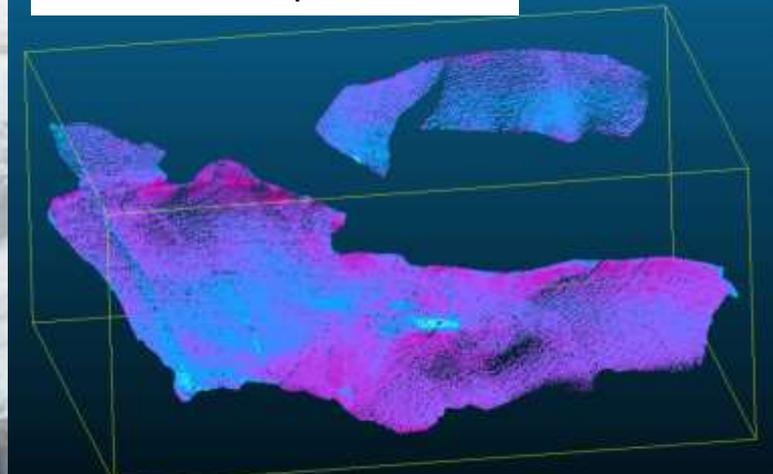
Mayo 2014- Sept 2014



Abril 2015- Sept 2014



Abril 2015- Sept 2015



Comparación mínimos anuales

Comparación	Dif. Media (m)	Min (m)
2011-12	-1,8	-5,1
2012-13	0,35	-2,8
2013- 14	-0,07	-4,8
2014- 15	-1,7	-6,3
2011-15	-3,4	-8,4

Año 2011-12
Invierno particularmente seco
y verano muy cálido

Año 2012-13
Invierno particularmente
húmedo y verano fresco,
especialmente las máximas

Año 2013-14
Invierno muy húmedo y verano
fresco, especialmente las
máximas

Año 2014-15
Invierno húmedo y verano con
cálido muy prolongado

Comparación máximo-mínimo anuales

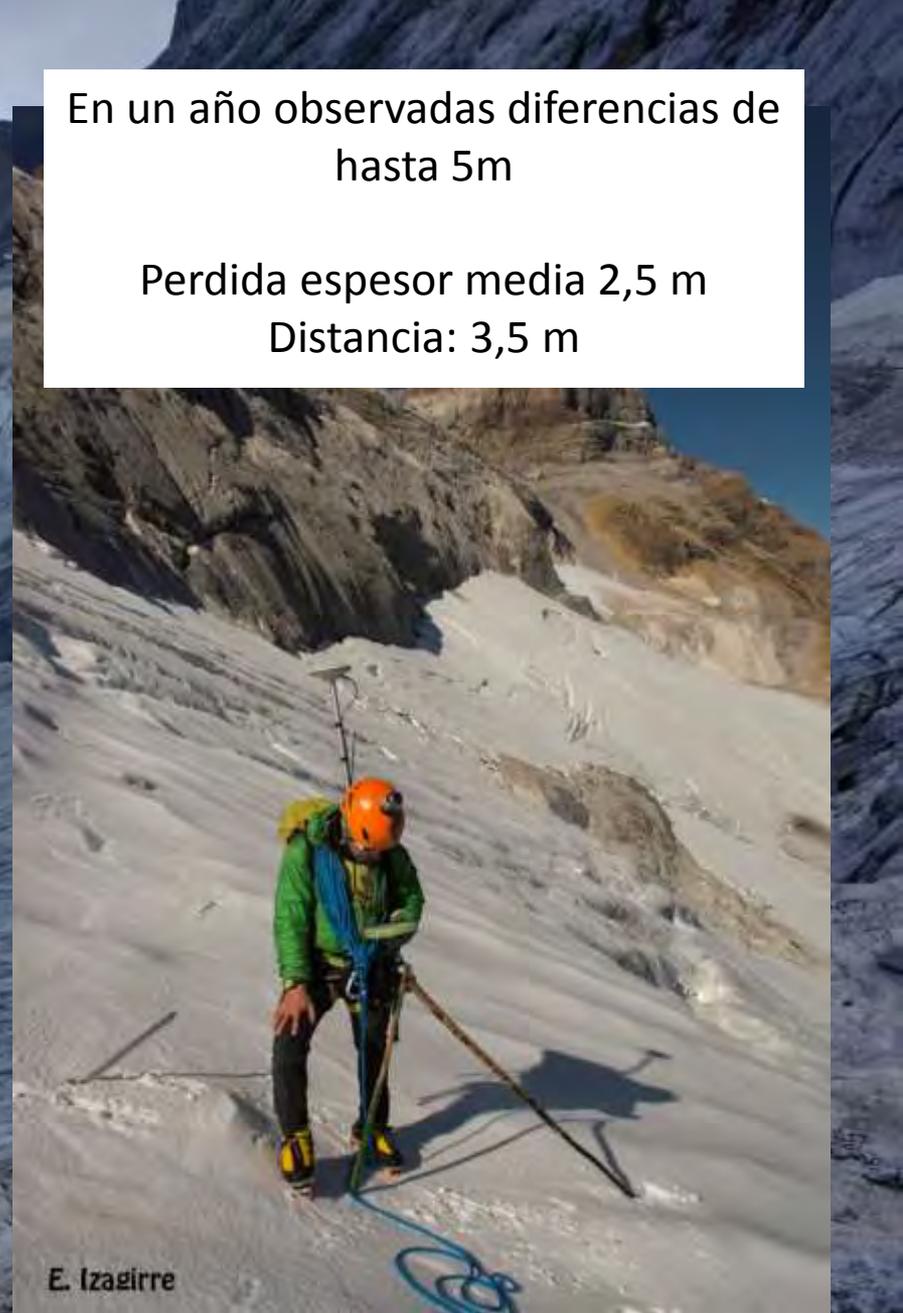
Comparación	Dif. Media	Max (m)
May14-Sept13	3,6	7,8
May14-Sept14	3,4	7,2
Abril15-Sept14	3	7,2
Abril15-Sept15	5,1	10,3

Instalación de 9 estacas de ablación

- Posiciones GPS diferencial
- Validación datos escáner
- Movimiento hielo

En un año observadas diferencias de hasta 5m

Perdida espesor media 2,5 m
Distancia: 3,5 m



E. Izagirre

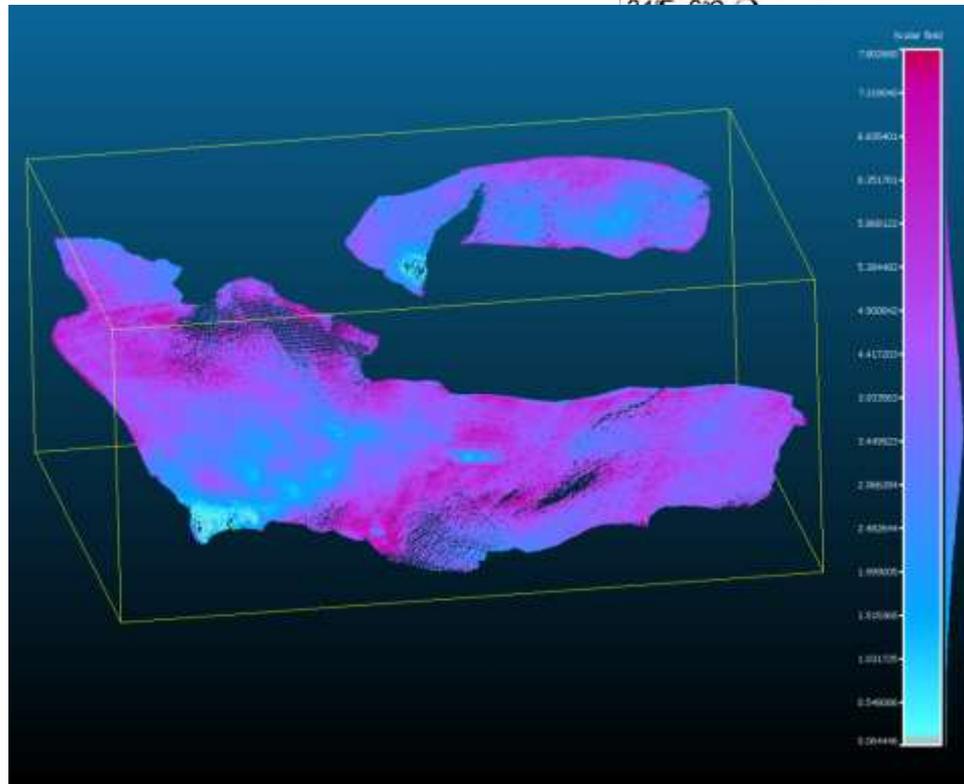
6. Monitorizar variabilidad espacial manto de nieve

- Glaciar
- Zonas periglaciares



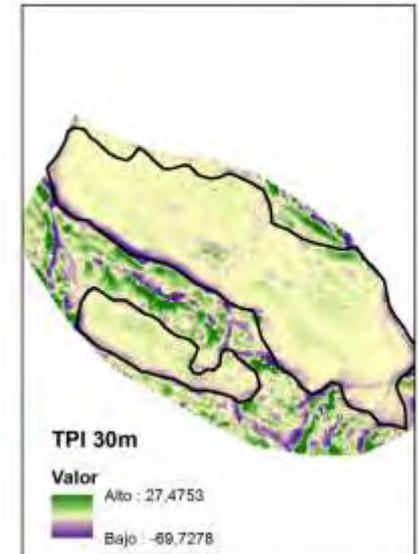
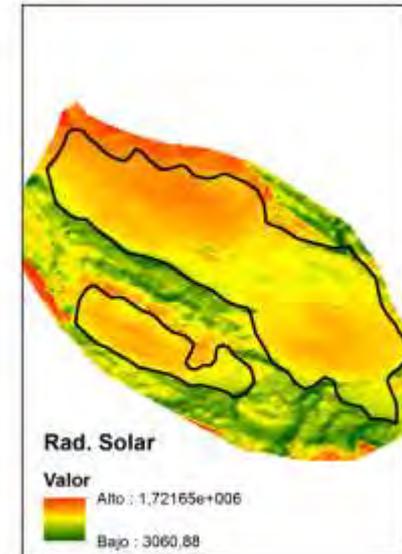
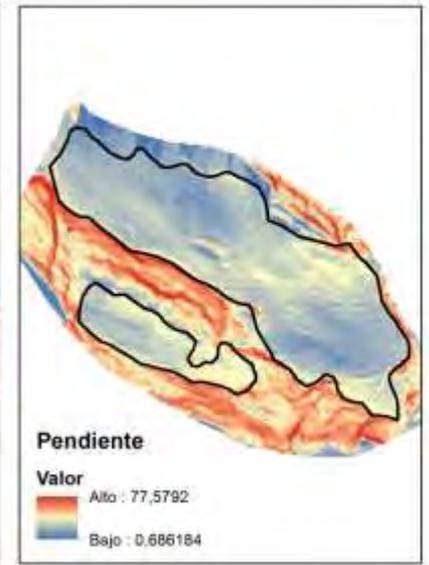
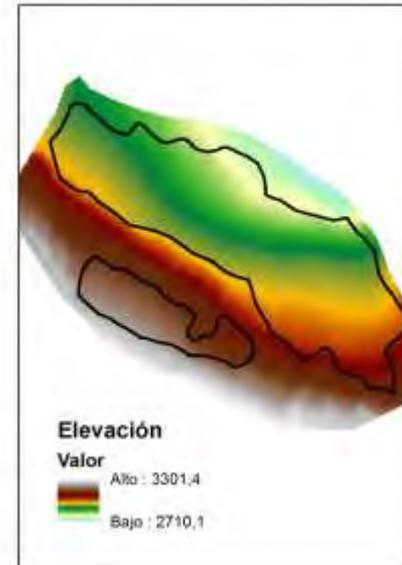
045-000

05-16-2014 06:30:37



6. Monitorizar variabilidad espacial manto de nieve

- a) Análisis estadísticos con variables topográficas
- b) Modelización de base física (datos torre meteorológica)

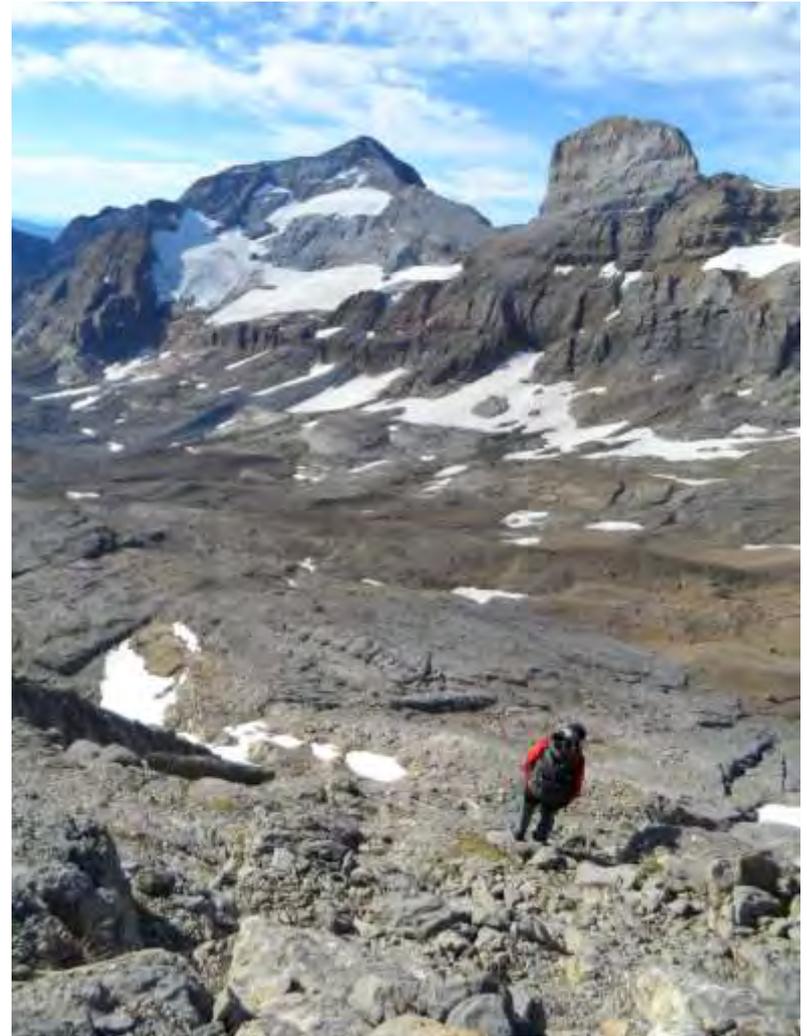


7. Modelizar patrones espaciales de procesos periglaciares

- a) Cartografía del permafrost:
Datos BTS, ibuttons

- b) Clasificación según comportamiento térmico en 5 fases anuales:
 - 1. Condiciones estivales
 - 2. Heladas otoñales
 - 3. Heladas invernales intensas
 - 4. Equilibrio térmico invernal
 - 5. Fusión nival

- c) Desarrollo modelo estadístico suelos helados (en función de variables topográficas)



Objetivo final:

Análisis de la respuesta del Glaciar Norte de Monte Perdido a las condiciones climáticas y topográficas:

- Modelo CRHM (nieve y hielo) calibración/validación base de datos creada en el proyecto.



CONCLUSION

El glaciar de Monte Perdido ha sufrido una clara degradación en las últimas tres décadas. Las tendencias climáticas no explican plenamente dicha degradación.

Gracias a los datos obtenidos hasta la fecha tras 5 años de monitorización exhaustiva se empieza a comprender su dinámica con gran nivel de detalle.

Las evolución del espesor de hielo ha mostrado una fuerte variabilidad espacial. ¿Depende fundamentalmente de tasas diferentes de fusión o a la variabilidad en la acumulación de nieve?

Gran importancia de continuar este tipo de mediciones en el tiempo.



Estructura

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ZONA DE ESTUDIO

Cuenca Experimental de Izas

Pinar del Balneario de Panticosa

METODOLOGÍA

1. Adquisición distribución espesor de nieve con TLS

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión

4. Utilización de datos TLS para la mejora de simulaciones del manto de nieve

5. Influencia del bosque en la evolución espacial del manto de nieve

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

Conclusiones

1. Aplicación Láser Escáner Terrestre (TLS) monitorización nieve en el Pirineo.

- Demostrada aplicación en distancias hasta 1000m y en entornos forestales.
- Desviación mediciones inferior variabilidad manto de nieve ($<0,1\text{m}$).
- Mapas a elevada resolución espacial:
 - Izas (55ha): 1m^2
 - Panticosa (0,1 ha): $0,06\text{m}^2$
- Creada base de datos en ambiente subalpino y forestal durante tres temporadas.



Conclusiones

2. Influencia de la topografía en la distribución espacial del espesor de nieve.

- Gran importancia curvatura: TPI 25m
- Importancia exposición dirección vientos dominantes: Sx 200m
- Gran persistencia intra e inter-anual
- Otras variables menor relevancia (Ej: Elevación periodo fusión)



Conclusiones

3. Generación de cartografías diarias de espesor de nieve durante el periodo de fusión.
 - Demostrada la versatilidad en la combinación de fotografías time-lapse y aproximación DDF para reconstrucción.
 - Al combinar con mediciones TLS, desviaciones en volumen <20%
 - Modelo simple y fácil de aplicar a zonas de estudio similares.



Conclusiones

4. Utilización de datos TLS para la mejora de simulaciones del manto de nieve.
 - Mejora resultados modelo en simulaciones distribuidas espesor de nieve.
 - Incluido efecto topografía distribución manto de nieve.
 - Corregidas desviaciones asociadas modelos meteorológicos.



Conclusiones

5. Influencia del bosque en la evolución espacial del manto de nieve.
 - Reducción media espesor de nieve bajo árboles 49%.
 - Efecto árboles durante el periodo de fusión: aumentan diferencias zonas cubiertas dosel- zonas abiertas.
 - Mayores espesores acumulados reducen la influencia de los árboles.



Conclusiones

6. Monitorización de la evolución reciente del glaciar de Monte Perdido.
 - Gracias a los datos obtenidos hasta la fecha tras 5 años de monitorización exhaustiva se empieza a comprender su dinámica con gran nivel de detalle.
 - La evolución del espesor de hielo ha mostrado una fuerte variabilidad espacial. ¿Depende fundamentalmente de tasas diferentes de fusión o a la variabilidad en la acumulación de nieve?
 - Gran importancia de continuar este tipo de mediciones en el tiempo.



Publicaciones

1. **J. Revuelto**, J.I. López-Moreno, C. Azorín-Molina, J. Zabalza, G. Arguedas, S.M. Vicente-Serrano (2014). Mapping the annual evolution of snow depth in a small catchment in the Pyrenees from long range terrestrial laser scanner technique. *Journal of Maps* 10 (3), 379-393.
2. **J. Revuelto**, J.I. López-Moreno, C. Azorín-Molina, S. M. Vicente-Serrano (2014). Topographic control of snowpack distribution in a small catchment in the central Spanish Pyrenees: intra- and inter-annual persistence. *The Cryosphere*, 6, 1989-2006.
3. **J. Revuelto**, T. Jonas, J.I. López Moreno (2015). Backward snow depth reconstruction at high spatial resolution based on time-lapse photography. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.10823
4. **J. Revuelto**, V. Vionnet, J. I. López-Moreno, M. Lafaysse, S. Morin (2015). Combining snowpack modeling and terrestrial laser scanner observations improves the simulation of small scale snow dynamics. *Journal of Hydrology*, 533, 291-307.
5. **J. Revuelto**, J.I. López-Moreno, C. Azorín-Molina, S.M. Vicente-Serrano (2015). Canopy influence on snow depth distribution in a pine stand determined from terrestrial laser data. *Water Resource Research* DOI: 10.1002/2014WR016496
6. J. I. López-Moreno, **J. Revuelto**, I. Rico, J. Chueca-Cia, A. Julian, A. Serreta, E. Serrano, S.M. Vicente Serrano, C. Azorin-Molina, E. Alonso-González, J. M. García Ruiz (2016). Thining of the Monte Perdido Glacier in the Spanish Pyrnees since 1981. *The Cryosphere*, 10, 681-697

Conclusiones

Esta tesis ha profundizado en el conocimiento de la evolución espacio-temporal del manto de nieve en el Pirineo con las técnicas más novedosas.

Así mismo se han mejorado protocolos y herramientas existentes , abriendo nuevas líneas de aplicación y transferencia a otros sectores científico técnicos.



Campañas experimentales

Importante resaltar el trabajo necesario para la toma de datos en zonas de montaña.

El grupo de hidrología ambiental del IPE ha realizado en el transcurso de esta tesis más de 110 campañas de campo (duración 1-3 días):

- Mantenimiento zonas experimentales
- Instalación instrumentación (Izas y Panticosa)
- Muestreos TLS

Agradecimientos

Muchas gracias por su atención

Gracias a todas personas que de una manera desinteresada habéis permitido que este trabajo llegue a buen puerto.



Aplicación de láser escáner terrestre para el análisis de la distribución espacial del manto de nieve en ambientes subalpino y forestal del Pirineo

Jesús Revuelto Benedí

jesus.revuelto@ujf-grenoble.fr

revuelto84@gmail.com

