



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## **INGENIERÍA TÉCNICA EN TOPOGRAFÍA PROYECTO FINAL DE CARRERA**

### **TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN EN EL ESTUDIO DE LOS CAMBIOS MEDIOAMBIENTALES QUE SE PRODUCEN EN LA CRIOSFERA**

**Proyectista/as:** Carolina Gasca y Elena Jiménez

**Director/es:** Juan José Martínez Benjamín

**Convocatoria:** Julio 2012



## **RESUMEN**

Este proyecto realiza el estudio de la evolución de algunos de los glaciares más representativos del mundo a partir del análisis de imágenes Landsat comprendidas en un periodo de tiempo de aproximadamente dos décadas, descargando así la imagen mas antigua y la mas actual para cada glaciar con el fin de poder calcular el retroceso y perdida de superficie de estos.

Los glaciares han sido escogidos en zonas de los Alpes Suizos, los Alpes Franceses, el Parque Nacional de los glaciares en Argentina, el golfo de Alaska y Groenlandia ya que estas zonas se caracterizan por su gran número de glaciares y estudios realizados.

La aplicación de diferentes técnicas de Teledetección permite obtener resultados óptimos sobre el deshielo de los glaciares ya que tienen notables incidencias en estudios medioambientales de grandes extensiones. Permiten analizar y procesar las imágenes sin necesidad del trabajo de campo que no siempre es posible por la dificultad de acceso a la mayor parte de los glaciares.



**INDICE**

CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Glosario.....	5
1.2. Introducción y objetivos.....	7
1.3. La criosfera y el cambio climático.....	8
CAPITULO 2 - PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN.....	10
2.1. Satélites usados.....	10
2.2. Sensores.....	11
CAPITULO 3 – CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS USADOS.....	12
3.1. El espectro electromagnético.....	12
3.2. Bandas.....	13
3.3. Resoluciones.....	14
3.4. Interacción radiación-superficie.....	14
CAPITULO 4 – DATOS.....	16
4.1. Adquisición de imágenes.....	16
4.2. Programas utilizados.....	17
4.3. Correcciones.....	18
4.4. Métodos para el tratamiento de las imágenes.....	18
CAPÍTULO 5 – ANÁLISIS.....	21
5.1. Glaciar Aletsch.....	21
5.1.1. Datos del glaciar.....	21
5.1.2. Datos usados.....	25
5.1.3. Tratamiento de la imagen.....	26
5.1.4. Resultados obtenidos.....	30
5.2. Glaciar Mer de Glace.....	31
5.2.1. Datos del glaciar.....	31
5.2.2. Datos usados.....	34
5.2.3. Tratamiento de la imagen.....	35
5.2.4. Resultados obtenidos.....	38
5.3. Glaciar Upsala.....	39
5.3.1. Datos del glaciar.....	39
5.3.2. Datos usados.....	41
5.3.3. Tratamiento de la imagen.....	42
5.3.4. Resultados obtenidos.....	45
5.4. Glaciar Alaska.....	46
5.4.1. Datos del glaciar: Columbia.....	47
5.4.2. Datos usados.....	50
5.4.3. Tratamiento de la imagen.....	51
5.4.4. Resultados obtenidos.....	53

5.4.5. Datos del glaciar: Bering.....	54
5.4.6. Datos usados.....	57
5.4.7. Tratamiento de la imagen.....	58
5.4.8. Resultados obtenidos.....	61
5.5. Glaciar Helheim.....	61
5.5.1. Datos del glaciar.....	61
5.5.2. Datos usados.....	63
5.5.3. Tratamiento de la imagen.....	64
5.5.4. Resultados obtenidos.....	66
5.6. Resultados.....	67
CAPITULO 6 – Conclusiones.....	68
Recomendaciones.....	69
Bibliografía.....	70
Agradecimientos.....	71
Contenido del CD.....	72

## CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN

### 1.1. Glosario

Albedo: porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie.

Banda espectral: se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.

Barrido multiespectral, Equipos de: se trata de equipos sensores que permiten explorar secuencialmente la superficie de la Tierra, dividiendo la radiación captada en diversas bandas espectrales.

Clúster: grupos de píxeles de similares condiciones espectrales que forman grupos o conglomerados. El agrupamiento automático no supervisado pretende encontrar estos grupos espectrales idóneos como reflejo de los naturalmente existentes en la imagen.

Espectro electromagnético: se trata de la agrupación de radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar.

Firme: *firn*, en inglés, se denomina así a la nieve acumulada que ha sobrevivido a la temporada estival.

Infrarrojo: porción del espectro comprendida entre 0,7 y 100 micras, que tiene gran importancia para estudios de teledetección. Normalmente suele dividirse en infrarrojo cercano, medio y lejano. Este último también se conoce como infrarrojo térmico.

Landsat: serie de satélites construida por la NASA dedicados específicamente a la detección de recursos naturales.

Longitud de onda: es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas.

Metadatos: los metadatos son datos sobre los mismos datos. Describen totalmente los datos de manera que los usuarios puedan entender las presunciones y limitaciones y puedan evaluar la aplicabilidad de los datos para el uso específico de su interés.

Micrómetro: unidad de longitud empleada para medir longitudes de onda alta frecuencia. Equivale a la millonésima parte de un metro.

Morrena: es el material de arrastre amontonado en los lados de la lengua del glaciar, puede aparecer también en la parte central y final de la lengua.

ND: Nivel Digital de cada pixel, valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico-electrónico.

Permafrost: capa de hielo de los niveles superficiales del suelo permanentemente congelado como la tundra.

Píxel: derivado del inglés *picture element*. Es el elemento pictórico de las imágenes que es susceptible de ser procesado.

Radiación: el proceso en el que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.

Ráster: es una estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de píxeles o puntos de color, denominada matriz, que se puede visualizar en un monitor, papel u otro dispositivo de representación.

Resolución: es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. Refiere el tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (espacial), al número de bandas disponibles (espectral), a los niveles de codificación (radiométrica) o a la frecuencia de cobertura (temporal).

Ruido de la escena: concepto que refiere a la variabilidad espectral hallada en el interior de las distintas clases temáticas.

Sensor: cualquier instrumento que detecta energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta en forma susceptible de ser aprovechada para su estudio.

SAR: radar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*), es un sistema activo de microondas que emite un haz energético sobre la superficie terrestre para luego recoger su reflexión sobre ella.

SIG: Sistema de Información Geográfica, (SIG o GIS, en su acrónimo inglés *Geographic Information System*) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

Vectorial, estructura: forma de almacenamiento de datos en un SIG, en el cual las distintas unidades temáticas se definen por las coordenadas de sus bordes. Una descripción topológica asociada a esa información gráfica permite reconstruir, posteriormente, las variables temáticas asociadas a esos polígonos.

Témpano: trozo de hielo plano y delgado que flota sobre el agua

Zona ablación: área de un glaciar donde la pérdida de hielo y nieve por vaporización o deshielo es mayor que su acumulación.

Zona acumulación: área de un glaciar que se encuentra en su zona más elevada donde precipita en forma sólida, produciéndose una acumulación neta de masa.



## 1.2. Introducción y objetivos

El medio ambiente es un tema de gran importancia que ha permitido tomar conciencia del calentamiento global que se produce en la Tierra y que afecta a la vegetación, océanos, animales, personas y en concreto a la criosfera, en la cual se centra este proyecto.

Gracias a la Teledetección y al gran abanico de satélites espaciales, se puede realizar con gran eficacia el estudio de los cambios medioambientales que tiene lugar en la Tierra. Los sensores de los satélites captan una gran cantidad de imágenes que permiten el análisis de muchas zonas gracias a su calidad espectral y su cobertura global. Los satélites permiten la accesibilidad a cualquier región de la Tierra permitiendo extensas series temporales de observación que no serían prácticamente posibles in-situ y extremadamente caras y complicadas usando plataformas aerotransportadas.

Este proyecto realiza el estudio de la criosfera con imágenes Landsat ya que permiten una fácil adquisición gratuita al alcance del usuario y una resolución media que es óptima para proyectos de grandes extensiones de terreno. La serie histórica de imágenes Landsat TM y ETM permiten la realización de muchos estudios científicos.

La criosfera juega un importante papel en la regulación del clima. El aumento general de la temperatura ambiente provoca un aceleramiento en la disminución de la masa glaciar y como consecuencia un aumento del nivel del mar.

Se han escogido algunos de los glaciares más representativos para poder realizar un estudio sobre los cambios sufridos en un periodo aproximado de dos décadas con el fin de comprobar y verificar si estos están en retroceso. Estos glaciares se encuentran en los Alpes Suizos, los Alpes Franceses, el parque Nacional de los glaciares en Argentina, el golfo de Alaska y Groenlandia.

El objetivo para este proyecto es poder analizar la evolución de algunos glaciares más representativos y mostrar su posible retroceso.

Para ello es necesaria la descarga de imágenes Landsat óptimas de los diferentes años de estudio, siempre en el mismo mes, descartando así las que puedan tener nubosidad sobre la zona de estudio, ya que pudieran crear ambigüedades con la nieve. También para las imágenes que no sean de periodos estivales, ya que las nevadas durante el invierno en la zona de estudio podrían dar confusión con el hielo glaciar.

A partir de estas realizar los procesos analíticos adecuados para obtener, comparar y extraer resultados de los cuales se pueda cuantificar el área desaparecida del glaciar y la longitud retrocedida del frente.

Una vez obtenidos los resultados poder evaluar que métodos de análisis da mejores resultados para el objetivo de nuestro proyecto.

### 1.3. La criosfera y el cambio climático

La criosfera se define como las partes de la superficie de la Tierra donde el agua se encuentra en estado sólido, que incluye el hielo del mar, el hielo de lagos, el hielo de ríos, la superficie de nieve, los glaciares, los casquetes polares y las capas de hielo y terreno congelado (incluye el permafrost, Fig.1, que es una capa de hielo en los niveles superficiales del suelo permanentemente congelado como la tundra). Aproximadamente, tres cuartas partes del agua dulce del mundo están contenidas en la criosfera. En el 2010 se lanzó el satélite Cryosat con tal de detectar y estudiar cómo está cambiando.

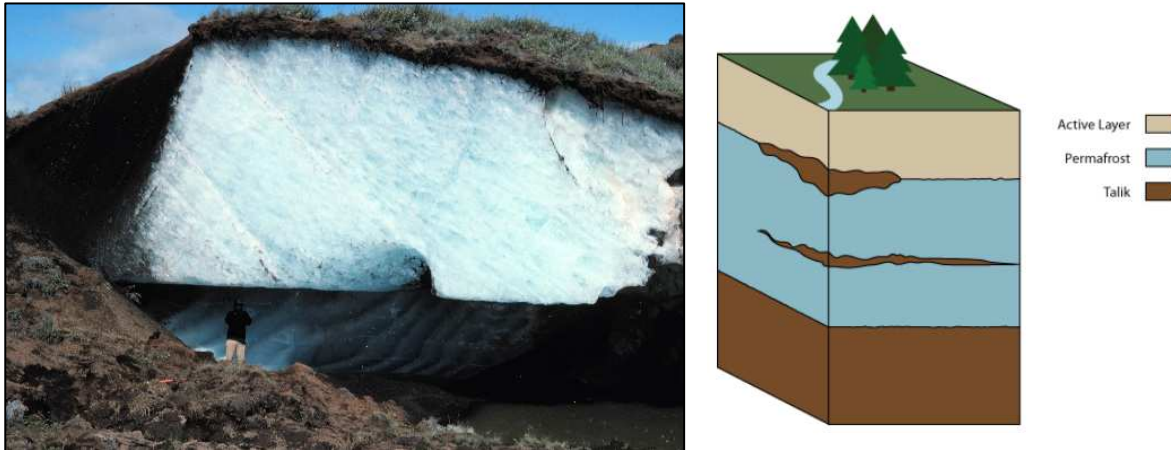


Fig.1: Imagen y sección del permafrost. Fuente: [www.madrimasd.org](http://www.madrimasd.org)

### El glaciar

Un glaciar es una gruesa masa de hielo que se origina en la superficie terrestre por acumulación, compactación y re cristalización de la nieve, mostrando evidencias de flujo en el pasado o en la actualidad. Su existencia es posible cuando la precipitación anual de nieve supera la evaporada en verano, por lo cual la mayoría se encuentra en zonas cercanas a los polos, aunque existen en otras zonas montañosas. El proceso del crecimiento y establecimiento del glaciar se llama glaciación.

Consta de tres partes: cabecera o circo, lengua y valle o zona de ablación, Fig.2.



Fig.2: Partes en las que se divide un glaciar.

Fuente: [www.biogeo2.110mb.com/geomorfologia](http://www.biogeo2.110mb.com/geomorfologia)

Actualmente un 10% de la Tierra está cubierto de glaciares, los cuales almacenan unos 33 millones de km<sup>3</sup> de agua dulce, durante las glaciaciones se extendían en todas latitudes y zonas de baja altitud llegando a cubrir hasta un 30% de la superficie terrestre lo que correspondería a unos 44,4 millones de km<sup>2</sup> a diferencia de los 14,9 millones de km<sup>2</sup> de la actualidad.

El hielo glaciar se forma partiendo de nieve que se compacta tras nevadas hasta que el aire es expulsado casi por completo, obteniéndose así el hielo azul característico de los glaciares. Sin embargo no siempre es posible apreciar este color azul porque, a menudo, el hielo se encuentra bajo una capa de nieve o de neviza. Este hielo necesita hasta cientos de años para poder formarse así que en la zona dónde se encuentre debe tener una temperatura media anual inferior a 0° C para que no se fundan.

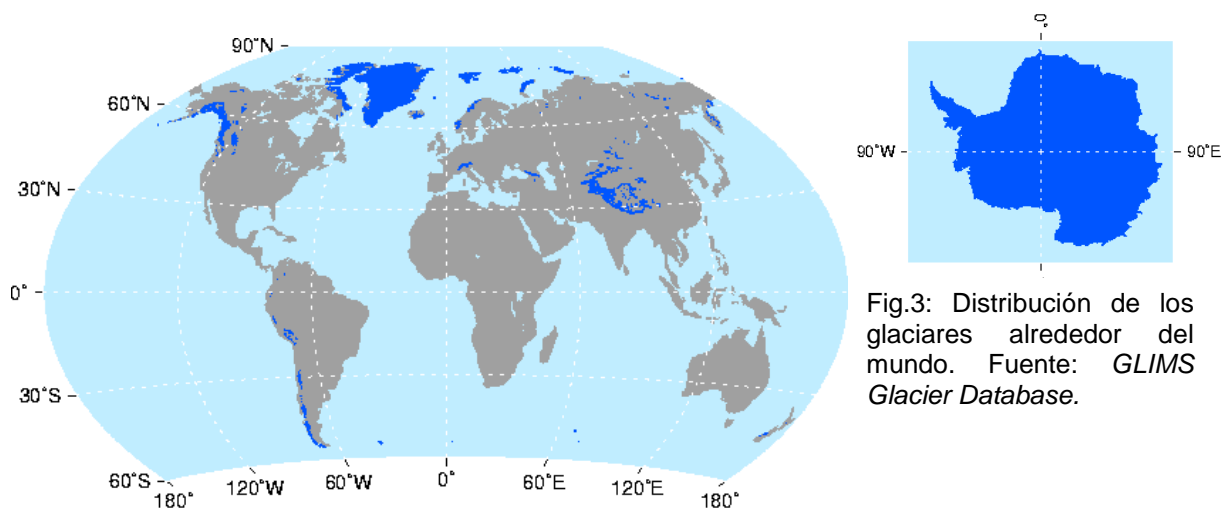


Fig.3: Distribución de los glaciares alrededor del mundo. Fuente: GLIMS Glacier Database.

### El papel que desempeña la criosfera en el cambio climático

La criosfera juega un papel muy importante en la regulación del clima global. La nieve y el hielo tienen un alto nivel de albedo, esto significa que tienen un alto porcentaje de reflectancia de la radiación solar, Tabla 1, por ello algunas partes de la Antártida reflejan hasta un 90% de la radiación solar incidente, que es mucho si se compara con el promedio global que es de un 31%. Sin la criosfera el albedo global sería más bajo y por consiguiente las temperaturas globales serían más altas ya que la mayoría de la radiación sería absorbida por la Tierra. Como menos energía se refleje más aumenta la temperatura y más nieve se derrite, a este fenómeno se le llama retroalimentación.

Albedos	% luz reflejada
Nieve reciente	86
Nubes brillantes	78
Nubes (promedio)	50
Desiertos terrestres	21
Suelo terrestre sin vegetación	18
Bosques (promedio)	8
Ceniza volcánica	7
Océanos	5-10

Tabla 1: Tabla de albedos. Fuente: wikipedia

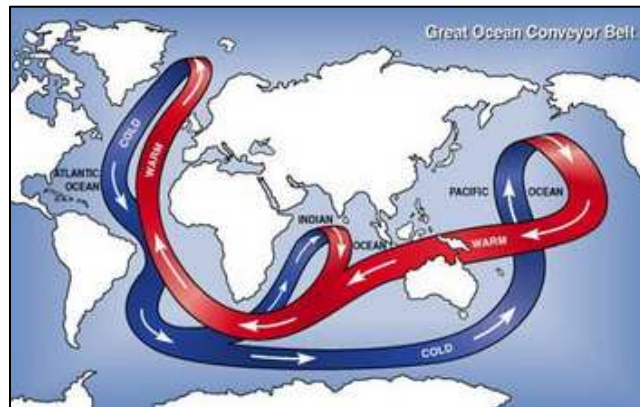
Por eso mismo los cambios en la cubierta de nieve van estrechamente unidos a un aumento de la temperatura y como consecuencia habrá una mayor evaporación de agua (actúa como un gas de efecto invernadero)potenciando el calentamiento global conocido

como efecto invernadero , junto con los gases emitidos por la actividad humana, y con ello una disminución del porcentaje de albedo, es un círculo.

### Intervención de los satélites en la criosfera

Fundamentalmente, hay dos tipos de hielo polar, el que flota en los océanos y el que cubre la tierra. El hielo marino, que es más fino, es el que regula la temperatura regional y la circulación de las corrientes oceánicas, y como consecuencia, al clima de la Tierra. CryoSat-2 medirá con gran precisión el espesor del hielo marino de los océanos polares y las variaciones de grosor de las extensas capas de hielo de Groenlandia y la Antártica con tal de analizar sus variaciones.

Puede parecer desorbitado que un aumento de unos pocos grados de la temperatura global pueda desencadenar algo semejante, de hecho, antes del 2000 parecía indicar que estas capas de hielo eran estables en su interior. El principal medio para determinar cómo evolucionan dichas capas es por medio de instrumentos capaces de medir los cambios, pero aun no habían sido creados. A partir del 2006 se pudo estudiar el adelgazamiento de la capa de



hielo gracias a las mediciones hechas con SAR (*Synthetic Aperture Radar*), en la que constata un aumento del flujo del mar y una tasa de adelgazamiento muy elevada, de unos 16 metros por año.

Fig.4: La circulación global oceánica entre aguas frías y profundas y aguas cálidas y superficiales. Fuente: Laboratorio Nacional de Argonne, NASA.

## CAPITULO 2 - PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN

Se entiende por plataforma de teledetección, los satélites o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia. Se distinguen en función de su distancia al suelo.

Un captador o sensor es el sistema tecnológico preparado para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda.

### 2.1. Satélites usados

Existen dos tipos de satélites, los activos que serían aquellos que poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación (radar), pero desestimados para este proyecto debido a su alto coste y escasez en cuanto a disponibilidad de líneas temporales, y los satélites pasivos que son aquellos que detectan la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales. Landsat son una serie de satélites pasivos construidos y puestos en órbita por EEUU para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. Éstos están equipados con instrumentos específicos para la teledetección multispectral.

Pocos sensores, aparte de Landsat TM/ETM+, resultan apropiados para cartografiar glaciares y hacer su seguimiento. Landsat, por sus largas series de datos temporales, se ha convertido en la principal fuente de datos para el cartografiado de glaciares y el estudio de sus cambios, concretamente los principales datos de los estudios glaciológicos provienen de Landsat 5 con sensor TM, el cual proporciona series de tiempo continua y calibrada. Sin embargo las escenas deben de ser excelentes para ser usadas, es decir, adquiridas en un día sin nubes, al final del periodo de ablación (periodo en que el glaciar pierde hielo y nieve por medio de evaporación, fusión o desprendimientos) y en un año sin nieve en las afueras del glaciar.

Para la descarga de datos se han usado los siguientes satélites:

## Landsat 5

Lanzado en 1984, este satélite aun sigue operando. Está provisto de un sensor TM de barrido multiespectral concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS. Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal.

## Landsat 7

El último de la serie es Landsat 7 (se prevee lanzar Landsat 8 a finales del 2012) puesto en órbita en 1998 y aun en activo el satélite está controlado por la NASA aunque las imágenes son procesadas por la U.S. Geological Survey (USGS). Fue diseñado para que su vida útil fuese de 5 años, y tiene la capacidad de recolectar y transmitir hasta 532 imágenes por día.

	Landsat 5	Landsat 7
<b>Ancho barrido</b>	180 km	185 km
<b>Altitud</b>	705 km	705 km
<b>Inclinación</b>	98.2°	98.2°
<b>Orbita</b>	Polar, Solar-sincrónica	Polar, Solar-sincrónica
<b>Paso por el Ecuador</b>	09h30 AM	10h00 AM
<b>Periodo de revolución</b>	99m	99m

Tabla 2: Características de Landsat 5 y 7.

## 2.2. Sensores

Estos sensores se hallan instalados en las plataformas satelitales y en función del objetivo que tenga dicho satélite dependerá que lleven uno o más sensores a bordo, por ejemplo el satélite Landsat-7 lleva un sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper+) y TM (Thematic Mapper):

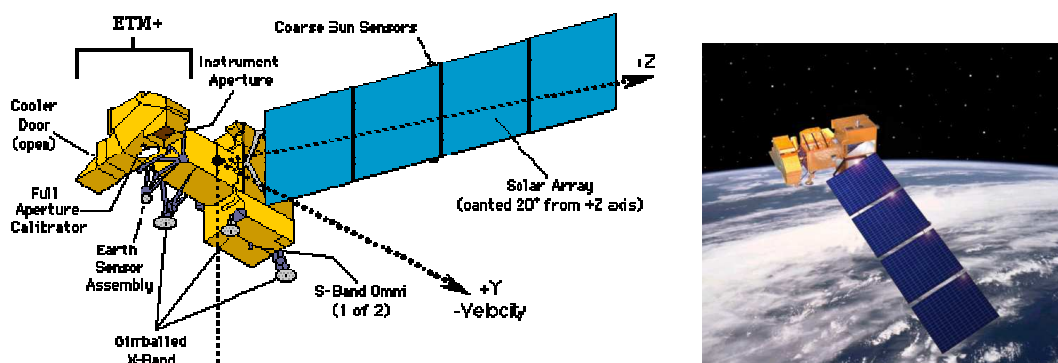


Fig.5: izquierda, satélite Landsat 7. Fuente: Nasa. Fig.6: derecha, se muestran las partes del satélite entre las que se puede observar sensor ETM+. Fuente: www.lageografia.com.

Los sensores principales instalados a bordo de los Landsat son **TM** y **ETM+**:

**TM:** *Landsat Thematic Mapper* (TM) es un radiómetro multispectral colocado en los satélites **Landsat 4 y 5**. Los sensores TM adquieren imágenes continuamente desde Julio de 1982 hasta hoy.

**ETM+:** *El Landsat Enhanced Thematic Mapper* (ETM) está a bordo del satélite **Landsat 7**. El sensor ETM cubre los rangos del visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, e infrarrojo térmico. El proyecto Landsat es una iniciativa por parte de *U.S. Geological Survey* (USGS) y la NASA.

## CAPITULO 3 – CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS USADOS

El objetivo fundamental de la Percepción Remota es el de analizar las características de la radiación que abandona la superficie terrestre, y que es captada posteriormente por un sensor situado en un satélite. Todos los elementos geográficos (bosques, cultivos, ríos, lagos, edificios, etc.) transforman de forma diferente la radiación electromagnética que reciben del Sol, es por eso que cada tipo de objeto presenta a un nivel de respuesta espectral diferente.

Los captadores a bordo del satélite Landsat 5 recogen datos en 7 bandas del espectro electromagnético, en caso de Landsat 7 en 8 bandas. Los distintos elementos de la superficie terrestre pueden destacarse usando combinaciones apropiadas con 3 de estas bandas.

### 3.1. El espectro electromagnético

La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz (300000 Km/s) transportando cantidades discretas de energía (cuantos).

Estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes, el conjunto de todas éstas se denomina espectro electromagnético. Los sensores multispectrales comprenden la luz Ultravioleta, la del Visible y la Radiación Infrarroja; las Microondas se usan por los sensores Radar.

En teledetección aeroespacial, se mide la cantidad de radiación electromagnética reenviada por una porción de superficie terrestre.

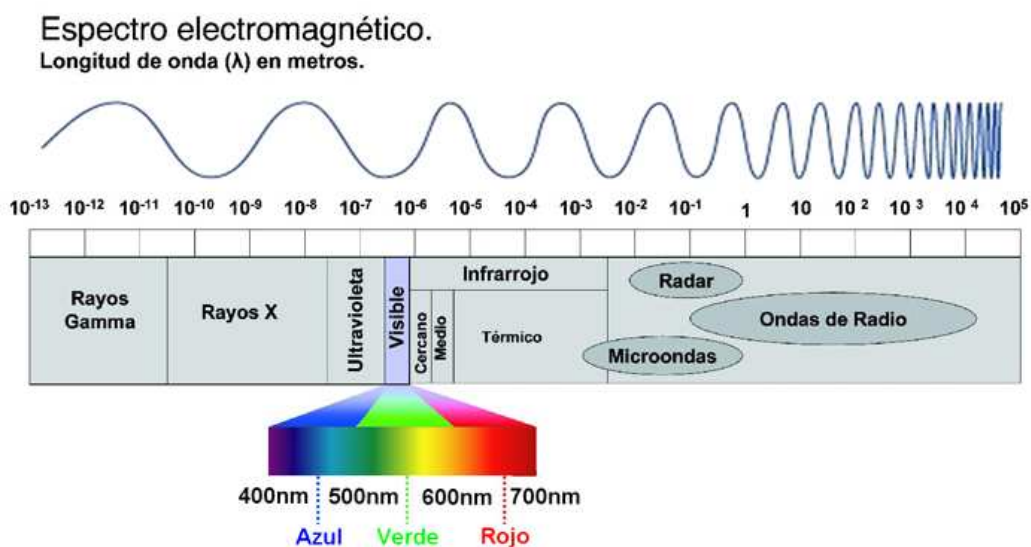


Fig.7: Muestra la división del espectro electromagnético por longitud de onda, se puede apreciar como la región del visible ocupa una pequeña porción respecto a todo el espectro. Fuente: [www.3.bp.blogspot.com](http://www.3.bp.blogspot.com)

### 3.2. Bandas

La variación continua de la reflectancia de un cuerpo en función de la longitud de onda se denomina firma espectral. Gracias a que los cuerpos tienen una firma espectral diferente, es posible tener una referencia en la imagen del tipo y clase de un objeto.

Los datos captados por los satélites de percepción remota se registran en diferentes bandas del espectro. Cada banda de un sensor multispectral es una imagen monocroma (en blanco y negro) que podemos ver en escala de grises.

Cada píxel (elemento de la imagen), el cual es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital, puede tener un valor que oscila entre el negro (valor 0) y el blanco (valor de  $2n-1$ , donde  $n$  depende de la resolución radiométrica de cada sensor).

A partir de la información multispectral que generan los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Sólo basta aplicar cada uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) a una banda distinta de la imagen, seleccionada bajo un cierto criterio y en el orden que se considere más óptimo.

Las bandas más utilizadas para la percepción remota son las siguientes (la banda 8 sólo está disponible para Landsat 7):

SISTEMA TM Y ETM				
BANDAS	LONGITUD DE ONDA $\mu\text{m}$	APLICACIONES	Resol. TM m	Resol. ETM m
1	0,45-0,52(azul)	Mapeo de aguas costeras Diferenciación entre suelo y tipo de vegetación	30	30
2	0,52-0,60(verde)	Mapeo de vegetación Calidad del agua	30	30
3	0,63-0,90(rojo)	Absorción de la clorofila Diferenciación de especies vegetales Áreas urbanas, uso del suelo Agricultura y calidad del agua	30	30
4	0,76-0,90 (infrarrojo cercano)	Delineamiento de cuerpos de agua Mapeo geomorfológico y geológico Áreas de incendios y húmedas Agricultura y vegetación	30	30
5	1,55-1,75 (infrarrojo medio)	Uso del suelo Medidas de humedad de la vegetación Diferenciación entre nubes y nieve Agricultura Vegetación	30	30
6	10,40-12,50 (infrarrojo termal)	Mapeo de stress térmico en plantas Corrientes marinas Propiedades termales del suelo Otros mapeos térmicos	120	60
7	2,08-2,35 (infrarrojo medio)	Identificación de minerales Mapeo hidrotermal	30	30
8	0,52-0,90 (Pancromático)	Canal pancromático de resolución 15m Catastro rural, infraestructuras Ubicación de centros poblados, hidrología, vías	-	15

Tabla 3: Tabla de las bandas de una imagen Landsat.

### **3.3. Resoluciones**

El número de píxeles que integran un sensor de satélite define su poder de resolución, es decir, la capacidad de discernir objetos o detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas.

#### Resolución Radiométrica

Se trata de la sensibilidad del sensor, es decir, es la capacidad del sensor para distinguir diferentes intensidades de radiación. Es por lo tanto, la capacidad en detectar muchos niveles de gris. El número máximo de valores de niveles digitales de la imagen para la mayor parte de los sensores es de 256 niveles de codificación por píxel (de 0 a 256). Normalmente comprende de 8 a 14 bits, correspondiente a los 256 niveles de una escala de grises.

#### Resolución Espacial

La resolución espacial es el tamaño de la unidad mínima de información incluida en una imagen que se denomina píxel, éste disminuye con el incremento de la resolución del sensor de manera que Landsat 5 con 120 m de resolución espacial en el Infrarrojo Térmico, tiene menos resolución espacial que los 60 m de resolución espacial en el Infrarrojo Térmico de Landsat 7.

#### Resolución Temporal

La resolución temporal mide el tiempo que pasa desde la obtención de la imagen de un punto de la tierra hasta la siguiente imagen. Para los satélites Landsat 4-5 y Landsat-7 la resolución temporal es de 16 días. Esta resolución temporal y fijándonos en que la cobertura temporal de la serie Landsat empezó en 1972, supone que existe un total de 23 imágenes por año para cada punto de la corteza terrestre, lo que supone un total de 667 imágenes para el periodo 1972-2001.

La resolución, aunque es alta, en la realidad es menos útil de lo que en principio se podría pensar. La existencia de nubes ocasiona que las imágenes no sean visibles en algunos casos.

#### Resolución espectral

Define los canales espectrales y su ancho de banda respectivo que es capaz de captar el sensor. Recientemente los sensores hiperespectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho (unos pocos  $\mu\text{m}$ ) para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral.

### **3.4. Interacción radiación-superficie**

La energía reflejada y la radiación que los cuerpos emiten (donde en particular, el calor se asocia a la radiación en las bandas en el infrarrojo térmico) es la energía que los sensores de los satélites reciben, después de interactuar nuevamente con la atmósfera. La proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía para los distintos componentes del terreno, dependiendo del tipo de material y de su condición, así que estas propiedades particulares del terreno son las que se aprovechan en percepción remota estableciendo mecanismos de identificación de los distintos elementos geográficos en su ambiente.



-características espectrales de la nieve:

La nieve reciente refleja más del 95% de la radiación entrante en el Visible y aproximadamente el 50,8% en el Infrarrojo Cercano. En el espectro Visible la reflectancia de la nieve disminuye conforme ésta se contamina y aún más cuando el tamaño de los granos de nieve aumenta.

En el Infrarrojo Cercano la contaminación por partículas de polvo hace que la reflectancia también disminuya y según el tamaño de los copos de nieve aumente.

En el Infrarrojo Medio la reflectancia de la nieve es mucho más baja con una marcada dependencia del tamaño de los granos de nieve.

-Características espectrales del hielo:

El hielo glaciar puro tiene una mayor reflectancia que la nieve en el espectro Visible. En el Infrarrojo Cercano y el Infrarrojo Medio la reflectancia va en función del tamaño de los granos de nieve y de la misma forma para el hielo. Por lo que la presencia de agua líquida sobre la superficie del hielo podría reducir la reflectancia en el Infrarrojo Cercano.

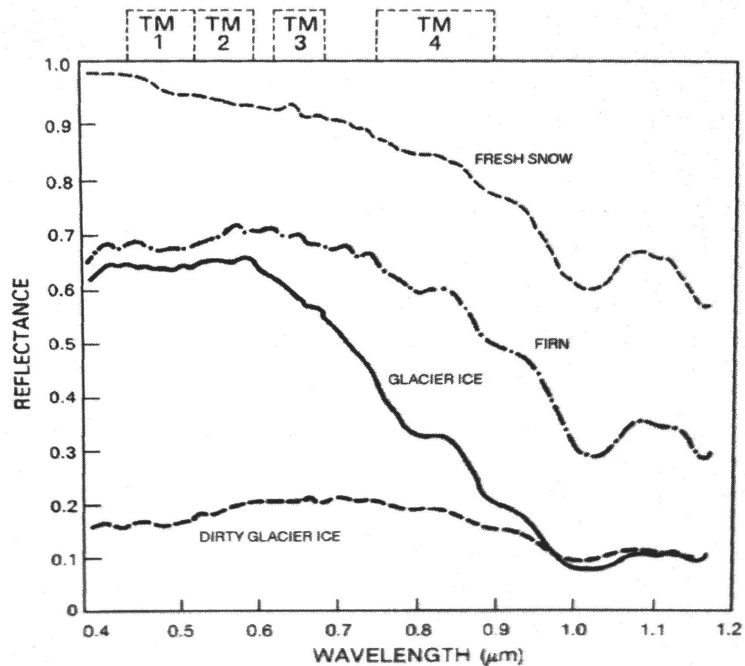


Fig. 8: Grafica de las respuestas espectrales sobre diferentes coberturas. Libro: *Pellikka, P., Rees, G. (2010), Remote sensing of glaciers : Techniques for Topographic, Spatial, and Thematic Mapping of Glaciers,*

La reflectividad en la nieve es completamente diferente a la del agua, es muy alta en todas las longitudes de onda, especialmente en el caso de la nieve reciente, pudiendo incluso saturar los sensores.

Es posible confundir en una imagen la cobertura de nieve con cobertura nubosa (al fin y al cabo formadas por partículas de hielo) con la salvedad de que la reflectividad de la nieve cae hasta cero para longitudes de onda mayores de 1.4μm mientras que la de las nubes sigue siendo alta haciendo posible su discriminación en esta región del espectro electromagnético.

## CAPITULO 4 – DATOS

### 4.1. Adquisición de imágenes

Las imágenes descargadas se han obtenido desde dos proveedores de imágenes Landsat distintos. A continuación se presenta una breve introducción de dichas páginas:

#### -GLCF (Global Land Cover Facility)

Se trata de una web de la Universidad de Maryland que ofrece la descarga gratuita de imágenes Landsat.

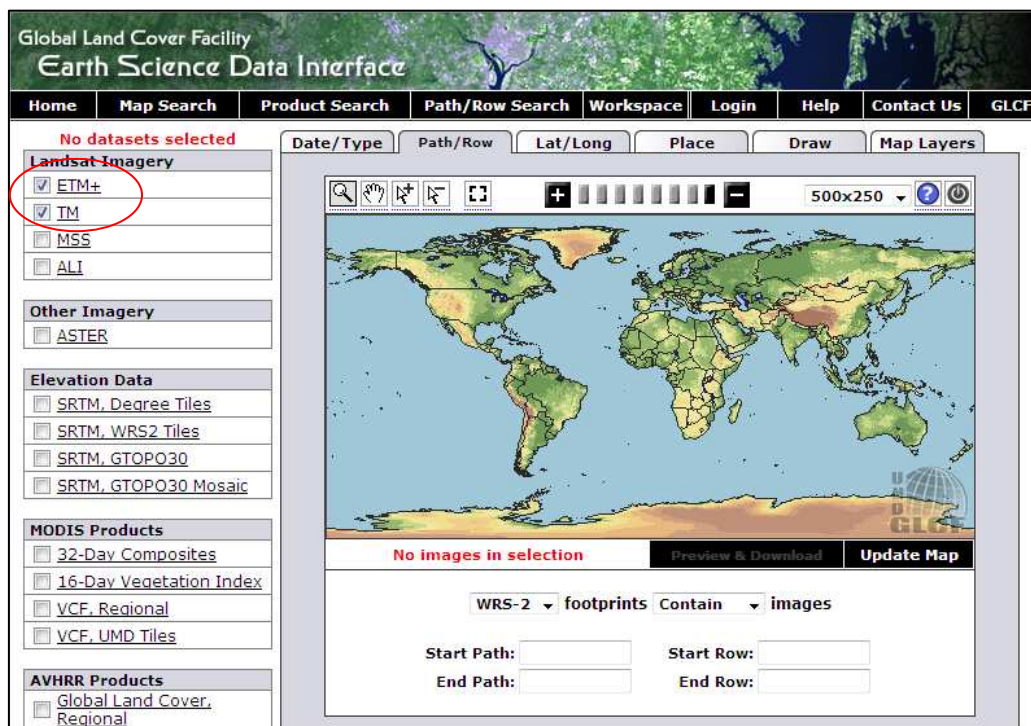


Fig. 9: Página de descarga de GLCF.

#### -USGS (U.S. Geological Survey) Global Visualization Viewer

El USGS es una organización científica que provee información sobre el estado de los ecosistemas y el medio ambiente y los impactos del cambio. El Visor de USGS es una herramienta para la búsqueda y descarga de imágenes satelitales. Todas las imágenes que se descargan están ortorectificadas y en formato GeoTIFF.

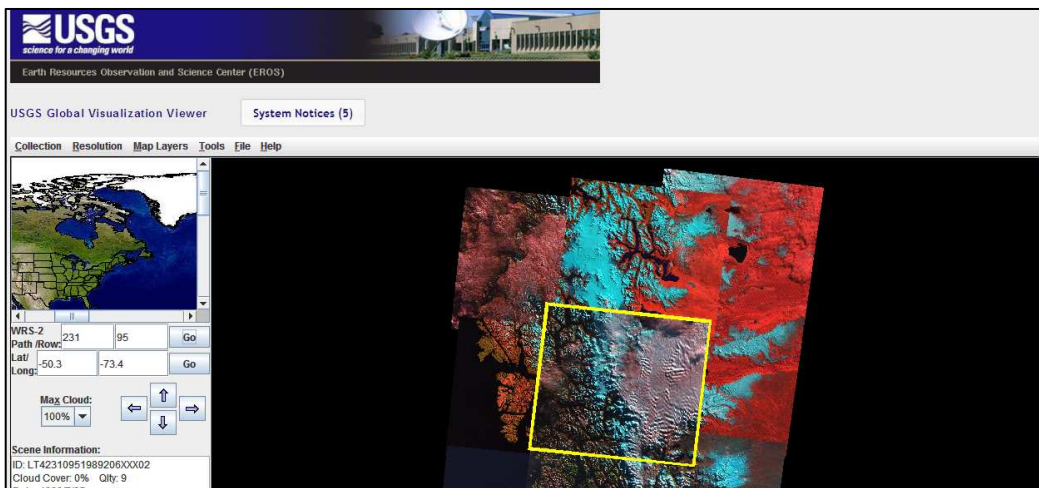


Fig. 10: Página de descarga de USGS.

## -USGS EarthExplorer (EE)

Esta es una herramienta para la consulta, búsqueda y descarga de imágenes satelitales, fotografías aéreas, y de los productos cartográficos de diversas fuentes. Además de los datos de las misiones Landsat y una variedad de otros proveedores de datos.

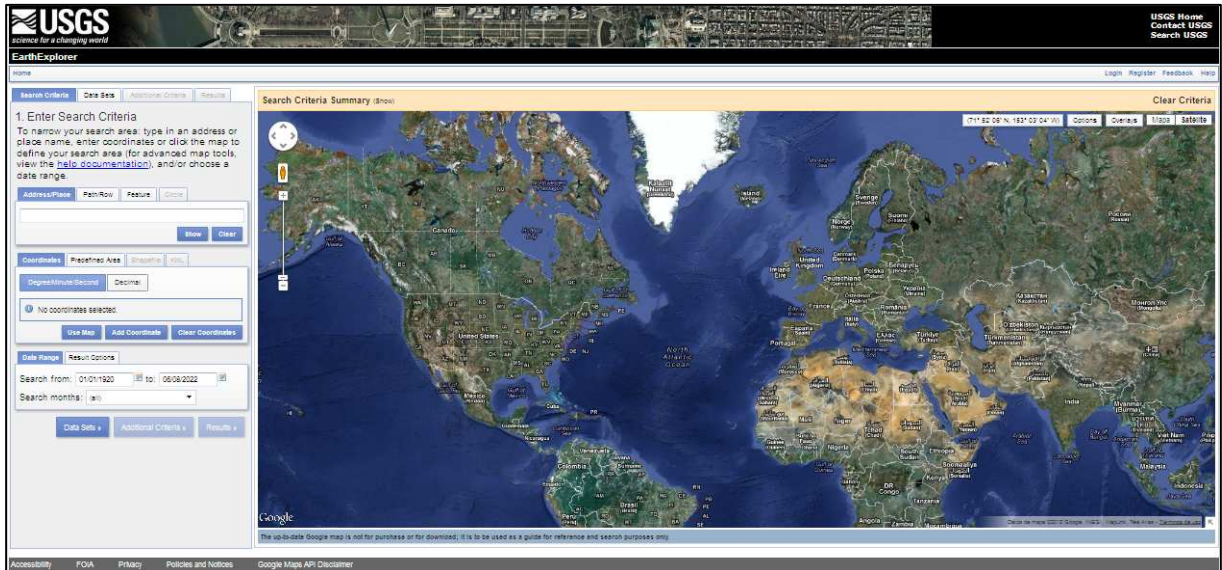
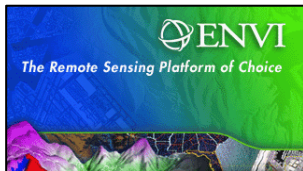


Fig. 11: Página de descarga de EarthExplorer.

## 4.2. Programas utilizados

### -ITT Visual Información Solutions (ENVI) versión 4.3



Envi es un *software* para el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales y diseñado para ser utilizado por todos los profesionales SIG, analistas y científicos de la imagen. Envi combina el procesamiento de imágenes espectral y tecnología de análisis de imagen con una moderna interfaz fácil de usar que permite extraer fácilmente información significativa a partir de imágenes.

### -Miramon versión 7



MiraMon es un *software* de Teledetección y SIG. Permite la visualización, consulta, edición y análisis tanto de capas ráster (imágenes de teledetección, ortofotos, modelos digitales del terreno, mapas temáticos convencionales con estructura ráster, etc) como de capas vectoriales (mapas temáticos o topográficos que contengan puntos, líneas o polígonos, etc), como de capas WMS.

MiraMon es desarrollado de forma cooperativa por parte de diferentes miembros del Grupo de Investigación Consolidado GRUMETS pertenecientes al Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF) y a la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), y pretende suministrar un *software* de bajo coste, potente y riguroso.

### 4.3. Correcciones

Los datos obtenidos desde que el sensor toma la imagen y llega al sistema de recepción, hasta que se distribuye al usuario, pasa antes por unas correcciones. Estas son:

Corrección radiométrica: se incluyen los derivados al mal funcionamiento del sensor y las interferencias ejercidas en la radiación por los efectos atmosféricos. Se aplica para corregir el valor de la energía detectada de cada pixel.

Corrección geométrica: estas constituyen cualquier tipo de cambio en la posición que en un principio ocupaban los píxeles de la imagen. Se aplica para solucionar las deformaciones en las imágenes.

Para conocer el nivel de procesamiento que ha sido aplicado a una imagen descargada se puede consultar en los metadatos de la misma. Éstos se incluyen cuando una escena es procesada con un nivel *Level 1 Product Generation System* (LPGS). Todas las imágenes Landsat 7 ETM+ (desde el 1999 hasta el presente) y muchas de Landsat 4-5 TM (desde el 1982 hasta el presente) han sido procesadas con LPGS.

A continuación se describen los niveles de procesamiento aplicado a las imágenes Landsat:

L1G: *Systematic Corrected Processing*, significa que la imagen viene corregida radiométrica y geoméricamente según la proyección. Algunas de las imágenes Landsat 1-5 MSS y algunas de Landsat 4-5 TM están procesadas bajo la corrección *Systematic Correction* (Level L1G). Éstas se rotan, alinean y georreferencian a la proyección cartográfica UTM.

L1T: *Terrain Corrected Processing*, proporciona sistemáticamente a la imagen correcciones radiométricas y geométricas precisas con la incorporación de puntos de control a la vez que emplea un Modelo Digital de Elevaciones para la precisión topográfica. Los puntos de control usados provienen de GLS2005 (Global Land Survey 2005) creado por la NASA y *U.S. Geological Survey* (USGS), se trata de un conjunto de datos con 9500 imágenes satélite ortorectificadas entre 2004 y 2007, principalmente utilizado en Landsat 5 y 7.

Otro aspecto a destacar, es el hecho que una de las imágenes analizadas, concretamente con el glaciar Helheim, presenta en su momento de descarga un error conocido como *SLC-off* (*Scan Line Correction*) encargado de compensar el movimiento de Landsat 7 y que el 31 de mayo del 2003 dejó de funcionar provocando que el patrón de recorrido se trazara en zig-zag. No por ello deben ser desestimadas, ya que Landsat 7 ETM+ continua adquiriendo datos de la imagen en *SLC-off*. Estos tienen la misma calidad radiométrica y geométrica que con *SLC-on*. Estos efectos son más pronunciados en los bordes de la imagen que en el centro,

### 4.4. Métodos para el tratamiento de las imágenes

#### Transformación: NDSI

La nieve tiene una respuesta espectral muy diferente a la cubierta de agua, Fig.12, esto se debe a que la nieve es un conjunto de partículas de hielo, aire, y que a veces también suele incluir partículas de polvo, polen o impurezas químicas, lo que pueden provocar que varíe la respuesta espectral de según qué zonas del glaciar. Éstos, al ser una masa de agua congelada y compactada llega hasta tal punto que pierde sus moléculas de aire, de ahí ese característico color azul en los glaciares, es normal que la zona de cubierta glaciar sea más oscura que la de nieve, pero no tanto como la de agua.

El índice *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) es una de las metodologías ampliamente usadas en la detección de la cubierta nival, propuesto por Jeff Dozier, en la que se selecciona como superficie de nieve todo aquel pixel con valor superior a 0,4.

Para el cálculo se usaran la banda 2 del espectro visible y la banda 5 del infrarrojo medio, puesto que la nieve tiene una alta respuesta espectral en el rango del visible y es muy reflexiva y al contrario en el infrarrojo medio que es más absorbente, característica que aumenta con el incremento de la longitud de onda, estas características permiten distinguir así la nieve sobre otras cubiertas.

$$NDSI = \frac{(banda\ 2 - banda\ 5)}{(banda\ 2 + banda\ 5)}$$

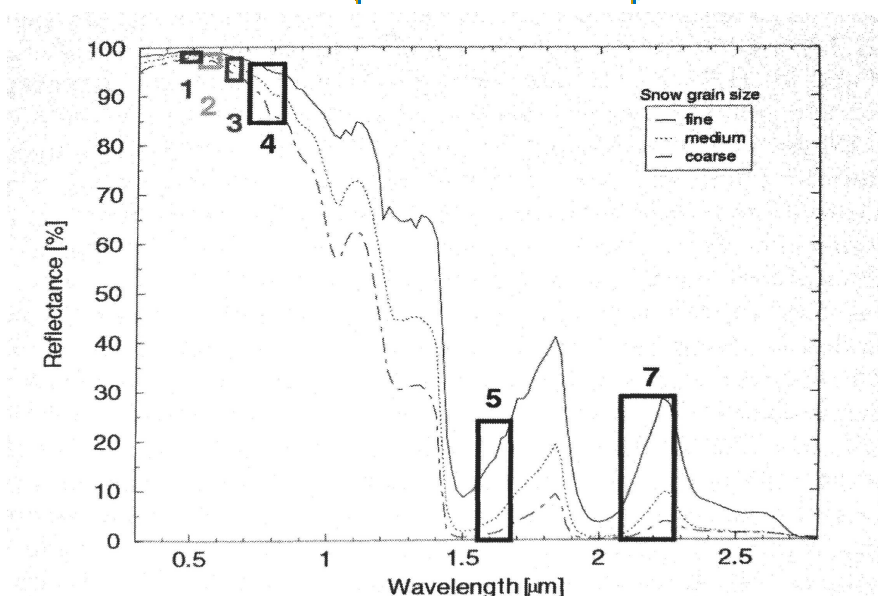


Fig. 12: Gráfica de las bandas sobre la longitud de onda. Libro: Pellikka, P., Rees, G. (2010), *Remote sensing of glaciers : Techniques for Topographic, Spatial, and Thematic Mapping of Glaciers*,

### Clasificación no supervisada: Isodata

Este método define las clases espectrales presentes en la imagen sin conocimiento previo del área de estudio con tal de dar nitidez al resultado. Se asume que ND (niveles digitales) de la imagen se agrupan en conjuntos de píxeles de comportamiento espectral homogéneo (*clusters*) con tal que queden bien definidas las clases temáticas de interés. Desde el punto de vista estadístico, el algoritmo usado para el agrupamiento ISODATA (método de Duda y Hart) resulta muy adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, tal y como se ilustra en la siguiente Fig.13 donde se trabaja con la banda Roja e Infrarrojo Cercano, y por ejemplo, los píxeles del clúster A corresponderían a píxeles de ND con valores altos en IRC y bajos en R.

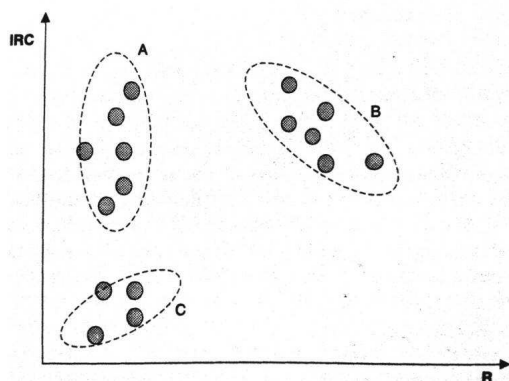


Fig 13. Muestra cómo la clasificación no supervisada identifica y agrupa según la respuesta espectral del pixel. Libro: Chuvieco Salinero, E. (2008), *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio*

### Combinación analítica

Consiste en el cruzamiento de dos capas ráster, de un ráster y otra vectorial o dos capas vectoriales que el programa efectúa.

### Aplicación de filtro de convolución por el criterio de Moda

Los filtros son operadores espaciales que transforman el valor de un pixel teniendo en cuenta los píxeles que le rodean, el filtro de Moda actúa otorgando el valor a un pixel tras calcular el valor más frecuente de los píxeles vecinos. Resulta adecuado para reducir ruido en las zonas altamente heterogéneas en imágenes binarias.

### Transformación Tasseled Cap

Se ha desestimado este método, en un principio usado, ya que principalmente va destinado al análisis y extracción de información en vegetación. Además se comprobó cómo los datos obtenidos que no eran muy relevantes si se comparaban con el resto de métodos usados en el proyecto.

### Fusión de datos con Envi

Este procedimiento consiste en la combinación entre una imagen multispectral, que tiene una baja resolución, con una imagen pancromática, que tiene una alta resolución, de forma que se combinen y se obtenga una imagen resultante con la información espectral y el detalle espacial de la imagen pancromática.

### Expansión lineal del contraste

Es un parámetro del programa usado con el fin de expandir el contraste de la imagen visualizada, es una técnica usada en todas las imágenes ya que la mayor parte de ellas ofrecen un rango de ND inferior a las capacidades que ofrece el equipo en cuanto a resolución con el que se visualiza, además ninguna de ellas aprovecha todo el rango que puede llegar a abarcar. Estos sensores guardan la información utilizando un determinado número de bits, de 8 a 24 bits (RGB).

El programa permite modificar el nivel de saturación en cada extremo del histograma, indicando así el porcentaje de saturación consiguiendo una buena calidad de imagen en su visualización final.

## CAPÍTULO 5 - ANÁLISIS

### 5.1. Glaciar Aletsch

#### 5.1.1. Datos del glaciar

##### Los Alpes suizos: Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn

En la región suiza de Valais se encuentra el glaciar más grande de los Alpes y uno de los glaciares más grandes de Europa.

Este se halla en el espacio de Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 2001. Es un conjunto de montañas, valles y glaciares de los Alpes suizos localizadas en los Alpes centro-meridionales y delimitados al norte por el valle de Grindelwald (en el cantón de Berna) y al sur por el valle del río Ródano (en el cantón de Valais).

El área protegida abarca una superficie de 82.388 hectáreas, que comprende las actuales 54.000 ha Patrimonio de la Humanidad, más extensiones en ambos extremos por un total de 28.500 ha, un 56% se encuentra dentro del cantón de Valais, el 44% en el cantón de Berna.

El Jungfrau es el pico más elevado de esta zona, cuya capitalidad turística es la localidad de Interlaken. Otros famosos picos son el Eiger y el Monch, todos por encima de los 4.000 m. Al sur de Jungfrau está el glaciar Aletsch.

En esta región el 50% de la superficie de la extensa región está cubierto de glaciares, y cerca de la mitad está por encima de los 2.600 m, y unos pocos cientos de metros más arriba se encuentra el límite entre la acumulación de los glaciares y las zonas de ablación (es aquella zona donde el glaciar empieza a perder hielo y nieve).

El área total cubierta por los glaciares es de 35.000 ha constituyendo la mayor superficie continua de hielo en los Alpes.

Superficie: 54.000 ha

Altitud: varía de 900 m sobre la vertiente sur hasta los 4.274 m en la cima del Finsteraarhorn

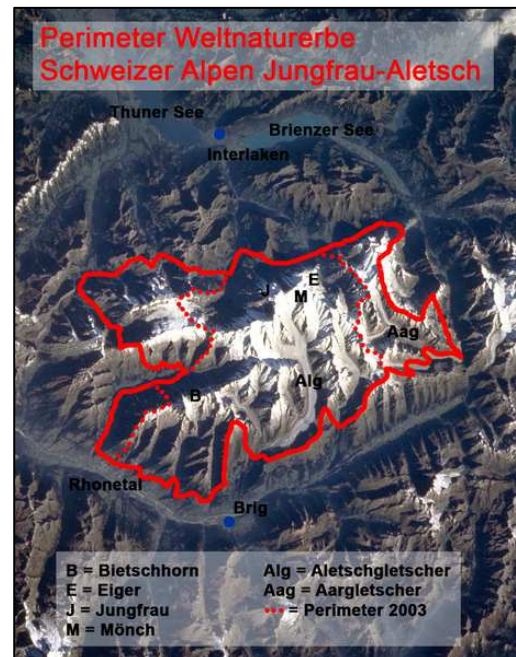


Fig.14: Espacio Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn. Fuente: Wikipedia.

## El Glaciar Aletsch

### Características del glaciar:

Localización: en el cantón suizo de Valais.

Tipo: glaciar de montaña.

Estado: en retroceso.

Latitud: 46°26'52" N.

Longitud: 8°4'53" E.

Altitud: 1600-4160 m.

Longitud: 23,95 km.

Grosor máximo: 900 m en Konkordiaplatz.

Superficie: 86,63 km<sup>2</sup>.



Fig.15: Situación del glaciar en Suiza. Fuente: Google Maps.

Aletsch, 2 veces la longitud de Mer de Glace, es el glaciar más largo y más grande de los Alpes. Nace a 4.000 m de altura en la cara sur del macizo del Jungfrau, de donde se bifurcan tres grandes lenguas de glaciar que se acaban uniendo en Konkordiaplatz, una extensión de unos 6 km<sup>2</sup>, considerándose así el punto de inicio del glaciar Aletsch. Estos tres pequeños glaciares son el Aletshfirn, el Jungfrau firn y el Ewigschneefeld. Desde Konkordiaplatz el glaciar Aletsch tiene una anchura de aproximadamente 1,5 km y se va deslizando a una velocidad de unos 200 m por año.

La parte final del glaciar está cubierta en gran parte por los detritus de las morrenas lateral y central y se sitúa a 1.560 m de altitud, a partir de ahí continúa valle abajo el río Massa hasta desembocar finalmente en el valle del Ródano situado cerca de Brig. La morrena formada en el centro del glaciar se extiende a lo largo de todo éste en dos franjas constituidas de guijarro y rocalla que fueron emergiendo lentamente a la superficie como consecuencia del deshielo y formando así mesetas glaciares.

Se calcula que el peso total de la masa glaciar es de 27.000 millones de toneladas. Si se deshelara, el agua alcanzaría para abastecer con un litro diario a todos los habitantes del planeta durante seis años.

Las variaciones producidas en el frente del glaciar están influenciadas por el clima del lugar y las características propias de cada glaciar.



Fig.16: imagen del glaciar Aletsch tomada desde el Eggishorn. Fuente: Carolina Gasca.





Fig.17: Comparativa del glaciar Aletsch con un punto de referencia, 1856 (izquierda) y 1987 (derecha). Foto: Caspar Amman. [www.windows2universe.org](http://www.windows2universe.org)

Igual que prácticamente todos los glaciares de Suiza, Aletsch también disminuye lentamente como consecuencia del cambio climático y en los últimos años ha registrado un fuerte deshielo que se hace notable en ambos flancos del valle como una franja clara que se extiende a lo largo del glaciar con un aspecto muy distinto al que tiene la vegetación situada en la parte superior, en la Fig.17 puede verse claramente dicha franja.

En la siguiente gráfica, Fig.18:, se muestran las medidas de la variación de longitud entre 1870 y 2010 del glaciar Aletsch comparándose con otros glaciares cercanos. Se puede observar cómo el que estudia este proyecto es de los que más están retrocediendo en poco tiempo:

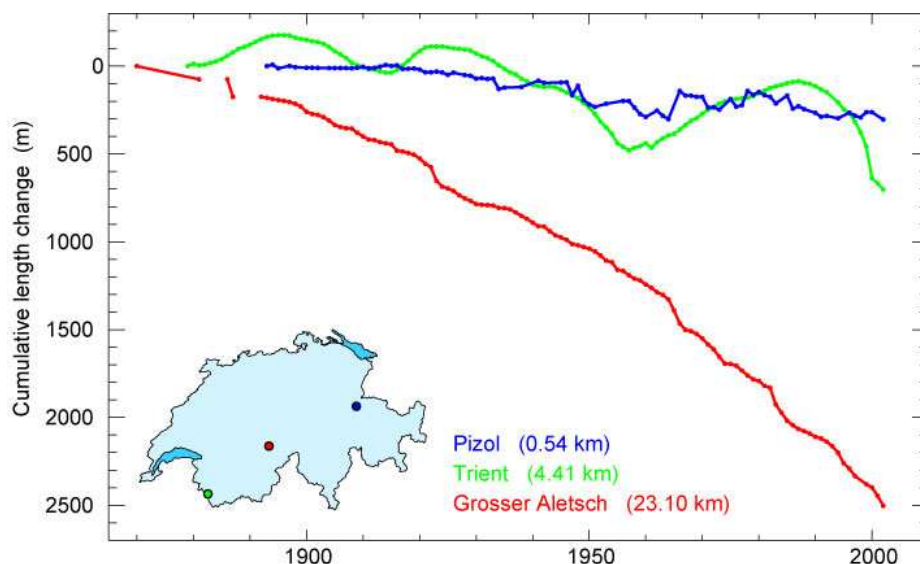


Fig.18: Gráfica comparativa de los cambios de longitud con tres glaciares suizos. Fuente: *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology* del *Swiss Federal Institute of Technology Zurich*

Según los datos encontrados en el *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology* del *Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)*, en el apartado *Swiss Glacier Monitoring Network*, dedicado al seguimiento de los glaciares, se encuentran los siguientes datos del retroceso experimentado por el glaciar Aletsch en el periodo que estudia este proyecto (1986-2010). A continuación se muestra la grafica, Fig.19, y su correspondiente tabla, Tabla 4:

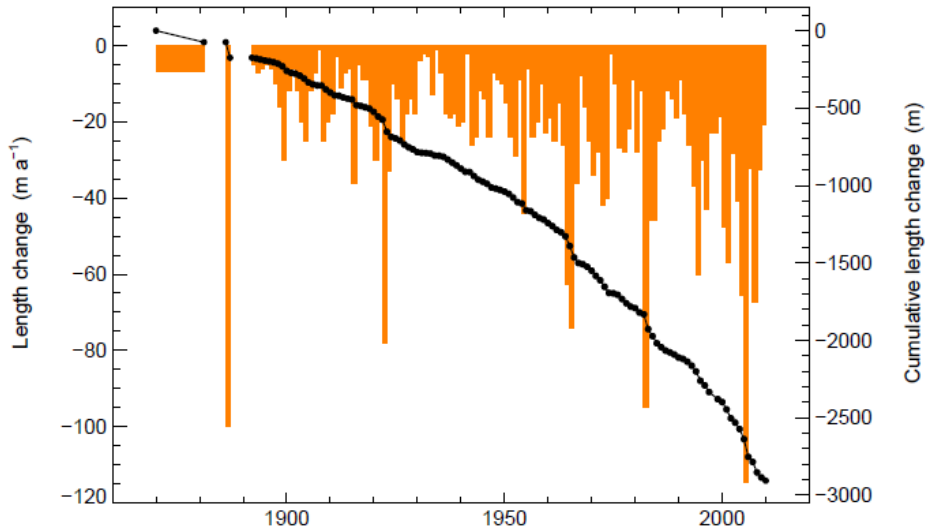


Fig.19: Grafica con las variaciones de la longitud entre 1870 y 2010. Los cambios acumulativos de longitud se representan en negro y el retroceso anual en naranja. Fuente: *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology* del *Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)*.

Periodo	Cambio longitud (m)	Cambio longitud acumulativo (m)
1986 - 1987	-22	-2066
1987 - 1988	-12	-2078
1988 - 1989	-14	-2092
1989 - 1990	-19	-2111
1990 - 1991	-9	-2120
1991 - 1992	-18	-2138
1992 - 1993	-26	-2164
1993 - 1994	-37	-2201
1994 - 1995	-60	-2261
1995 - 1996	-30	-2291
1996 - 1997	-43	-2334
1997 - 1999	-46	-2380
1999 - 2000	-18,5	-2398,5
2000 - 2001	-47,8	-2446,3
2001 - 2002	-57	-2503,3
2002 - 2003	-28,4	-2531,7
2003 - 2004	-41	-2572,7
2004 - 2005	-65,6	-2638,3
2005 - 2006	-114,6	-2752,9
2006 - 2007	-32,4	-2785,3
2007 - 2008	-67,5	-2852,8
2008 - 2009	-32,6	-2885,4
2009 - 2010	-20,9	-2906,3

Tabla 4: Tabla de las variaciones de longitud anuales en el frente del glaciar Aletsch entre 1986 y 2010. Fuente: *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology* del *Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)*.

### 5.1.2. Datos usados

La imagen izquierda es la más antigua y con mayor visibilidad encontrada y ha sido descargada de la página de Glovis USGS, ésta corresponde a una imagen Landsat 4-5 TM del 17 de octubre del 1986, Fig. 20. En cuanto a la imagen más actual también es del mismo sensor y también ha sido descargada del USGS, ésta corresponde a 1 de septiembre del 2010, Fig. 21.

Como ya se ha comentado anteriormente se descargan las bandas 2, 4 y 7, además de la 5 para poder realizar el NDSI.

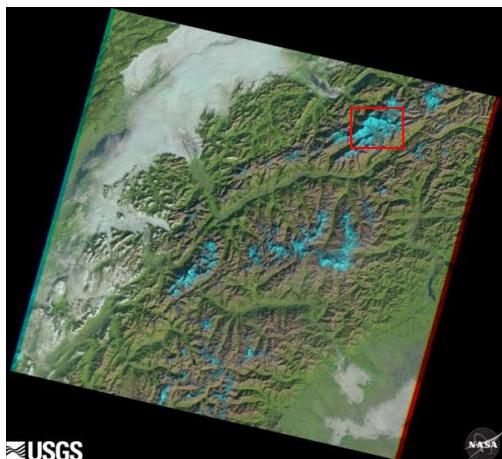


Fig.20: imagen del glaciar Aletsch del 17 octubre del 1986 con referencia LT51950281986290XXX01.

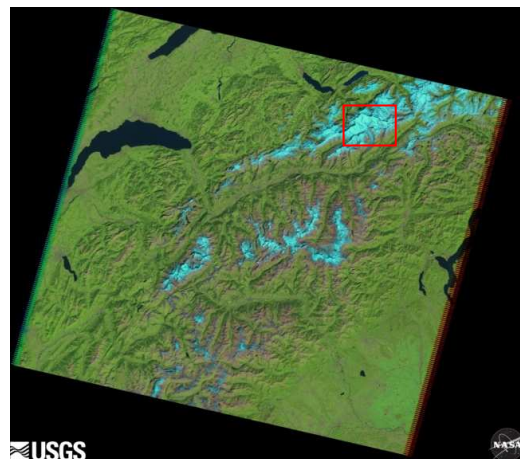


Fig.21: imagen del glaciar Aletsch del 1 de septiembre del 2010 con referencia LT51950282010244MOR00.

### Fusión de datos

Este procedimiento se ha realizado con el programa de Envi en el que se combinan bandas multiespectrales con una pancromática a fin de obtener una imagen de alta resolución manteniendo a la vez la información espectral.

La resolución de la imagen pancromática es de 14,25 m y la multiespectral de 30 m. En la Fig. 22 se puede observar el grado de detalle que tiene la imagen fusionada.

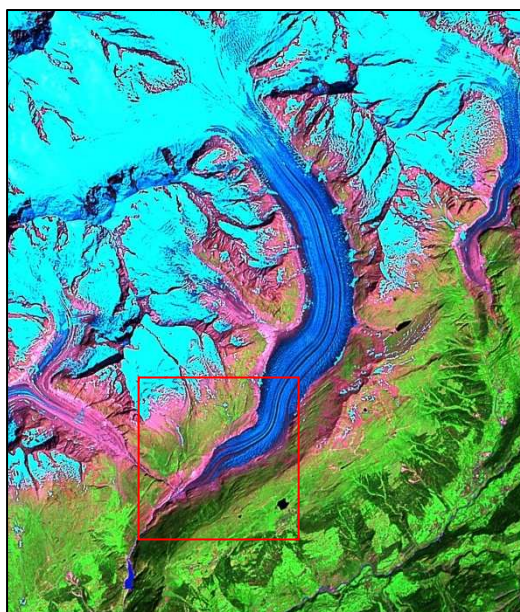


Fig.22: Imagen multiespectral fusionada con la pancromática y su detalle ampliado. Referencia de la imagen:p195r028\_7f19990725\_z32\_ps 742, del 4 de diciembre del 2002.

### 5.1.3. Tratamiento de la imagen

Para poder trabajar con las imágenes en Miramón antes se han de convertir de TIFF o GeoTIFF a IMG. Una vez convertidas a .IMG se abren las tres bandas 247 en RGB 24 bits. A continuación se delimita la zona de estudio recortando la imagen y se le aplica una **expansión del contraste** para realzarla. Se puede observar que el color amarillo de tonalidad más clara corresponde a la nieve reciente y la de tonalidad más oscura a hielo glaciar.

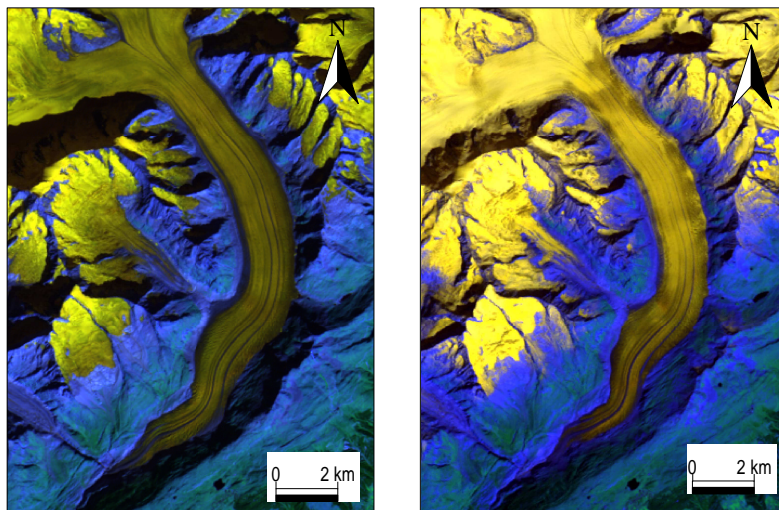


Fig.22: Combinación de bandas 247. Izquierda, Aletsch en 1986; derecha, Aletsch en 2010.

### NDSI (*Normalized Difference Snow Index*)

El *Normalized Difference Snow Index* es el método utilizado para la extracción de información siendo, en un principio, el más indicado para el tratamiento de imágenes con presencia de nieve.

La metodología consta con varias fases de análisis, primeramente se realizó dicho índice con tal de seleccionar únicamente aquellos píxeles que cumplieran con la condición de formar parte del glaciar. Una vez aislados se crea una máscara con ambas imágenes y se aplica una **combinación analítica de capas** con la que poder cuantificar la masa glaciar desaparecida. En este caso se le ha aplicado un **filtro de convolución** para reducir el ruido en cuanto a píxeles en la imagen, suavizándola y dando homogeneidad al resultado.

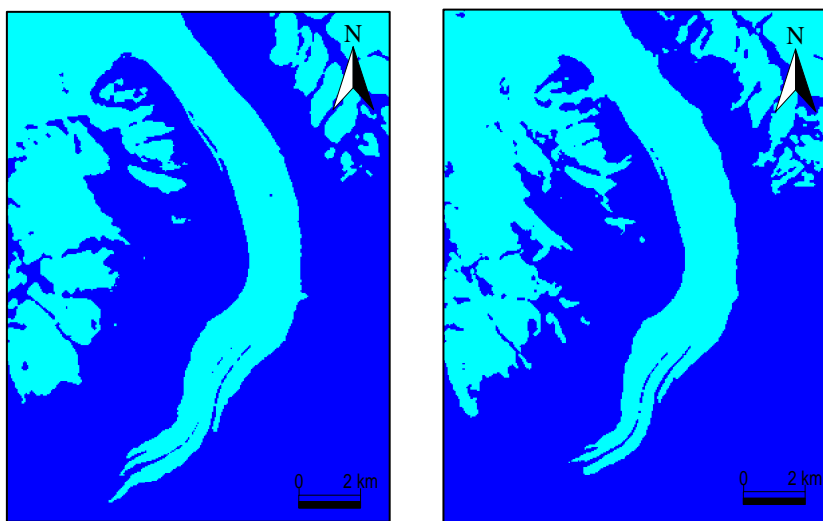


Fig.24: Creación de una máscara para cada año. Izquierda, Aletsch en 1986; derecha Aletsch en 2010.

Con las dos máscaras combinadas se ponen de manifiesto las diferencias entre los dos años, pudiendo consultar y extraer la información de sus superficies. En la siguiente Fig.25: se muestra la zona sombreada en amarillo del glaciar, que es la zona que no ha variado, en rojo las zonas que han aumentado del glaciar (cómo ya se ha argumentado anteriormente por las nevadas registradas) y en verde una máscara de toda la superficie desaparecida del glaciar, Fig.26, que equivale a 320,5 ha, Tabla 5.

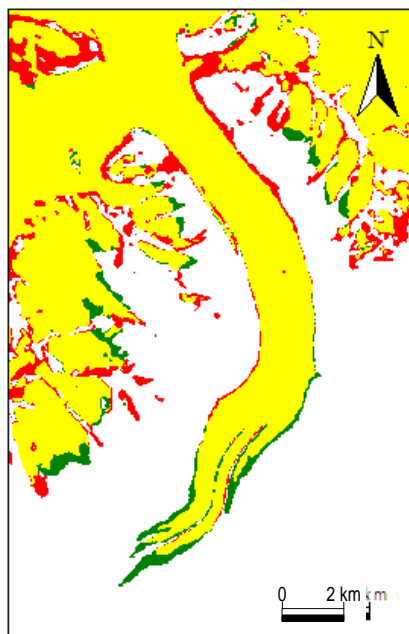


Fig.25: Resultado tras aplicar la combinación analítica de capas.

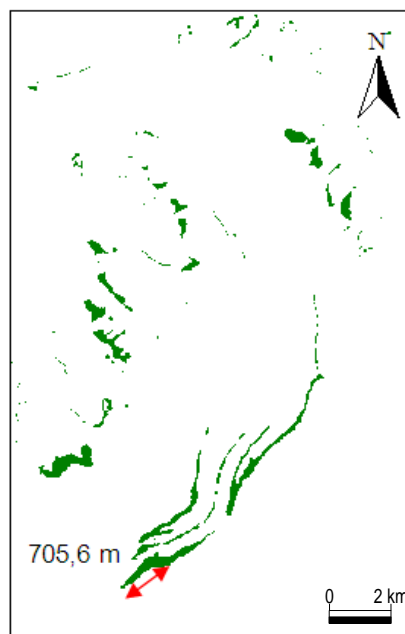


Fig.26: Detalle de la superficie desaparecida del glaciar y el retroceso en el frente.

En la siguiente Tabla 5 se cuantifican los cambios experimentados en la Fig.25, el valor (0),(0) no se incluye puesto que no representa un dato de interés al no haber tenido nieve nunca.

Valores	Representación	1986-2010
(0), (1)	Incremento de nieve	755,5 ha
(1), (0)	Perdida de nieve	320,5 ha
(1), (1)	Invariable	4873.1 ha

Tabla 5: Resultados de la combinación analítica.

Como los datos encontrados de los volúmenes desvirtúan un poco el hecho que haya retrocedido en estos 24 años el glaciar, se solicitaron datos de las precipitaciones de nieve para ambos años a *MeteoSwiss* con tal de poder justificar que en septiembre de 2010 aparezcan según qué zonas con más superficie de nieve que el octubre 1986 a pesar de ser datos tomados en la misma época del año.

La siguiente Tabla 6 muestran los valores mensuales en centímetros registrados por tres estaciones en 1986 y 2010, encontrando así, la explicación a que el glaciar en 2010 apareciera en retroceso aunque ligeramente más ancho que en 1986. Como se observa, con las tres estaciones se registra mas nieve para el 2010, en cambio en el 1986 no, de ahí que el resultado del retroceso se vea ligeramente desvirtuado.



Fig.27: Imagen de Google Maps del cantón de Valais donde se posicionan las tres estaciones de medición. Fuente: *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology del Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)*.

Mes/año	Blatten	Grächen	Ulrichen	Mes/año	Blatten	Grächen	Ulrichen
01/1986	NA	161	NA	01/2010	89	19	89
02/1986	NA	34	NA	02/2010	71	13	32
03/1986	NA	33	NA	03/2010	43	24	36
04/1986	NA	119	NA	04/2010	7	0	6
05/1986	NA	0	NA	05/2010	0	0	0
06/1986	NA	0	NA	06/2010	0	0	0
07/1986	NA	0	NA	07/2010	0	0	0
08/1986	NA	0	NA	08/2010	0	0	0
09/1986	NA	0	NA	09/2010	0	0	0
10/1986	NA	1	NA	10/2010	20	18	5
11/1986	NA	22	NA	11/2010	48	29	92
12/1986	NA	47	NA	12/2010	108	69	92

Tabla 6: Tabla de la nieve reciente acumulada en centímetros registrada por cada una de las tres estaciones en las fechas de análisis. (Las siglas NA representan los datos no registrados). Fuente: *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology del Swiss Federal Institute of Technology Zurich*

Una vez se tiene bien delimitada la zona de retroceso del frente del glaciar se prosigue a medir con la herramienta que incluye Miramon de medición, en total el glaciar ha retrocedido 705,6 m y ha perdido en su frente 8,3 ha.

A partir de las máscaras creadas para ambos años se genera una vectorización de éstas para extraer la línea del perímetro glaciar, así una vez superpuestas se pueden observar qué zonas son las que han sufrido mayor retirada, siendo esta la zona del frente del glaciar.

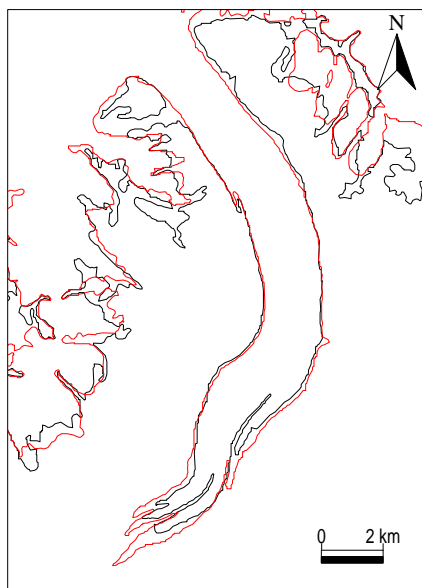


Fig.28: Imagen de los vectores superpuestos. 1986 en rojo y 2010 en negro.

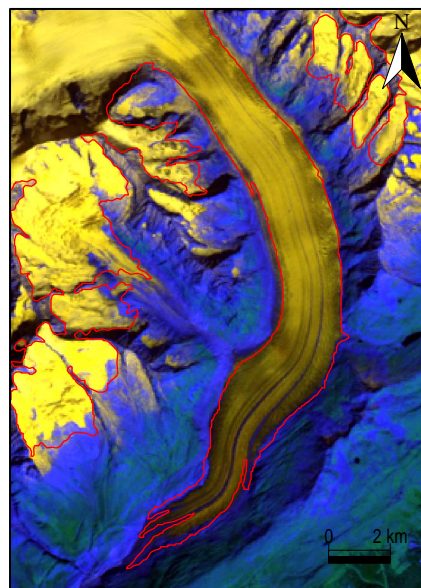


Fig.29: Vector del 1986 sobre la combinación de bandas 247 del 2010.

## Clasificación no supervisada

Este método permite definir las clases espectrales presentes en la imagen estableciendo el número de píxeles para formar un clúster con tal de agrupar aquellos con un comportamiento espectral similar para otorgar homogeneidad a la imagen. Se parte, con este método, que no se tiene ningún conocimiento previo del área de estudio.

Antes de aplicar la clasificación se hace una diferencia entre bandas de las dos imágenes agrupando los píxeles desaparecidos bajo un solo valor. A continuación se presenta en la Fig.30 los valores introducidos para conseguir la imagen clasificada, y a su izquierda el resultado en el que se logra agrupar, en azul, todos aquellos píxeles que forman parte del frente del glaciar retrocedido.

MiraMon®  
© Xavier Pons

Filters

Nombre de bandas: 3

Filter lista de bandas:  
c:\Users\carolina\Desktop\VALETSCH 2010\ULTIMO Diferencias\cals no superv.txi

Filter resultat:  
c:\Users\carolina\Desktop\VALETSCH 2010\ULTIMO Diferencias\Class No Superv

Nombre de centres de cluster inicial

A la diagonal multivariant: 250    Nombre de desviacions estàndard: 10

Aleatòriament repartits en l'espai multivariant: 300

Per mostreig sistemàtic: 300     Distància entre mostres (unitats mapa)

Nombre de mostres

El nombre de clusters inicials i màxim és: 850

Lindar de convergència: 2    Tipus de distància:  Euclidiana     Eixample

Màxim nombre d'iteracions a realitzar: 2

Mínima similitud entre classes: 5

Tolerància de variables amb Nodata: 2    Usa Màxim

Avançades...

D'acord    Cancel·lar    >>BAT...    Ajuda

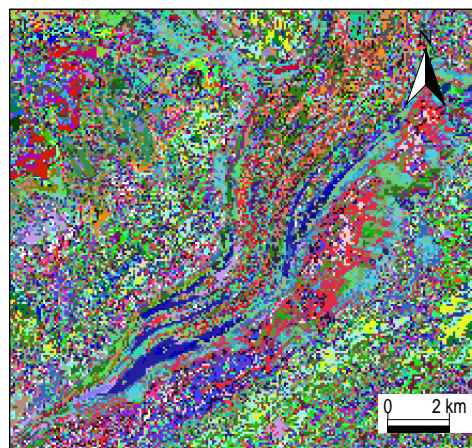


Fig.30: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada y a su derecha el resultado.

Una vez realizadas las mediciones sobre el resultado de la clasificación se obtiene que el glaciar se ha retirado 714,1 m, lo equivalente a superficie retrocedida de 10,7 ha.

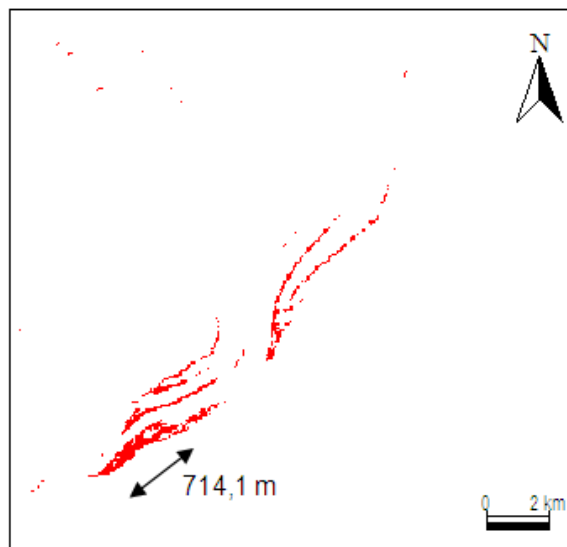


Fig.31: Resultado de la combinación analítica y detalle del retroceso del frente.

#### 5.1.4. Resultados obtenidos

Una vez que obtenidos los resultados con ambos métodos se procederá a compararlos primero entre ellos y luego con fuentes externas.

Tanto con el NDSI como con la clasificación se han conseguido datos muy similares, se observa cómo la longitud retrocedida por el glaciar desde 1986 al 2010 es de unos 29,4-29,75 m al año, lo que equivaldría a una superficie retrocedida de unas 8,3-10,7 ha.

Si se contrastan estos resultados con la información facilitada por el **Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology** del **Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH)**, según el informe, Tabla 4, de la medición de las variaciones de la longitud del frente entre 1986 y 2010, sitúa el retroceso registrado en 840,3 m, lo que equivaldría a unos 35 m al año, dato muy próximo al obtenido con los análisis.



## 5.2. Glaciar Mer de Glace

### 5.2.1. Datos del glaciar

#### Los Alpes franceses: Macizo del Montblanc

Se trata de un grupo montañoso situado en los Alpes, entre el Valle de Aosta en Italia y la Alta Saboya, en Francia.

El glaciar se origina a una altura de 2.400 m sobre el nivel del mar donde lo alimenta la confluencia del glaciar de Géant, glaciar de Lechaud y Cascada de Talèfre, al norte del Mont Tacul, y desciende hasta los 1.400 m. Éste fluye en dirección noroeste entre la Aiguille du Moine al este y Trélaporte al oeste.

#### Mer de Glace

##### Características del glaciar:

Localización: departamento de Alta Saboya, Francia

Tipo: Glaciar de Valle

Estado: Retroceso

Origen: en el Glaciar de Géant, glaciar de Lechaud y Cascada de Talèfre

Latitud: 45°54'58"N

Longitud: 6°56'14"E

Altitud: 2400-1400 m

Longitud: 7 Km

Grosor máximo: 200m

Superficie: 35 Km<sup>2</sup>



Fig.32: Situación del glaciar en Francia.  
Fuente: Google Maps.

El *Mer de Glace* (Mar de Hielo) es el glaciar más largo de Francia y se encuentra en la ladera norte del macizo del Mont Blanc, en los Alpes franceses, naciendo a una altura de 2400 m.

En el pasado se veía fácilmente desde Chamonix, pero se ha reducido hasta tal punto que ahora apenas se ve desde abajo. Se estima que el glaciar habrá perdido en 130 años el 8.3% de su longitud, y se habrá adelgazado un 27% en la parte central del glaciar desde el 1907.

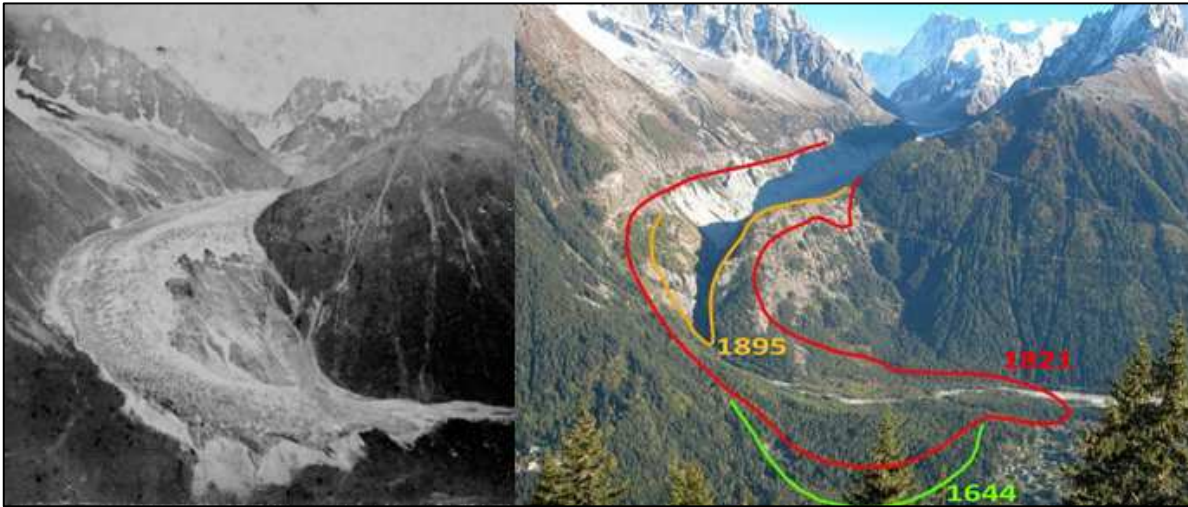


Fig.33: izquierda, Mer de Glace en 1850; derecha, significativo retroceso de 1,2 Km del glaciar entre 1895 y 1821 (derecha). Fuente: S. Nussbaumer, University of Bern.

La imagen del fondo corresponde al estado actual del glaciar y se ha querido comparar con una imagen en la que quedan representados los cambios experimentados por el glaciar, cómo se muestra en la Fig.34: La línea roja corresponde a la longitud del glaciar en el 2003 y la amarilla al 2009, se observa cómo en el 2003 estaba en contacto con el lago glaciar y en el 2009 a la altura de la primera grieta transversal profunda que aparece en las imágenes.

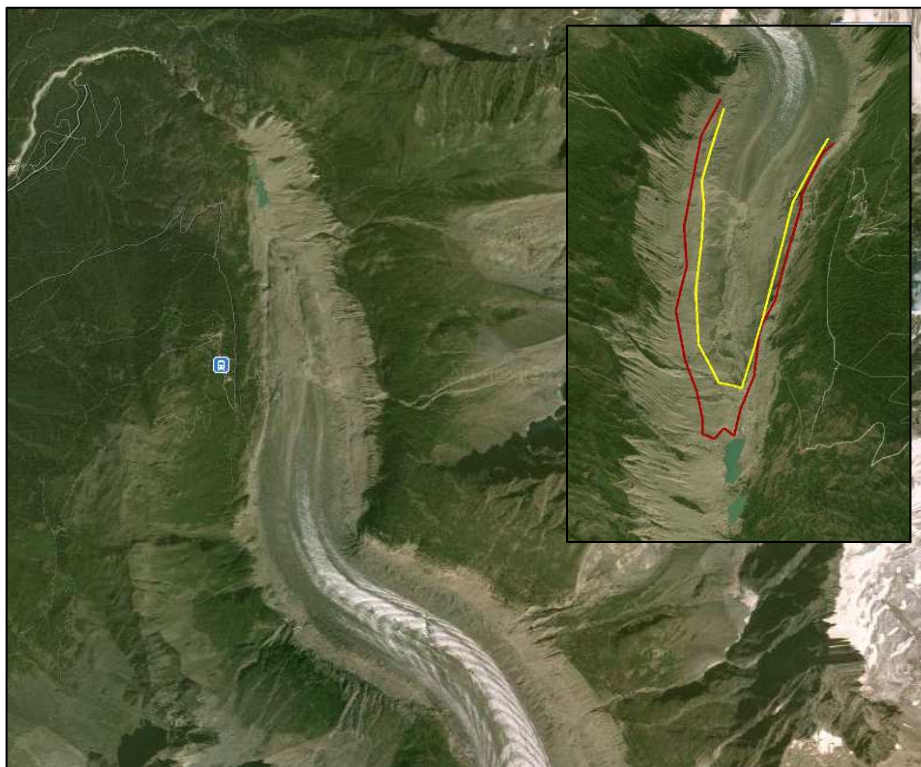


Fig.34: La imagen del fondo corresponde al glaciar Mer de Glace de Google Maps 2012. Imagen superpuesta, donde la línea roja corresponde a la posición del glaciar en 2003 y en amarillo a 2009. Fuente: [www.alacierchance.wordpress.com](http://www.alacierchance.wordpress.com).

A continuación se muestra un plano topográfico con las curvas de las variaciones de espesor del glaciar medido a lo largo de diferentes perfiles:

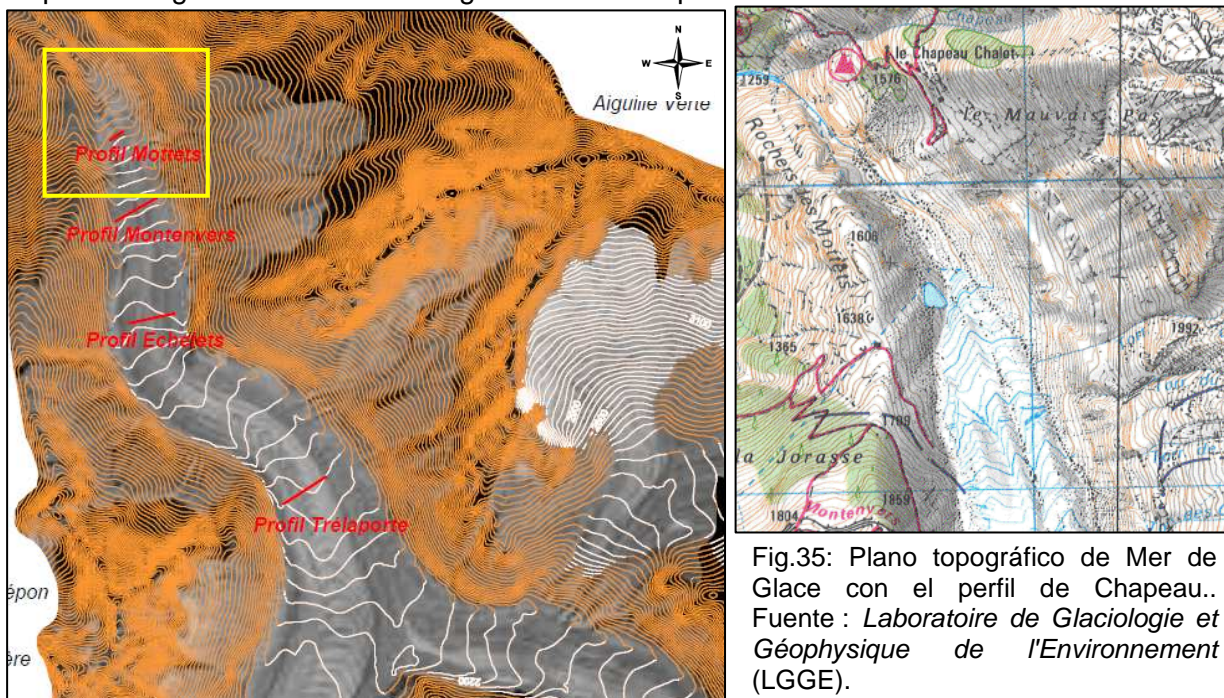
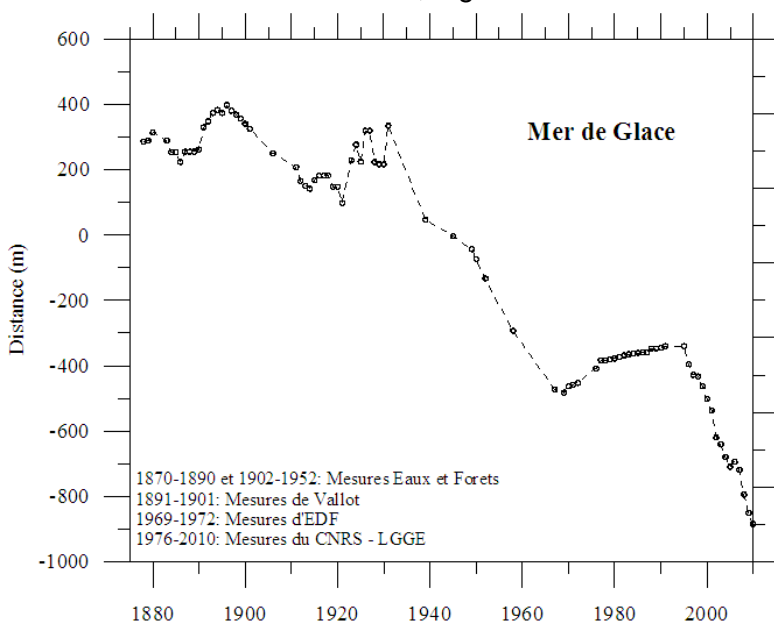


Fig.35: Plano topográfico de Mer de Glace con el perfil de Chapeau.. Fuente : *Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)*.

Los siguientes datos han sido facilitados por *Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)*. En la Tabla 7 aparecen los retrocesos registrados por cada año en referencia al perfil de Chapeau (en la Fig.35: se señala su situación), todo ello reflejado en una gráfica donde queda patente el incremento en el retroceso, Fig.36:



Arriba, Fig.36: Gráfica del retroceso de Mer de Glace. Derecha, Tabla 7: Evolución del frente de Mer de Glace a partir del perfil Chapeau. Fuente: Institut Geographique National. Fuente: *Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)*.

Año	Cambio de longitud (m)	Longitud acumulada (m) ref. perfil Chapeau
1988	*	-347
1989	0	-347
1990	2	-345
1991	5	-340
1992	*	*
1993	*	*
1994	*	*
1995	*	-340
1996	-55	-395
1997	-33	-428
1998	-5	-433
1999	-30	-463
2000	-39	-502
2001	-36	-538
2002	-82	-620
2003	-20	-640
2004	-40	-680
2005	-30	-710
2006	-15	-695
2007	-17	-719
2008	-76	-795
2009	-56	-851
2010	-33,5	-885

En la siguiente Tabla 8 se muestran los valores de temperaturas mínimas registradas para cada año, en el que puede observarse un incremento de las mismas hacia la última década:

año	temperatura	año	temperatura
1988	1	2000	1,52
1989	0,5	2001	1,85
1990	0,75	2002	2,33
1991	0,24	2003	1,44
1992	1,31	2004	1,5
1993	1,34	2005	0,35
1994	2,27	2006	1,68
1995	1,04	2007	2,02
1996	1,34	2008	2,05
1997	0,83	2009	1,73
1998	0,81	2010	1,18
1999	1,24		

Tabla 8: Medias mínimas anuales (en °C). Fuente: Eugen Lucian Casparian. Fuente: *CRC Climatology Laboratory of "Universite de Bourgogne"*, Dijon, Francia.

### 5.2.2. Datos usados

Ambas imágenes son Landsat 4-5 con sensor TM descargadas de la página de USGS, la imagen de la izquierda, Fig.36 corresponde al 27 de agosto de 1988 y la de la derecha, Fig.38 a 1 de septiembre del 2010. En la elección de la imagen se ha tenido especial cuidado en que no hubiese nubosidad cercana y que el glaciar a simple vista fuese claramente visible, tal y como puede distinguirse en las siguientes imágenes.

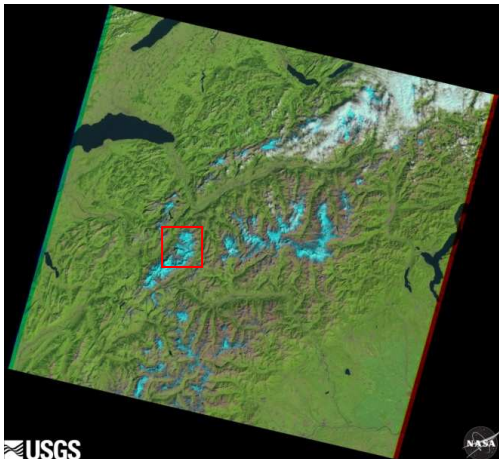


Fig.37: imagen del glaciar Mer de Glace del 27 de agosto del 1988 con referencia LT41950281988240XXX01.

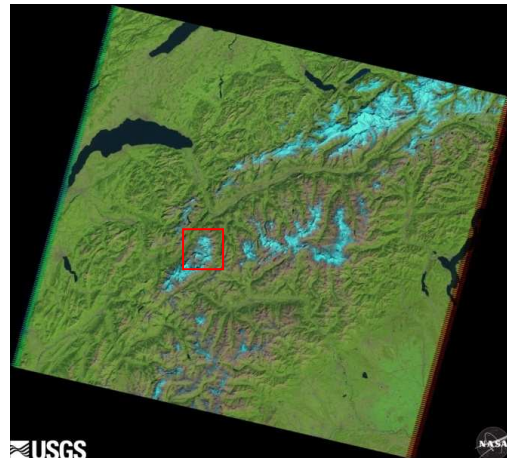


Fig.38: imagen del glaciar Mer de Glace del 1 de septiembre del 2010 con referencia LT51950282010244MOR00.

### Fusión de datos

A simple vista con esta técnica se observan más detalles de la imagen, distinguiéndose mejor el perímetro glaciar. Resulta muy útil como referencia en el momento de analizar o discriminar datos obtenidos tras los procedimientos aplicados en la imagen.



Fig.39: Imagen multispectral fusionada con la pancromática y su detalle ampliado. Referencia de la imagen: p195r028\_7f19990725\_z32\_ps742, del 4 de diciembre del 2002.

### 5.2.3. Tratamiento de la imagen

Se realiza el mismo procedimiento que el anterior glaciar analizado. Una vez se aplicada la **expansión del contraste** se observa con claridad el retroceso sufrido en el frente y en la zona central cómo se abre un espacio sin hielo.

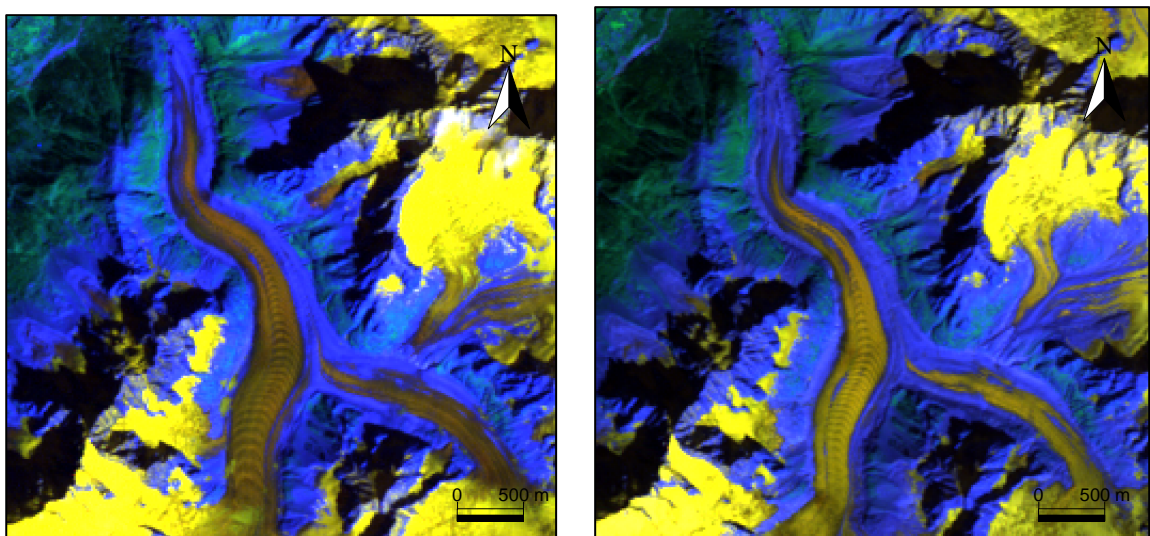


Fig.40: Combinación de bandas 247. Izquierda, Mer de Glace en 1988; derecha, Mer de Glace en 2010.

### NDSI (*Normalized Difference Snow Index*)

Una vez aplicado el NDSI se aíslan los píxeles que representan el glaciar en una máscara tal y cómo se observa en la Fig.41. En este caso con un análisis visual se ve cómo existe un claro retroceso de su frente.

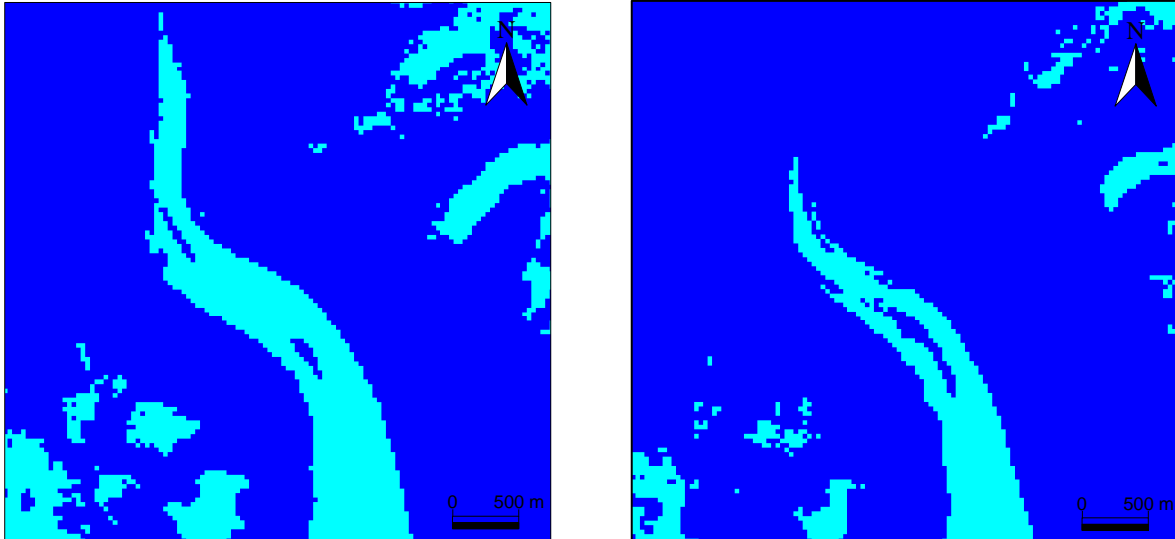


Fig.41: Creación de una máscara para cada año. Izquierda, Mer de Glace 1986; derecha, Mer de Glace 2010.

A partir de las máscaras de cada año se superponen con la **combinación analítica** para obtener la superficie del glaciar desaparecido, que correspondería al valor 1-0 del píxel, tal y como aparece en la Fig.43 en color verde.

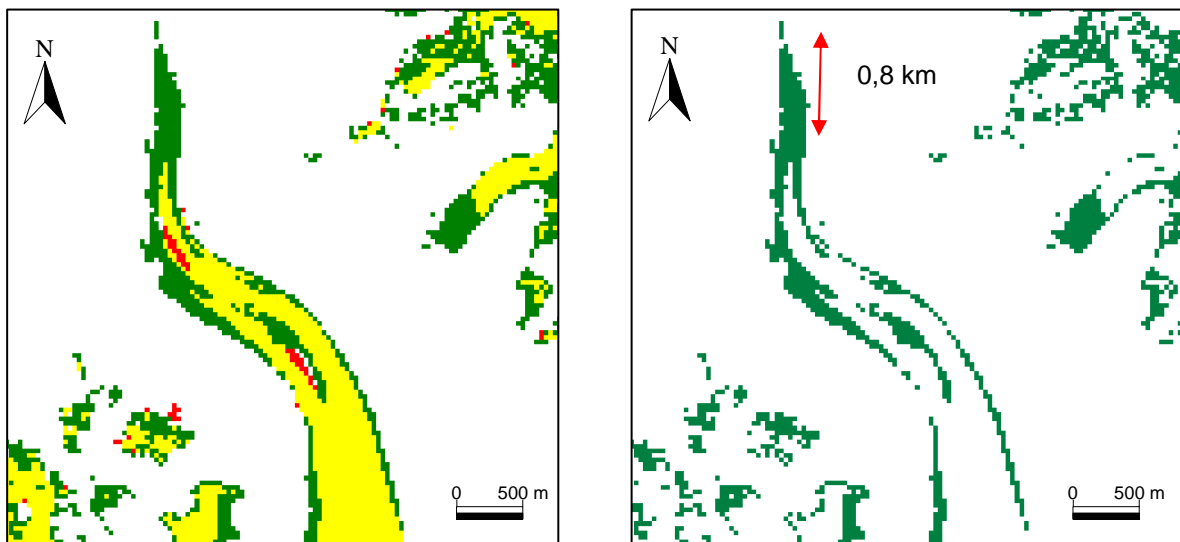


Fig.42: Resultado tras aplicar la combinación analítica de capas.

Fig.43: Detalle de la superficie desaparecida del glaciar y el retroceso en el frente.

En la siguiente Tabla 9 muestra toda el área desaparecida se aísla y se toman medidas para hallar cuanto ha retrocedido el frente. Se cuantifica que en el periodo de 22 años ha experimentado una retirada de 0,8 km, lo que equivale a 11,9 ha.




	Valores	Representación	1988-2010
	(0), (1)	Incremento de nieve	5,3 ha
	(1), (0)	Perdida de nieve	158 ha
	(1), (1)	Invariable	175,3 ha

Tabla 9: Resultado de la combinación analítica.

Para finalizar se extraerá el perímetro de cada época con tal de ser mejor comparados una vez superpuestos, Fig. 44 y 45:

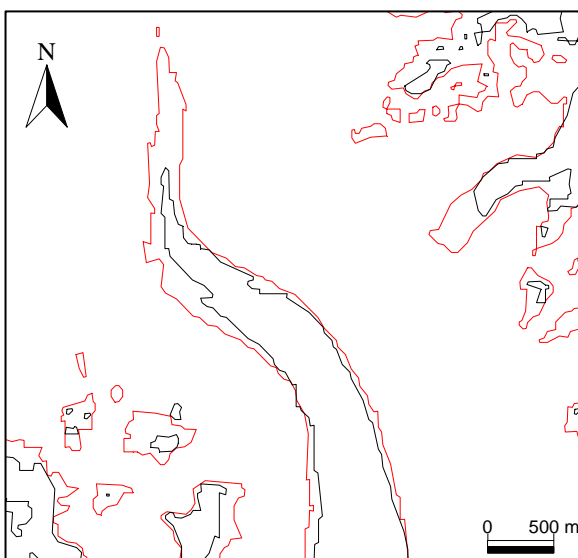


Fig.44: Imagen de los vectores superpuestos. 1988 en rojo y 2010 en negro.

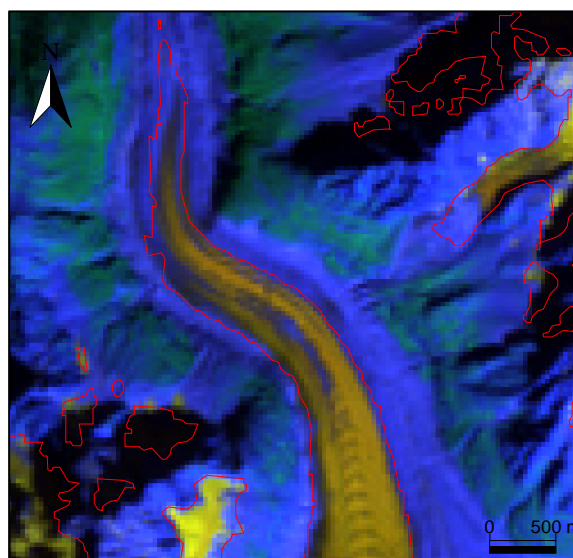


Fig.45: Vector del 1988 sobre la combinación de bandas 247 del 2010.

### Clasificación no supervisada

Con la clasificación se definen las clases espectrales en la imagen sin un conocimiento previo de la zona por lo que tras aplicar los siguientes parámetros, Fig.46, revisando si el resultado se ajusta bien al objetivo establecido. En la Fig.47 aparece la zona retrocedida en color rosa representado correctamente la superficie de retroceso.

Fig.46: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada.

Miramón © Xavier Pons  
 Filtres: Nombre de bandas: 3  
 Filtre llista de bandes: E:\PFC copia seguridad\Proyecto\Mer de Glace, Chamonix\uDiferencias\pruebaa.txt [Lista...]  
 Filtre resultat: E:\PFC copia seguridad\Proyecto\Mer de Glace, Chamonix\uDiferencias\prueba MDG [Lista...]  
 Nombre de centres de cluster inicial:  
 A la diagonal multivariant: 250 Nombre de desviacions estàndard: 10  
 Aleatòriament repartits en l'espai multivariant: 300  
 Per mostreig sistemàtic: 300  Distància entre mostres (unitats mapa)  Nombre de mostres  
 El nombre de clusters inicials i màxim és: 1551  
 Llímit de convergència: 2 Tipus de distància:  Euclidiana  Eixample  
 Màxim nombre d'iteracions a realitzar: 2  
 Mínim nombre de píxels per formar un cluster: 550 [Avançades...]  
 Mínima similitud entre classes: 5  
 Tolerància de variables amb Nodata: 5 [Usa Màxim]  
 [D'acord] [Cancel·lar] [ >>BAT... ] [Ajuda]

Una vez seleccionada la zona deseada se crea una máscara, Fig.48, y se le realizan las oportunas mediciones, obteniendo que, en total la masa del glaciar sombreada en rojo corresponde a 0,6 km que se han retirado a lo largo de 22 años, lo equivalente a unas 8,5 ha.

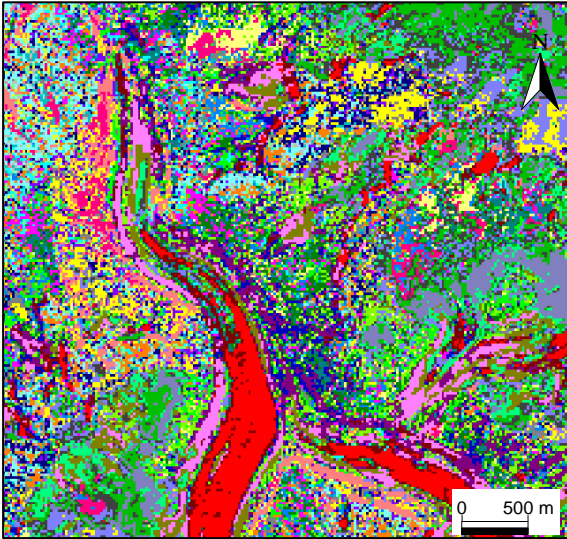


Fig.47: Resultado de la combinación analítica.

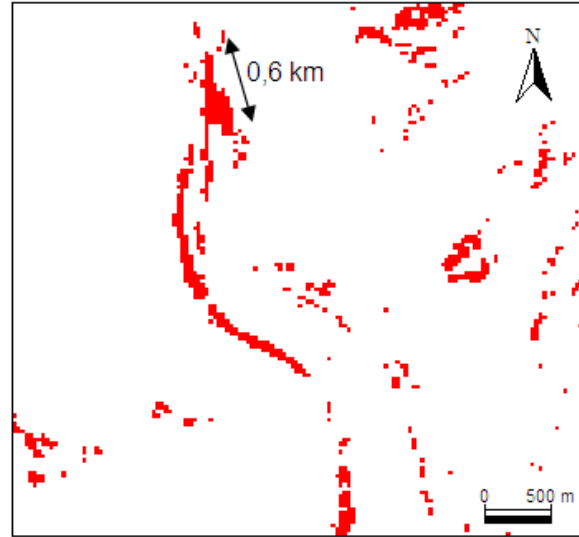


Fig.48: Resultado de la combinación analítica y detalle del retroceso del frente.

#### 5.2.4. Resultados obtenidos

Con ambos métodos se consiguen resultados muy similares en cuanto a longitud retrocedida, con NDSI se obtiene que el glaciar se ha retirado a una velocidad de 36,36 m anuales, mientras que con la clasificación no supervisada 27,27 m anuales. Si estos datos son comparados, resultan muy próximos a los 24,45 m anuales, dato facilitado por el **Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)**.

De los resultados encontrados por otras fuentes, resulta poco práctico realizar comparaciones con épocas de tiempo demasiado largas o antiguas puesto que hay que tener en cuenta que el glaciar experimenta un acelerado retroceso en los últimos años debido, entre otras cosas, a las elevadas temperaturas registradas por el calentamiento, es una forma que el resultado sea lo menos desvirtuado posible.



### 5.3. Glaciar Upsala

#### 5.3.1. Datos del glaciar

##### El Parque Nacional Los Glaciares

El Campo de Hielo Patagónico Sur es una extensa masa de hielo terrestre que cubre una región montañosa, exceptuando los cerros más altos. Es la tercera masa de hielo más extensa del mundo no polar tras las de la Antártida y Groenlandia.

Situado en los Andes patagónicos, en la frontera entre Argentina y Chile, se le denomina Campo de Hielo Patagónico Sur en Argentina y Campo de Hielo Sur en Chile.

Se extiende de norte a sur a lo largo de 350 km, desde los 48°20' S hasta los 51°30' S. Tiene una extensión de 16.800 km<sup>2</sup>, de los cuales alrededor del 85% pertenece a Chile y el resto a la Argentina.

##### Características:

- Se trata de uno de los dos campos de hielo presentes en Patagonia, y una de las grandes extensiones de hielo glaciar en el mundo.
- Superficie en el año 1945: 13.500 Km<sup>2</sup>
- Superficie en el año 2010: 12.550 Km<sup>2</sup>
- Longitud de Norte a Sur: 360 Km
- Ancho variable: 80-17 Km
- El campo está formado por 48 glaciares principales

Del campo de hielo se desprenden un total de 49 glaciares, entre los que se encuentran los glaciares Upsala (902 km<sup>2</sup>), Viedma (978 km<sup>2</sup>) y Perito Moreno (258 km<sup>2</sup>) en Argentina y en Chile Jorge Montt, Pío XI (el mayor del hemisferio sur fuera de la Antártida, con 1.265 km<sup>2</sup>), O'Higgins, Bernardo, Tyndall y Grey.

Dentro del Campo de Hielo Patagónico, en la zona de Argentina, se encuentra el Parque Nacional Los Glaciares.



Fig.49: Parque Nacional de los Glaciares de Argentina. Fuente: [www.interhabit.com/el\\_calafate](http://www.interhabit.com/el_calafate)

Fue designado Parque Nacional en 1937 y es el más grande en la República Argentina. Su toponimia se refiere a sus glaciares (algunos de ellos se incluyen entre los más grandes del hemisferio sur fuera de la Antártida). A continuación se explicarán las características del glaciar Upsala.

## Upsala

### Características del glaciar:

Localización: Santa Cruz, Argentina  
 Tipo: glaciar de valle  
 Estado: en retroceso  
 Latitud: 49°57'26.83"S  
 Longitud: 73°19'34.60"W  
 Altitud: paredes de 60-80 m  
 Longitud: 60 Km  
 Anchura: máximo 10 km  
 Superficie: 100.000 ha incluyendo sus afluentes (donde el 90% por hielo)

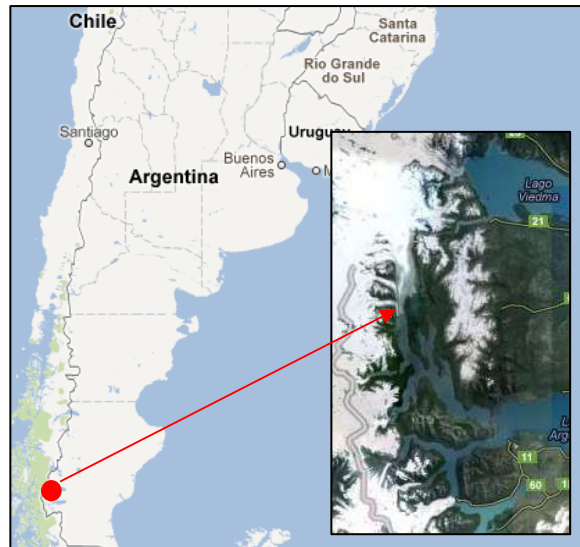


Fig.50: Situación del glaciar Upsala. Fuente: Google Maps.

Es un gran glaciar que cubre un valle compuesto por varios glaciares. Éste fluye desde el Campo de Hielo Patagónico Sur, el cual también da origen al Glaciar Perito Moreno que se encuentra en la misma área, hasta el Lago Argentino. El glaciar Upsala, ubicado sobre el Brazo Norte del mismo lago. El Glaciar Upsala debe su nombre a la ciudad sueca cuya Universidad patrocinó en 1908 el primer estudio glaciológico, en el siglo XX, de la región entre cuyos objetivos estaba, precisamente, dicho glaciar.

El glaciar posee una longitud de 60 km (siendo el segundo más largo de Sudamérica, tras el Pío XI), un ancho de 10 km, y tiene dos lenguas terminales de aproximadamente 4 km de ancho cada una.

En su parte central se observa una larga franja oscura que es una morrena media, una acumulación de rocas, arena y arcilla transportadas por glaciares menores, pertenecientes al Upsala, que quedaron atrapadas en el interior de éste al confluir dos lenguas de hielo.



Fig.51: Arriba imagen del glaciar Upsala en el 1928 y abajo en el 2004. Fuente: Greenpeace/Reuters.

En la siguiente Fig.52 se hace una comparativa entre dos años con dos imágenes tomadas por diferentes satélites, la imagen de la izquierda corresponde al glaciar Upsala en el 5 de enero del 1986 tomada por el satélite de óptico Landsat 5, y la imagen de la derecha al 26 de noviembre del 2006 tomada por el satélite de radar Advanced Land Observing Satellite (ALOS), es un satélite artificial japonés dedicado a la observación terrestre. A simple vista se observa el retroceso que ha experimentado en ambos brazos del glaciar tras 20 años.

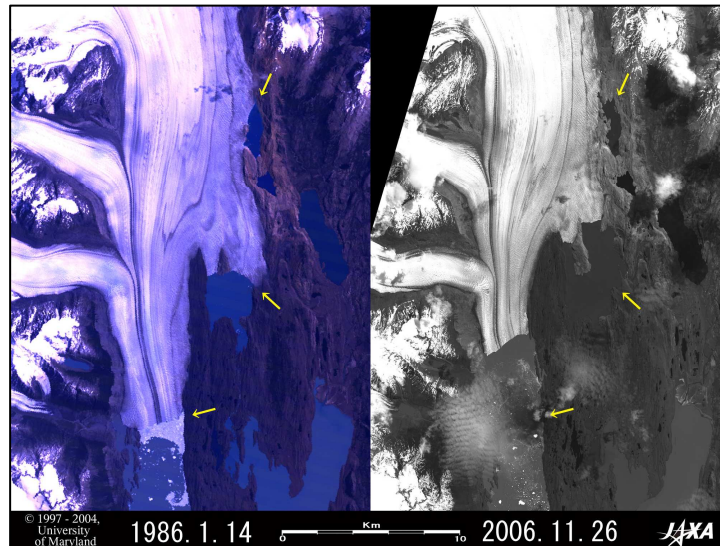


Fig.52: Comparativa del retroceso del glaciar Upsala con dos imágenes satelitales. Fuente: Japan Aerospace Exploration Agency.

### 5.3.2. Datos usados

La imagen antigua con mayor visibilidad encontrada corresponde a enero de 1986, Fig.53 y la más nueva a octubre del 2001, Fig.54. Ambas son imágenes Landsat descargadas de la página de GLCF, dónde la imagen antigua está tomada con Landsat 4-5 TM y la más nueva Landsat 7 ETM+.

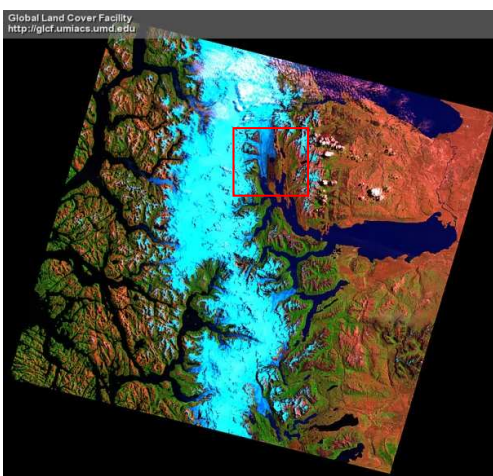


Fig.53: imagen del glaciar Upsala del 4 de enero del 1986 con referencia 014-569.

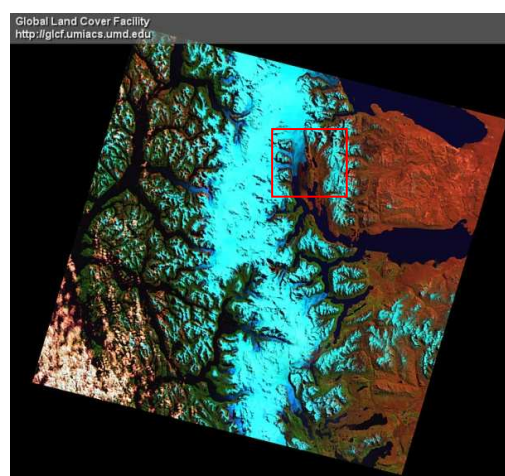


Fig.54: imagen del glaciar Upsala del 14 de octubre del 2001 con referencia 035-115.

### Fusión de datos

El resultado tras unir una imagen RGB con un tamaño de pixel de 30 m con una pancromática de 14,25 m es el de la siguiente Fig.55, la imagen pancromática usada corresponde a octubre del 2001, igual que la segunda imagen usada para el análisis temporal.

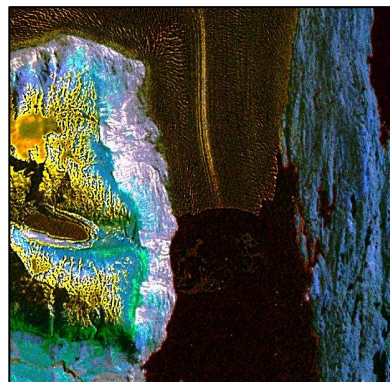
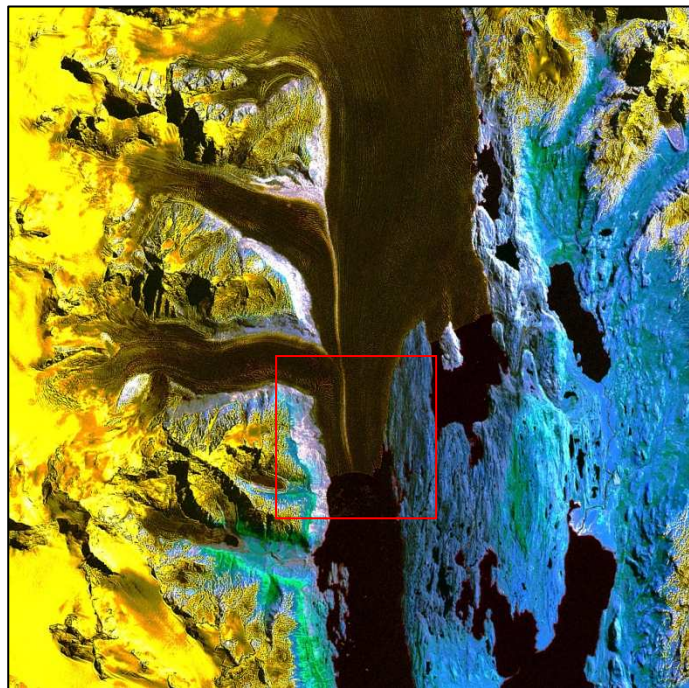


Fig.55: Imagen fusionada junto con el detalle del frente ampliado. Referencia de la imagen:

p231r095\_7f20011014\_z18\_ps 742, del 26 de enero del 2006.

### 5.3.3. Tratamiento de la imagen

Una vez descargadas las bandas de las imágenes se procede a hacer una combinación de bandas 247, una vez se centra y recorta la escena se aplica una **expansión del contraste**, Fig.56. A simple vista ya se observa el retroceso que ha experimentado el glaciar en 21 años.

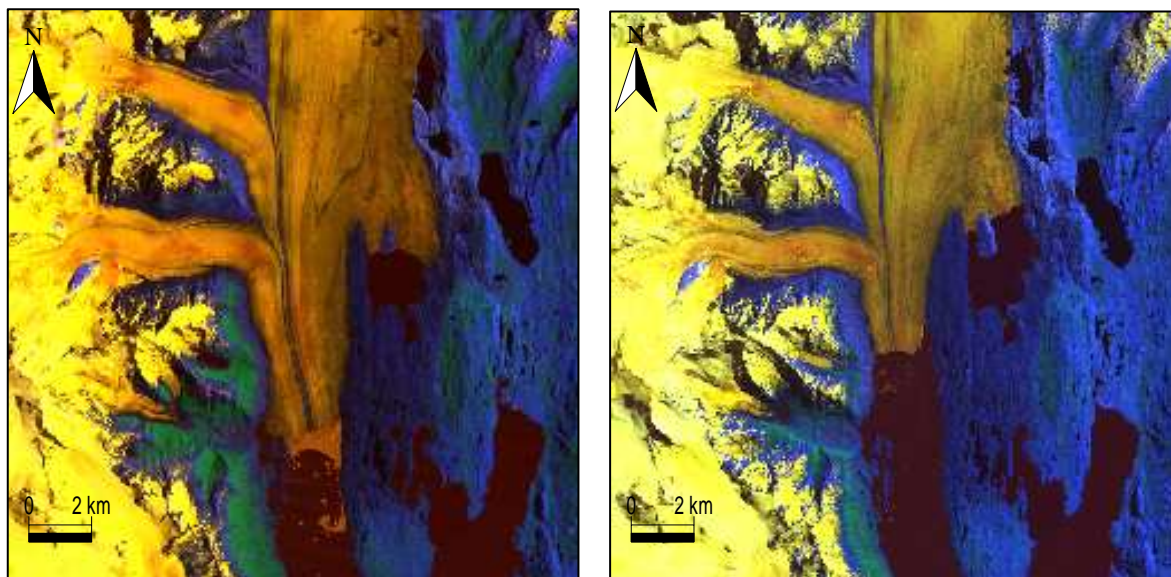


Fig.56: Combinación de bandas 247. Izquierda, Upsala en 1986; derecha, Upsala en 2001.

### NDSI (*Normalized Difference Snow Index*)

Una vez aplicados los índices de nieve se aíslan las zonas de hielo glaciar que interesa comparar y se le aplica un **filtro de convolución** con tal de realzar geoméricamente la imagen binaria, este filtro suaviza los resultados obtenidos tras una clasificación o agrupamiento de píxeles, consistiendo en escoger el valor más frecuente del grupo.

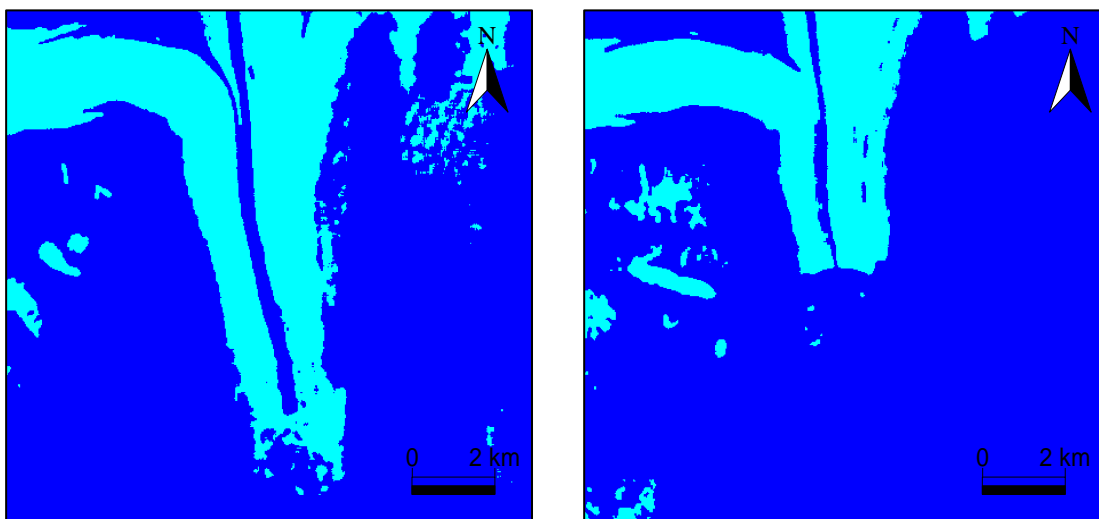


Fig.57: Creación de una máscara para cada año. Izquierda, Upsala 1986; derecha, Upsala 2001.

Se realiza con ambas épocas una **combinación analítica de capas**, Fig.58:, para extraer la información relativa a la superficie de glaciar desaparecida y se aísla la capa que interesa como la imagen binaria de la Fig.59:

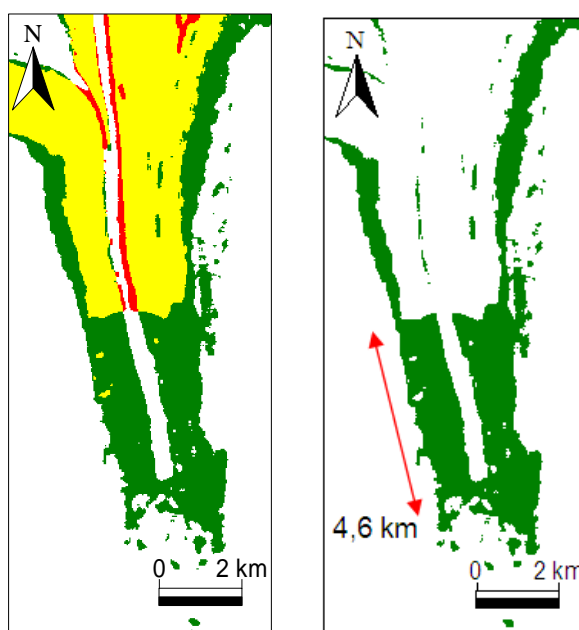


Fig.58: Izquierda, resultado tras aplicar la combinación analítica de capas. Fig.59: Derecha, detalle de la superficie desaparecida del glaciar y retroceso en el frente.

En la siguiente Tabla 10 se muestran los datos obtenidos con la Fig.58:




	Valores	Representación	1986-2001
	(0), (1)	Incremento de nieve	128,6 ha
	(1), (0)	Perdida de nieve	1542,3 ha
	(1), (1)	Invariable	1724,6 ha

Tabla10: Resultado de la combinación analítica.

Se observa un gran retroceso entre los 15 años que separan ambas épocas siendo 1154,2 ha la superficie del frente desaparecida, lo que equivale a una longitud de 4,6 km. En la Fig.60 se muestran las imágenes binarias antes creadas, Fig.57, vectorizadas y superpuestas a fin de resaltar mejor donde ha sufrido una mayor retroceso el glaciar, siendo este la lengua principal con 4,6 km de retirada ya comentados.

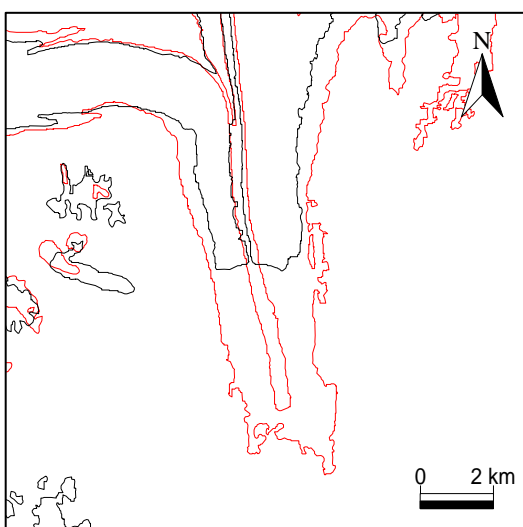


Fig.60: Imagen de los vectores superpuestos. 1986 en rojo y 2001 en negro.

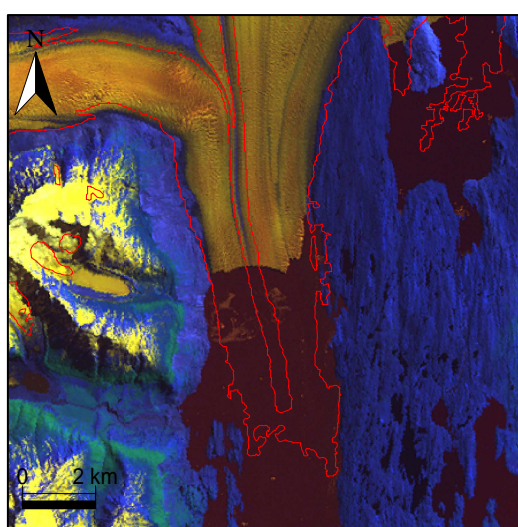


Fig.61: Vector del 1986 sobre la combinación de bandas 247 del 2001.

### Clasificación no supervisada

A continuación, en la Fig.62, se exponen los parámetros introducidos con tal de conseguir agrupar lo mejor posible las clases espectrales realzando la zona del glaciar retrocedido, el resultado aparece en la Fig.63:

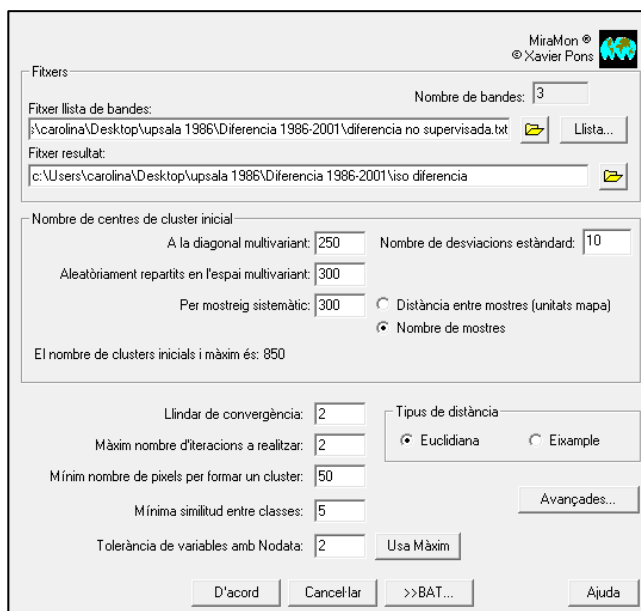


Fig.62: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada.

Una vez aplicada la clasificación en la imagen se aplica un **filtro de convolución** con tal de homogeneizar un poco más la imagen binaria, Fig.64 si se mide desde la morrena central se obtiene que el glaciar en 15 años ha retrocedido unos 4,5 km, con una volumen total desaparecido de 1336,1 ha.

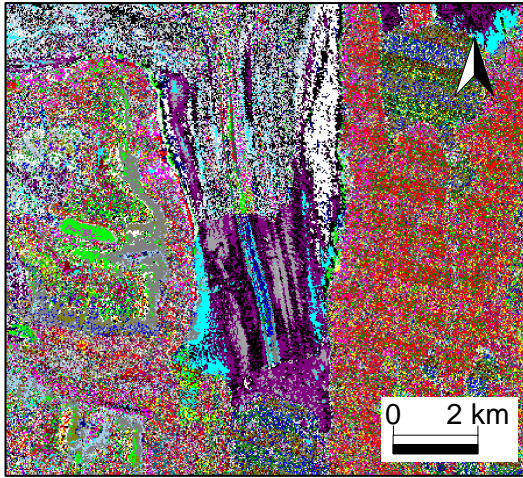


Fig.63: Resultado de la combinación analítica.

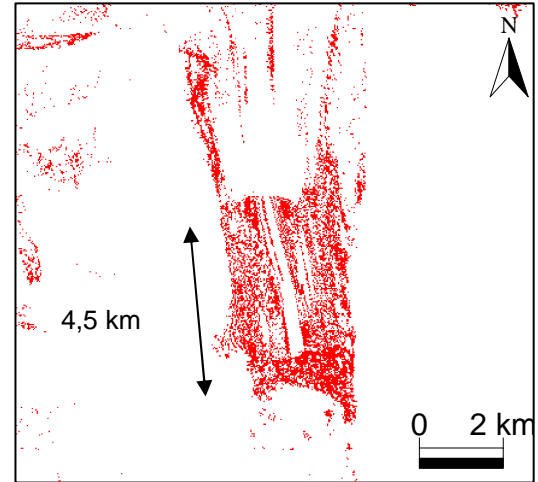


Fig.64: Resultado de la combinación analítica y detalle del retroceso del frente.

#### 5.3.4. Resultados obtenidos

A partir de los valores adquiridos tanto con el NDSI como con la clasificación no supervisada se llega a la conclusión que el glaciar ha retrocedido de 4,5 a 4,6 km, y en cuanto a superficie de entre 1154,2 ha, hallado con el método NDSI, y 1336,1 ha, con la clasificación no supervisada.

A fin de confirmar lo resultados se comprueban con otros estudios encontrados sobre la materia. Según un estudio sobre el Upsala de **Japan Aerospace Exploration Agency**, entre el periodo 1986-2006 el glaciar retrocedió 4,6 km a razón de una velocidad de 230 m al año, resultado bastante aproximado al encontrado con este proyecto de 300 m al año con el método de clasificación no supervisada. Otro de los datos encontrados sobre el Upsala, consta que entre 1985-2003 retrocedió 18,11 km<sup>2</sup>, lo que vendría a ser aproximadamente 1km<sup>2</sup> al año, valor muy cercano a los 0,89 km<sup>2</sup> anuales obtenidos con la clasificación no supervisada.

#### 5.4. Glaciares Alaska

Los principales glaciares de Alaska se concentran en el Golfo de Alaska, situado en el océano Pacífico en la costa sur de Alaska, delimitado por la península de Alaska por el oeste, y por el archipiélago Alexander, por el este, donde se encuentra la bahía Glaciar.

La ribera del golfo es una combinación de bosques, montañas y glaciares. La costa está profundamente mellada, con profundos entrantes como el Cook Inlet y el Prince William Sound (dos largos cuerpos de agua interconectados), y también la bahía Yakutat y el Cross Sound.

Meteorológicamente, el golfo es un continuo generador de tormentas. Esto, sumado a las vastas cantidades de nieve y hielo sobre el sur de Alaska, da como resultado las mayores concentraciones de glaciares al sur del círculo polar ártico.

Es una región muy activa en cuanto a movimientos sísmicos, y a actividad volcánica.

Sus temperaturas son suaves en comparación con el resto del territorio, con una media de 4°C anuales y una precipitación de 3.650 mm.

La bajada de los glaciares desde las cumbres nevadas hasta la bahía crea uno de los mejores paisajes del mundo para observar la creación de icebergs.

Los Glaciares más importantes se concentran de oeste a este en este orden: Glaciar Columbia, Bering, Malaspina y la bahía de los glaciares que contiene un gran número de glaciares, aunque más pequeños que los anteriores: Glaciar Muir, Margerie y el Lamplugh.

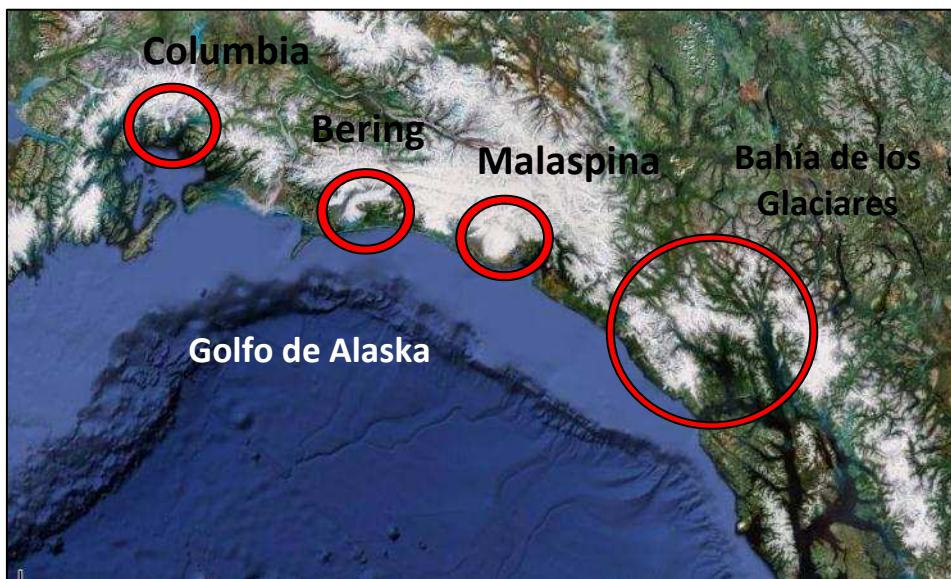


Fig.65: Golfo Alaska. Fuente: Google Maps.

El parque nacional y reserva de la Bahía de los Glaciares (*Glacier Bay National Park and Preserve*) es un parque nacional y reserva de los Estados Unidos. El territorio es declarado como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. El parque ocupa una extensión de 13.287 km<sup>2</sup>, de los que 10.784 km<sup>2</sup> se consideran zona salvaje.

A continuación desarrollaremos 2 glaciares de los más representativos mencionados anteriormente: Columbia y Bering.



### 5.4.1. Datos glaciár: Columbia

#### Características del glaciár:

Localización: *Columbia Icefield*.  
 Tipo: Tidewater glaciers.  
 Estado: Retroceso.  
 Origen: Desciende de la montañas Chugach hasta Prince William Sound.  
 Latitud: 61°13'11"N.  
 Longitud: 146°53'43"W.  
 Altitud: 2400-1400 m.  
 Longitud: 57 km.  
 Ancho: 5 km.  
 Grosor máximo: 550 m.  
 Superficie: 1000 km<sup>2</sup>.

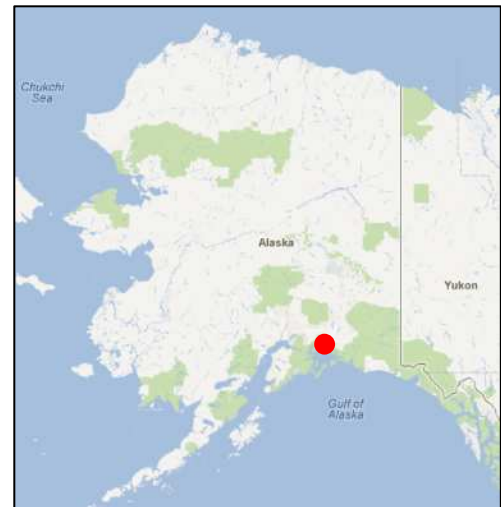


Fig.66: Alaska. Fuente: GoogleMaps

El campo de hielo Columbia (*Columbia Icefield*) es uno de los mayores campos de hielo y nieve por debajo del círculo polar ártico. Se sitúa en las montañas Rocosas Canadienses, entre los parques nacionales de Banff y Jasper, ambos en la provincia de Alberta. Es la mayor acumulación de hielo de las montañas Rocosas, con cerca de 325 km<sup>2</sup> de superficie y de 100 a 365 m de espesor, además de recibir cerca de 7 m de nieve al año. En el lugar existen varios glaciares entre ellos está el Columbia.

El Columbia es uno de los glaciares que más rápido se mueven en el mundo, y ha estado retrocediendo desde principios de 1980. Ha sido objeto de investigación continúa por el Servicio Geológico de EE.UU.

Antes de 1980, que tenía una larga historia de estabilidad, su longitud de lengua era de 66 km con sus pequeños avances y retrocesos. Durante la primera parte de la década de 1980, comenzó un rápido retroceso que se ha mantenido hasta mediados de 1990 y como resultado su longitud es aproximadamente de 57 km, 5 km de ancho y una superficie de unos 1000 km<sup>2</sup> cuya parte final se encuentra sumergida en las frías aguas del océano.

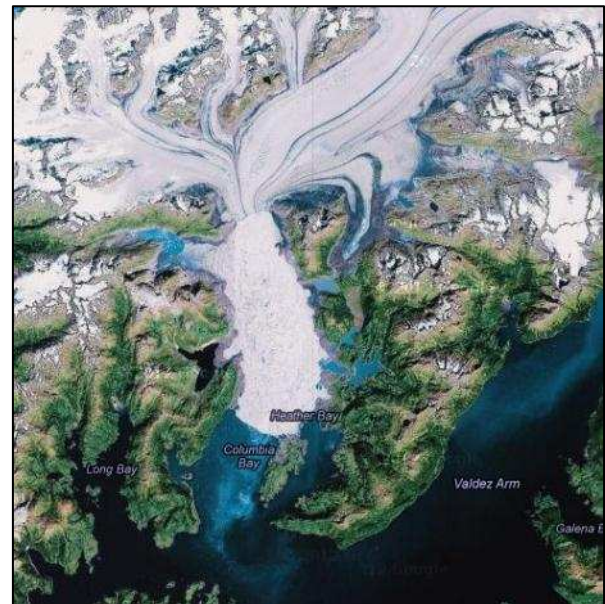


Fig.67: Columbia. Fuente: GoogleMaps

Este tipo de glaciares dan lugar a gran cantidad de icebergs por lo que cualquier variación en su comportamiento es seguida por especial interés, especialmente en las zonas próximas a grandes rutas de navegación.

Este glaciár ha perdido 396 m de espesor y se ha retirado un total de 15 km con una tasa promedio de aproximadamente 0,8 km por año desde 1982, con un máximo de casi 30 metros por día en 2001. Se descarga de unos 7 km<sup>3</sup> de témpanos de hielo al año. Los icebergs se mueven a una velocidad de 100 a 200 m por día a través de la bahía. En las próximas décadas se espera que pueda retroceder otros 15 km.

El Glaciar Columbia está perdiendo mas hielo en el parto y la fusión de lo que está recibiendo de las nevadas.



Fig.68 : Glaciar Columbia 1980.  
Fuente: USGS *Alaska glacier and snow program*.

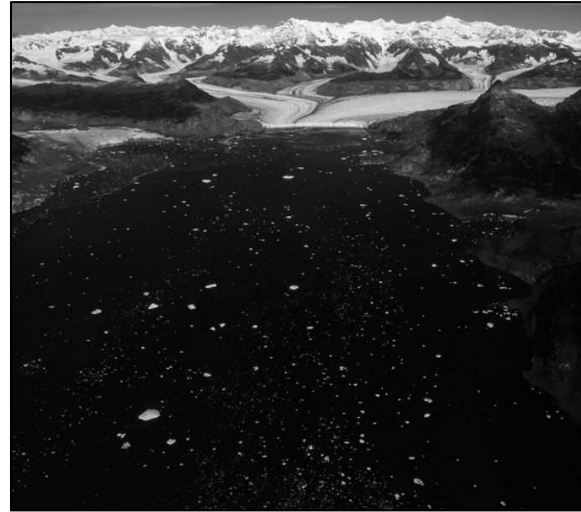


Fig.69 : Glaciar Columbia 2007.  
Fuente: USGS *Alaska glacier and snow program*.

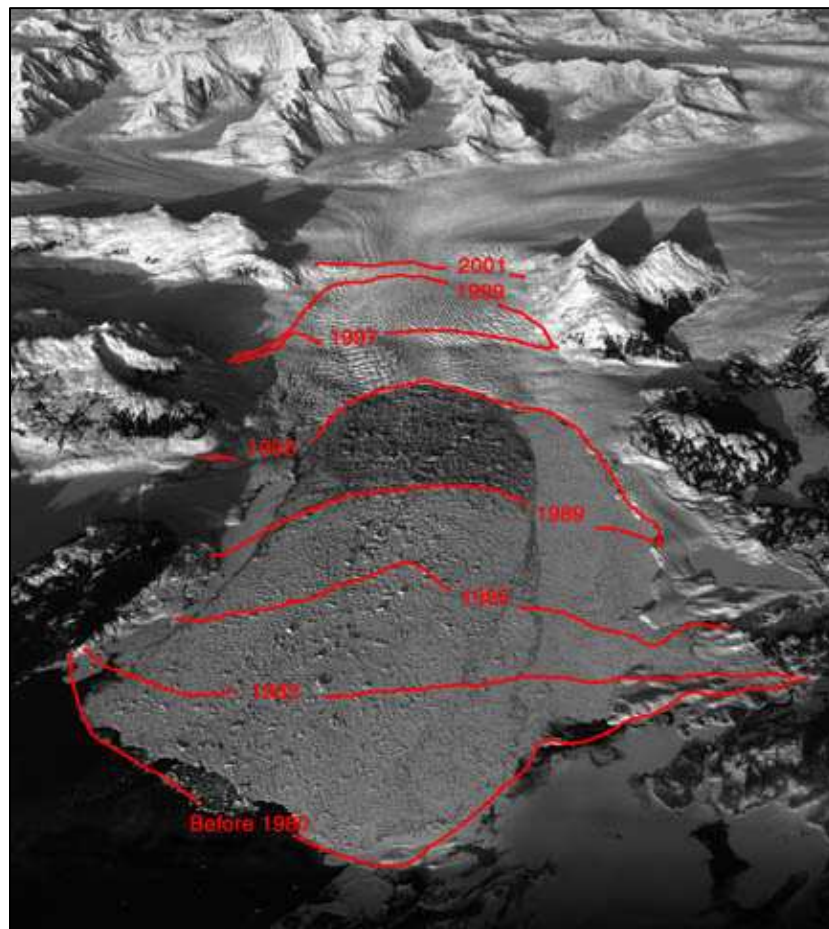


Fig.70: Historia del retroceso del Columbia (photo by R.M. Krimmel USGS). Fuente: *USGS Geologic Hazards Center*.

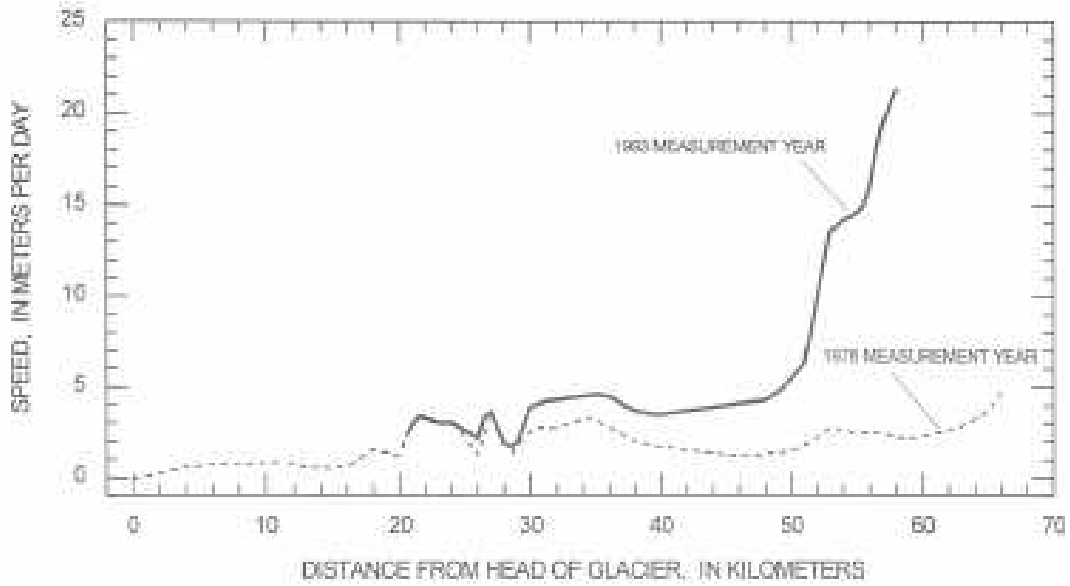


Fig. 71: Velocidad del hielo del Glaciar Columbia entre 1978 y 1993.  
Fuente: USGS Alaska glacier and snow Program.

Espesor de nieve en los años escogidos para el estudio.

Mes/año	Max(cm)	Media(cm)	Min(cm)	Mes/año	Max(cm)	Media(cm)	Min(cm)
01/1986	28	11	3	01/2010	25	17	10
02/1986	61	33	10	02/2010	20	12	3
03/1986	64	33	18	03/2010	64	30	3
04/1986	46	27	3	04/2010	30	11	3
05/1986	0	0	0	05/2010	0	0	0
06/1986	0	0	0	06/2010	0	0	0
07/1986	0	0	0	07/2010	0	0	0
08/1986	0	0	0	08/2010	0	0	0
09/1986	0	0	0	09/2010	0	0	0
10/1986	0	1	0	10/2010	20	18	5
11/1986	20	15	8	11/2010	10	8	3
12/1986	15	9	3	12/2010	30	18	10

Tabla 11: Tabla de la nieve acumulada para ambos años en centímetros. Registrada por la estación en Cordova, AK.



Fig. 72: Ubicación estación meteorológica de Cordova, AK.

### 5.4.2. Datos usados

Las dos imágenes encontradas con mejor visibilidad son Landsat 4-5 con sensor TM y se han descargado de la página de GLCF.

La imagen de la izquierda, Fig. 73, corresponde a la más antigua del 14 de Septiembre de 1986. La imagen de la derecha, Fig. 74, es la más actual, del 16 de Septiembre de 2010. Se combinan las bandas 2, 4, 7 para poder trabajar con ellas, y la 5 para poder realizar el NDSI.



Fig. 73: Imagen del glaciar Columbia del 14 de Septiembre de 1986.  
LT50670171986257XXX03.



Fig. 74: Imagen del glaciar Columbia del 16 de Septiembre de 2010.  
LT50670172010259GLC00.

### Fusión de Datos

Con esta técnica se pueden observar mejor los detalles de la imagen. Resulta muy útil como referencia en el momento de analizar o discriminar datos obtenidos después de los procedimientos.



Fig. 75: Imagen multispectral fusionada con la pancromática y su detalle ampliado.  
Referencia de la imagen: p067r017\_7f20020801\_z06\_ps742.

### 5.4.3. Tratamiento de la imagen

Una vez descargadas las imágenes se convierten de TIFF o GeoTIFF a IMG y se procede a hacer una combinación de bandas 247 RGB en 24 bits.

Se recortan las imágenes para delimitar la zona de estudio al glaciar y posteriormente se realiza la **expansión del contraste**, Fig. 76.

Se puede observar que el color amarillo intenso corresponde a la nieve reciente y el amarillo oscuro a zona de hielo glaciar.

A primera vista se aprecia que ha sufrido un gran retroceso entre el año 1986 y 2010.

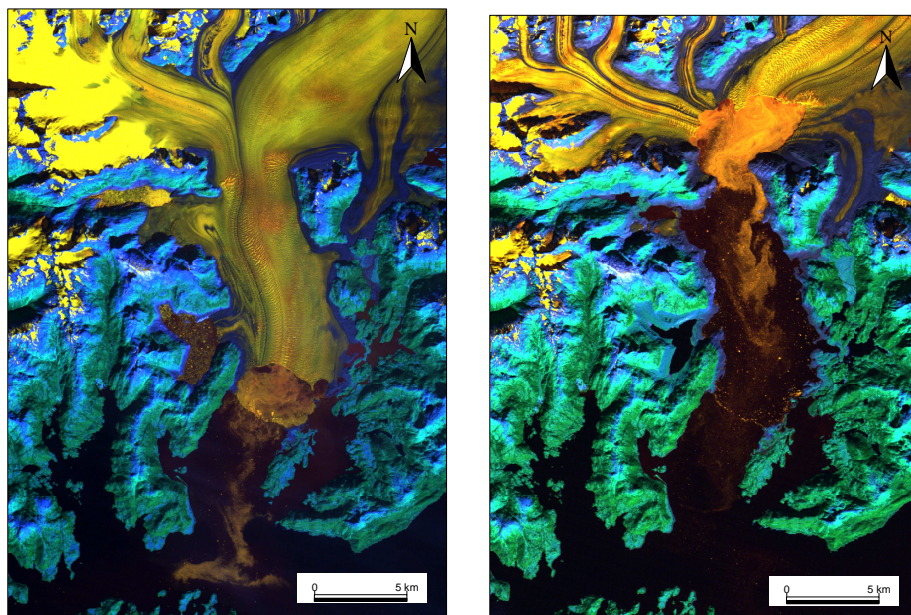


Fig.76: Combinación de bandas 247. Izquierda, Columbia 1986; derecha, Columbia 2010.

### NDSI (*Normalized Difference Snow Index*)

Primero se realiza el índice de nieve y se genera la imagen binaria y a continuación se aplica el **filtro de convolución** por criterio de Moda con tal de realzar geoméricamente la imagen binaria resultante, este filtro suaviza los resultados obtenidos tras una clasificación o agrupamiento de píxeles, consistiendo en escoger el valor más frecuente del grupo.

Se repite la misma operación para los dos años y así comparar el retroceso del glaciar.

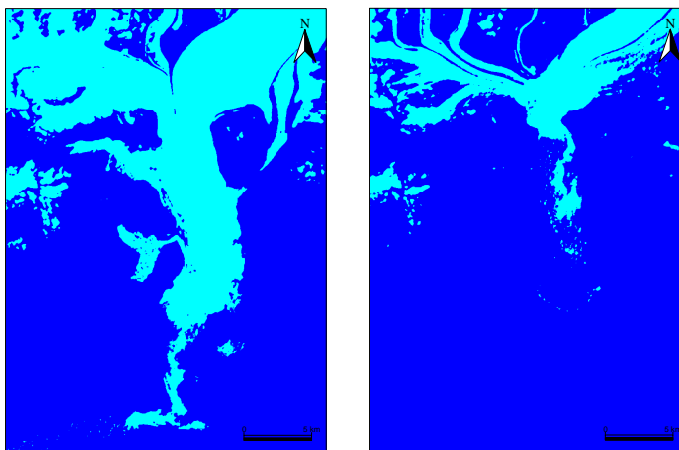


Fig. 77: Máscaras binarias resultado del NDSI. Izquierda, Columbia 1986; derecha, Columbia 2010.

Tras obtener las dos máscaras se realiza la **combinación analítica** con el fin de obtener la superficie y el retroceso entre las dos épocas. El valor de interés es el (1) y (0) de color verde que muestra la nieve desaparecida.

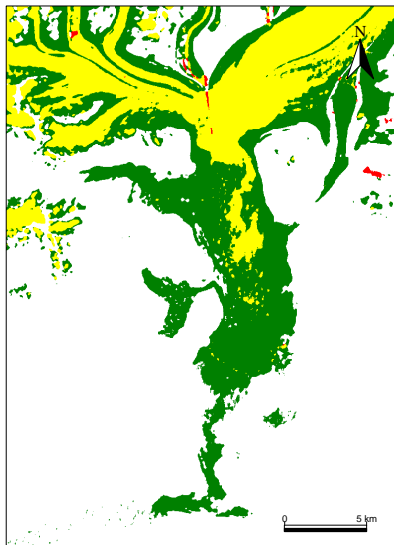


Fig. 78: Resultado tras aplicar la combinación analítica de capas.

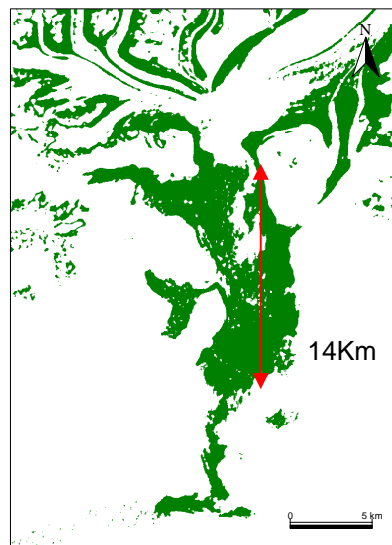


Fig. 79: superficie desaparecida del glaciar y el retroceso del

A continuación se han calculado las hectáreas para cada uno de los valores que se muestran en la Tabla 12, excepto para el (0),(0) que no interesa ya que es la zona de la imagen en la que nunca ha habido nieve ni hielo.

Valores		Representación	1986-2010
	(0), (1)	Incremento de Nieve	52 ha
	(1), (0)	Perdida de nieve	14.460,2 ha
	(1), (1)	Invariable	10.285,5 ha

Tabla 12: Resultados de la combinación analítica

Como la zona de interés es el frente del glaciar este se aísla dando como resultado un superficie perdida de 7491,3 ha y un retroceso de 14 km.

Se vectorizan las máscaras creadas para ambos años con tal de extraer la línea del perímetro del glaciar. Una vez superpuestas, Fig. 80, se puede observar qué zonas son las que han sufrido mayor retirada.

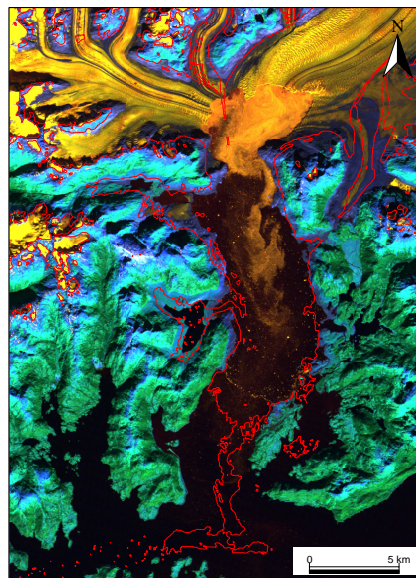
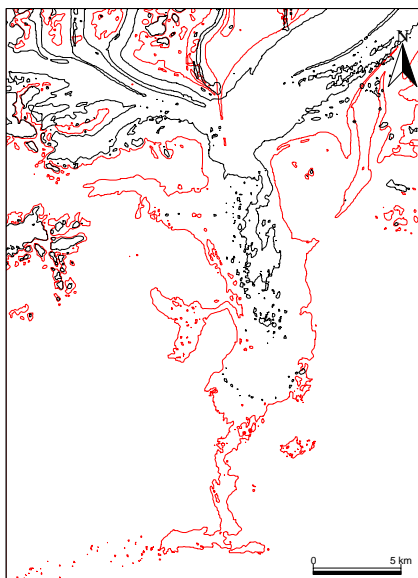


Fig.80:Izquierda, vectores superpuestos. 1986 en rojo y 2010 en negro. Derecha, Vector del 1986 sobre la combinación de bandas 247 del 2010.

## Clasificación no supervisada

Para realizar la clasificación no supervisada se ha hecho una resta de bandas, de cada año para que el resultado de la clasificación nos muestre los píxeles de la zona de glaciar desaparecido con un único valor.

En la Fig.81 se presentan los valores introducidos para conseguir la imagen clasificada.

En la Fig. 90 se aprecia el resultado donde los píxeles de color rojo y amarillo corresponden al glaciar y la nieve. Este resultado se desestima ya que no ha extraído la zona de glaciar desaparecido.

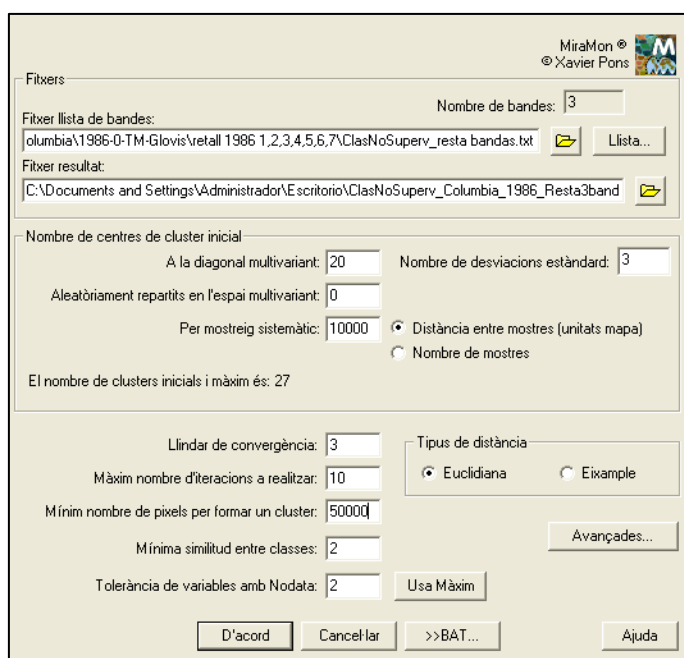


Fig. 81: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada

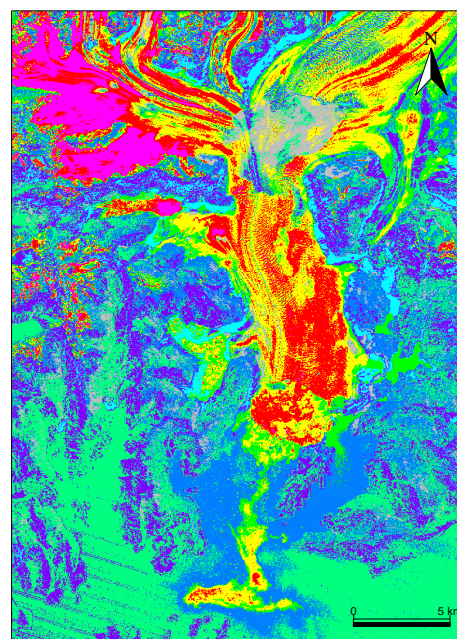


Fig. 90: Clasificación no supervisada

### 5.4.4. Resultados obtenidos

A simple vista es evidente que ha perdido una gran masa des del 1986 al 2010.

Los resultados del NDSI muestran que el glaciar a perdido 7491,3 ha y ha retrocedido 14 km desde 1986. Teniendo en cuenta que el periodo de estudio es de 24 años la velocidad aproximada es de 0,58 km al año.

En la clasificación no supervisada se desestima el resultado ya que no es el deseado para la extracción de la zona de glaciar desaparecido.

Según los datos obtenidos por el estudio de la **USGS Photogrammetric data set, 1957-2000, and bathymetric measurements for Columbia glacier, Alaska** el retroceso es de 15 km desde el 1982 con una velocidad de 0,8 km por año.

### 5.4.5. Datos glaciar: Bering

#### Características del glaciar:

Localización: al norte de Wrangell-St. Elias Parque Nacional y en el sur por el Golfo de Alaska.

Tipo: Tidewater glaciers.

Estado: Retroceso.

Origen: Campo de Hielo Bagley.

Latitud: 60°18'08"N.

Longitud: 143°25'11"W.

Altitud: 4000-5000 m.

Longitud: 190 km.

Ancho: 84.7km.

Grosor máximo: 800+/-m.

Superficie: 5175 km<sup>2</sup>.

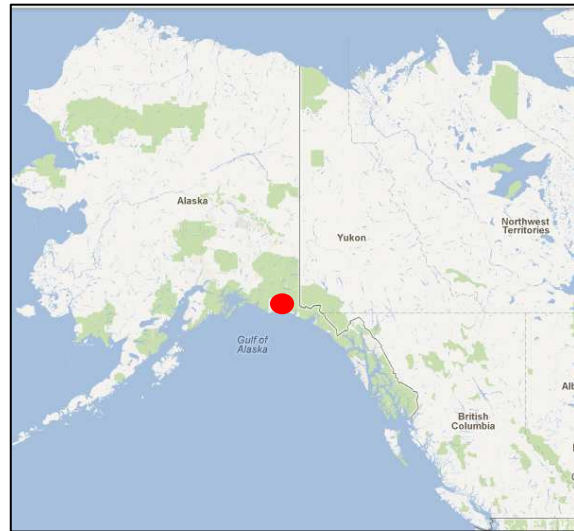


Fig. 91: Alaska. Fuente: Google Maps.

Glaciar Bering se encuentra en el estado de EE.UU. de Alaska. En la actualidad termina en el lago Vito al sur de Alaska Wrangell-St. Elias Parque Nacional, a unos 10 km desde el Golfo de Alaska.

El glaciar de Bering debe su nombre a Vitus Jonassen Bering (1681-1741), un explorador ártico famoso.

Bering es el glaciar más grande de América del Norte. Su superficie aproximada es de 5175 km<sup>2</sup> y su longitud de unos 190 km. Su superficie es un 6% de la superficie cubierta de hielo de Alaska y pueden contener un 15-20% de total de hielo de los glaciares de Alaska.



Fig. 92: Glaciar Bering. Fuente: GoogleMaps.

Debido a su ubicación y comportamiento, es un componente importante tanto para los ecosistemas marinos y terrestres del centro-sur de la costa de Alaska y la región del Golfo de Alaska.

Las temperaturas más cálidas y los cambios en las precipitaciones durante el siglo pasado han provocado el deshielo del glaciar. Desde 1900, el terminal se ha retirado hasta 12 km.

Este glaciar tiene periodos de avance y retroceso. A pesar de ello los avances son tan mínimos que se ha reducido en general. La mayoría de los glaciares a lo largo de la costa de Alaska han estado retrocediendo junto con el glaciar de Bering.

El retroceso glacial tiene un interesante efecto secundario, un aumento en la frecuencia de terremotos en la región. Las cadenas montañosas Wrangell y San Elias que se generan del glaciar Bering fueron creadas por la colisión de las placas tectónicas del Pacífico y de América del Norte. El peso de la gran cantidad de hielo en el glaciar de Bering es suficiente para deprimir la corteza terrestre.

A medida que este glaciar pierde masa está reduciendo mucho la presión sobre los bordes de las placas tectónicas que tiene debajo, lo cual se traduce en un aumento de terremotos en la región.



Científicos de la Michigan Tech Research Institute, en colaboración con Servicio Geológico de EE.UU. y los EE.UU. Oficina de Administración de Tierras han descubierto recientemente que el glaciar está liberando a unos 30 km<sup>3</sup> de agua al año, más del doble de la cantidad de agua en el todo el río Colorado.

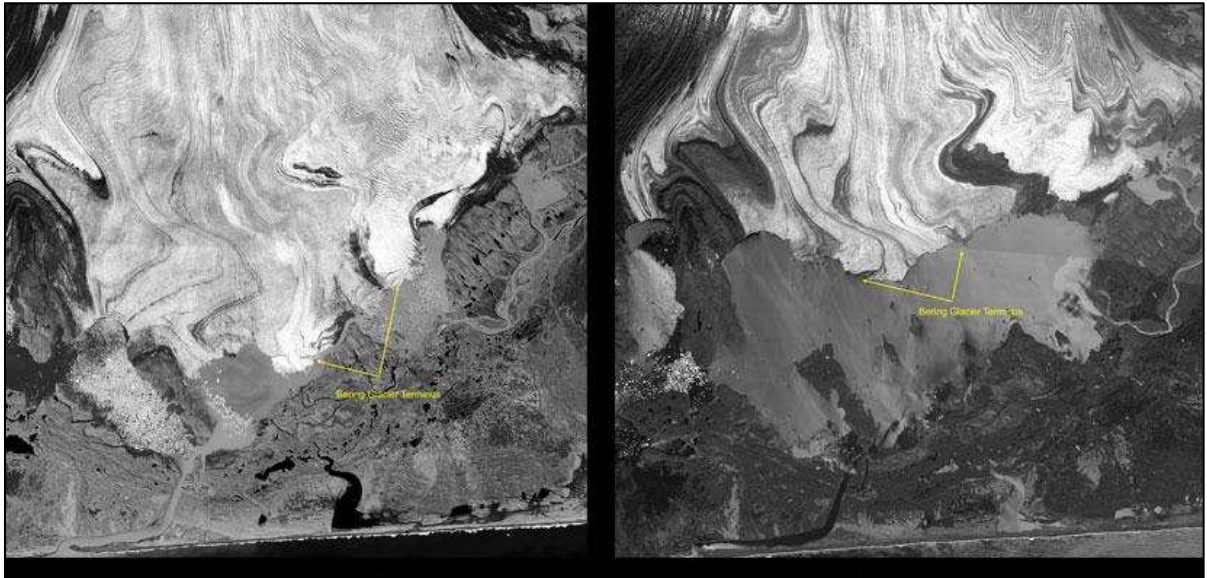


Fig. 93: Retroceso del glaciar. Izquierda 1996 y derecha 2005. Fuente: [www.news.discovery.com](http://www.news.discovery.com)

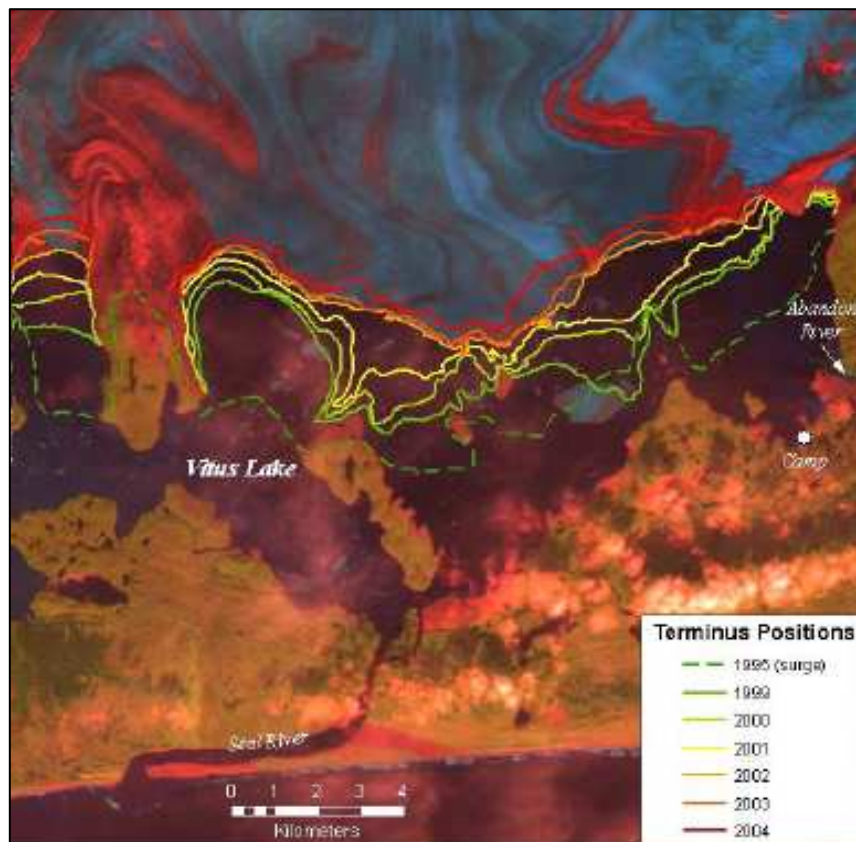


Fig. 94: Retroceso del glaciar entre 1995 y 2004.  
Fuente: [www.alaska.usgs.gov/geography/conference/presentations/Shuchman\\_Bering\\_CRSS.pdf](http://www.alaska.usgs.gov/geography/conference/presentations/Shuchman_Bering_CRSS.pdf).



Fig. 95: Frente glaciar Bering.  
 Fuente: [www.alaska.usgs.gov/geography/conference/presentations/Shuchman\\_Bering\\_CRSS.pdf](http://www.alaska.usgs.gov/geography/conference/presentations/Shuchman_Bering_CRSS.pdf).

Espesor de nieve en los años escogidos para el estudio.

Mes/año	Max(cm)	Media(cm)	Min(cm)	Mes/año	Max(cm)	Media(cm)	Min(cm)
01/1986	30	10	3	01/2010	33	10	3
02/1986	10	6	3	02/2010	10	5	3
03/1986	46	22	3	03/2010	38	23	5
04/1986	41	16	3	04/2010	3	1	0
05/1986	0	0	0	05/2010	0	0	0
06/1986	0	0	0	06/2010	0	0	0
07/1986	0	0	0	07/2010	0	0	0
08/1986	0	0	0	08/2010	0	0	0
09/1986	0	0	0	09/2010	0	0	0
10/1986	0	1	0	10/2010	20	18	5
11/1986	79	31	3	11/2010	13	2	0
12/1986	33	24	3	12/2010	41	7	0

Tabla13: Tablas que muestran la nieve acumulada para ambos años en centímetros. Registrada por la estación en Yakutat, AK.



Fig. 96: Ubicación estación meteorológica de Yakutat, AK.

#### 5.4.6. Datos usados

Las dos imágenes encontradas con mejor visibilidad son Landsat 4-5 con sensor TM y se han descargado de la página de GLCF.

La imagen de la izquierda, Fig. 97, corresponde a la más antigua del 14 de Septiembre de 1986.

La imagen de la derecha, Fig. 98, es la más actual, del 16 de Septiembre de 2010. Se combinan las bandas 2, 4, 7 para poder trabajar con ellas, y la 5 para poder realizar el NDSI.

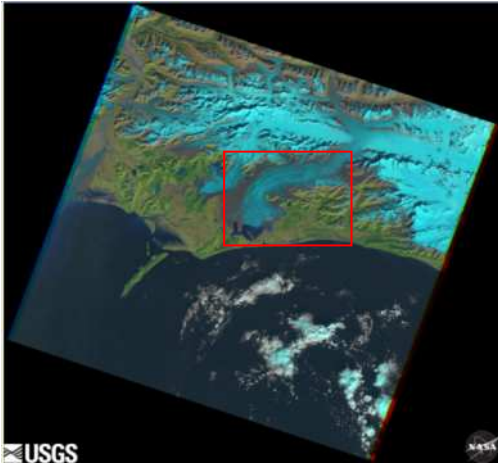


Fig. 97: Imagen del glaciar Bering del 25 de Septiembre de 1986.  
LT50640181986268XXX03.

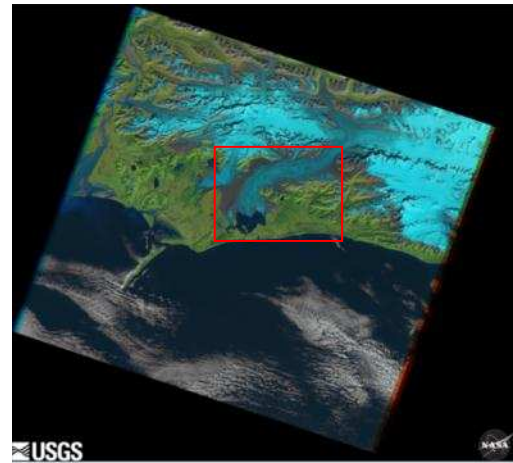


Fig. 98: Imagen del glaciar Bering del 11 de Septiembre de 2010.  
LT50640182010254GLC00.

#### Fusión de Datos

Con esta técnica se pueden observar mejor los detalles de la imagen. Resulta muy útil como referencia en el momento de analizar o discriminar datos obtenidos después de los procedimientos obtenidos.

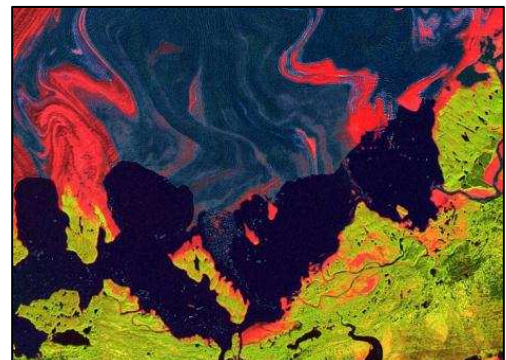
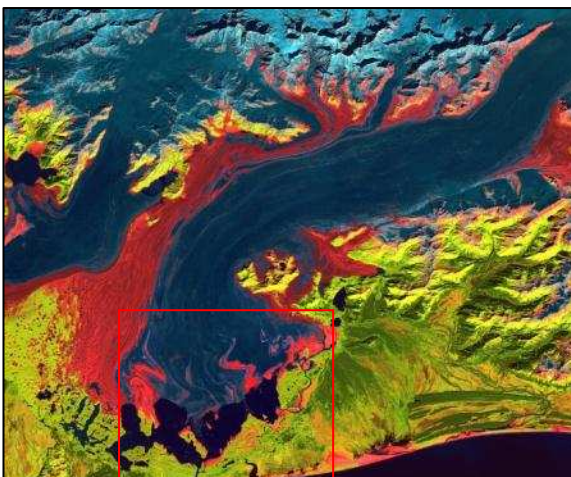


Fig. 99: Imagen multispectral fusionada con la pancromática y su detalle ampliado.  
Referencia de la imagen:p064r018\_7f20010910\_z06\_ps742.

### 5.4.7. Tratamiento de la imagen

Una vez descargadas se convierten de TIFF o GeoTIFF a IMG. Y se procede a hacer una combinación de bandas 247 RGB en 24 bits.

Se recorta la imagen para delimitar la zona de estudio al glaciar y posteriormente se realiza la expansión del contraste. Fig.100.

Se puede observar que el color amarillo intenso corresponde a la nieve reciente y el amarillo oscuro a zona de hielo glaciar.

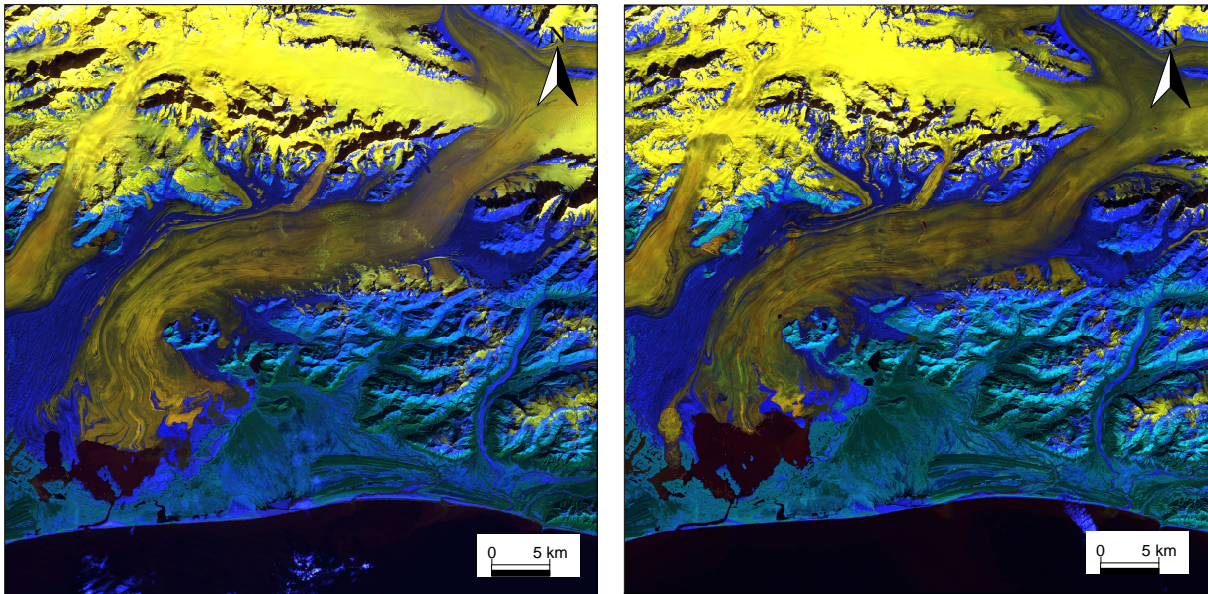


Fig. 100: Combinación de bandas 247. Izquierda, Bering 1986; derecha, Bering 2010.

### NDSI (*Normalized Difference Snow Index*)

Primero se realiza el índice de nieve y se genera la imagen binaria y a continuación se aplica el **filtro de convolución** por criterio de Moda con tal de realzar geoméricamente la imagen binaria resultante, este filtro suaviza los resultados obtenidos tras una clasificación o agrupamiento de píxeles, consistiendo en escoger el valor más frecuente del grupo. Se repite la misma operación para los dos años y así comparar el retroceso del glaciar.

El resultado no ha sido el esperado ya que al índice de nieve ha seleccionado píxeles del lago y estos no son validos para para la extracción de información. Tienen una signatura espectral muy parecida.

Al ser zonas donde el frente del glaciar desemboca en el agua, en este caso el lago Vitus, este contiene material en suspensión, como témpanos desprendidos del glaciar u otras propiedades con la misma respuesta espectral que el glaciar y como consecuencia se produce esta confusión.

Esta hipótesis es a partir de la fotointerpretación de las imágenes Landsat y otras imágenes obtenidas por fuentes externas, como la fig. 95 de la pagina 56, que ayudan a realizar conclusiones sobre lo que pasa en la zona de estudio sin un trabajo de campo previo.

Se ha escogido el NDWI *Normalized Difference Water Index* con las bandas 4 y 5 ya que el resultado si diferencia el glaciar del agua del lago.

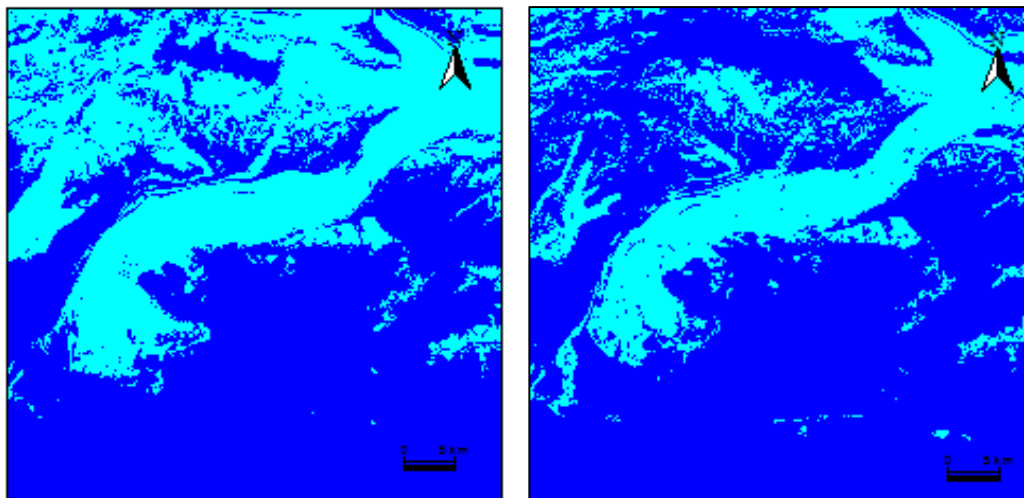


Fig. 101: Máscaras binarias resultado del NDSI. Izquierda, Bering 1986; Derecha, Bering 2010.

Tras obtener las dos máscaras se realiza la **combinación analítica** con el fin de obtener la superficie y el retroceso entre las dos épocas. El valor de interés es el (1),(0) de color verde que muestra la nieve desaparecida.

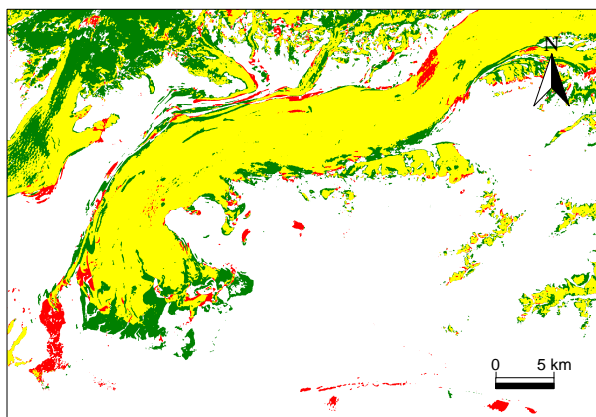


Fig.102: Resultado tras aplicar la Combinación Analítica de Capas.

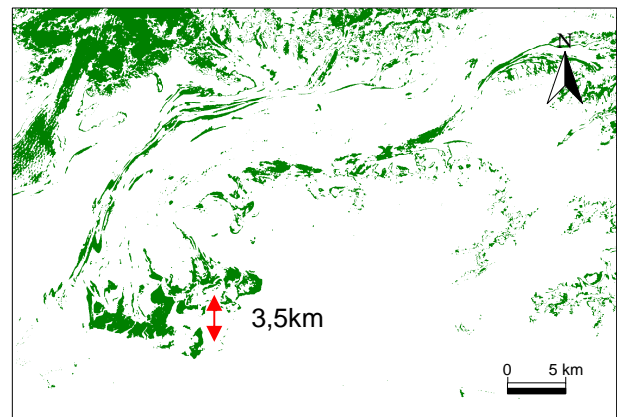


Fig. 103: Superficie desaparecida del glaciar y el retroceso del frente.

A continuación se han calculado las hectáreas para cada uno de los valores que se muestran en la Tabla 14, excepto para el (0),(0) que no interesa ya que es la zona de la imagen en la que nunca ha habido nieve ni hielo.

Valores	Representación	1986-2010
(0), (1)	Incremento de Nieve	9.862,9 ha
(1), (0)	Perdida de nieve	46.346,9 ha
(1), (1)	Invariable	95.954,7 ha

Tabla 14: Resultados de la combinación analítica.

Como la zona de interés es el frente del glaciar este se aísla dando como resultado un superficie de 4946,9 ha y un retroceso de 3,5 km.

A partir de las máscaras creadas para ambos años se vectorizan con tal de extraer la línea del perímetro del glaciar. Una vez superpuestas, Fig.104, se puede observar qué zonas son las que han sufrido mayor retirada.

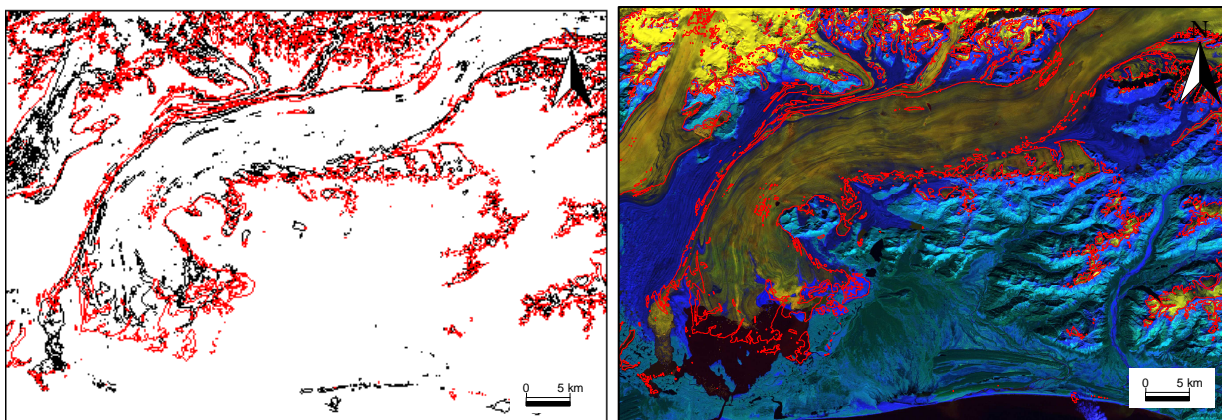


Fig. 104: Izquierda, vectores superpuestos. 1986 en rojo y 2010 en negro. Derecha, vector del 1986 sobre la combinación de bandas 247 del 2010.

### Clasificación no supervisada

Para realizar la clasificación se ha hecho una resta de bandas de cada año para que el resultado de la clasificación nos muestre los pixels de la zona de glaciar perdido con un único valor.

En la Fig. 105 se presentan los valores introducidos para conseguir la imagen clasificada y en la Fig. 106 el resultado de esta donde la zona que es de interés es de color verde azulado. En la Fig. 107 hay el detalle de la zona del frente glaciar.

El glaciar en 24 años ha retrocedido unos 3,5 km aproximadamente, es una media ya que en algunas zonas ha retroceso varia y la superficie desaparecida es de 4846,1ha.

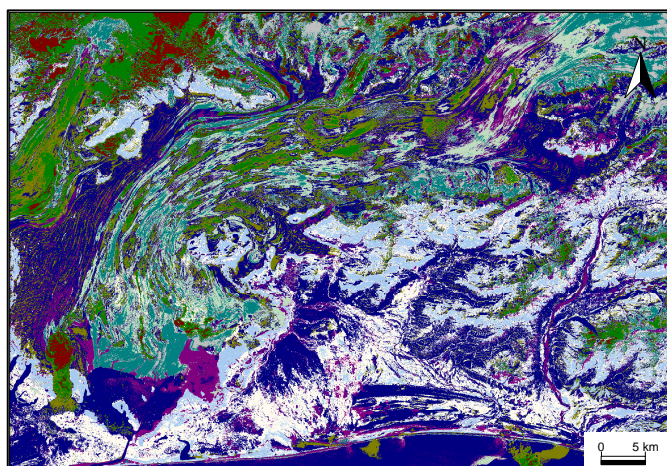
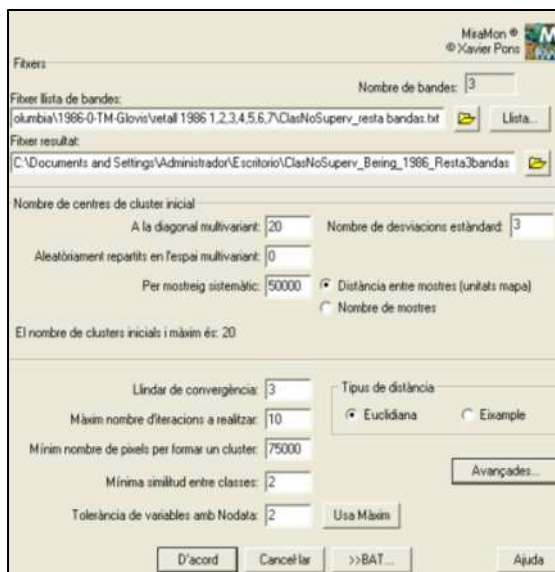


Fig. 106: Clasificación no supervisada

Fig.105: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada.

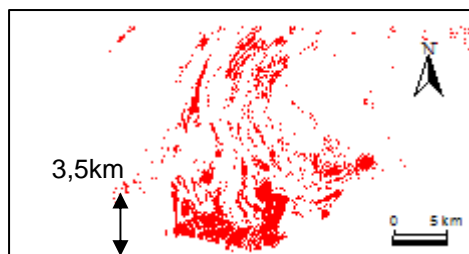


Fig. 107: Mascara de la superficie desaparecida, detalle del frente desaparecido.

#### 5.4.8. Resultados obtenidos

Tanto en el NDSI como en la clasificación no supervisada el glaciar ha retrocedido unos 3,5 km aproximadamente y en cuanto a superficie no hay mucha diferencia entre el resultado del NDSI 4946.9 ha y el de la clasificación no supervisada 4846,1ha.

Según datos encontrados en el libro *Bering Glacier: Interdisciplinary Studies of Earth's Largest Temperate Surging Glacier* editado por Robert A. Shuchman y diferentes artículos de la misma persona en la página web de [www.beringglacier.org](http://www.beringglacier.org) que pertenece a USGS el retroceso es de 4 km.

### 5.5. Glaciar Helheim

#### 5.5.1. Datos del glaciar

##### Groenlandia

Groenlandia es una gran isla de unos 2.000.000 km<sup>2</sup> situada en el Atlántico Norte al este de Canadá, aunque políticamente pertenece a Dinamarca. Sus costas son recortadas, rocosas y llenas de fiordos e islotes. En ellas se concentra la escasa población de la isla, pues aquí se localizan los únicos territorios libres de hielo.

Excepto pequeños sectores de la costa sur y suroeste, se encuentra cubierta por grandes masas de hielo que en su zona central alcanza más de 1000 m de espesor. De ella parten numerosas lenguas de hielo, algunas de las cuales alcanzan el océano desembocando en fondos de fiordos, mientras otros se funden antes de llegar al mar, generando ríos de corto recorrido pero de caudal abundante en los meses estivales. En esta inmensa superficie de hielo afloran algunas zonas montañosas cuyas elevadas cumbres destacan entre ella, especialmente en la zona oriental.

Algunos de los glaciares de Groenlandia se están moviendo en torno a un 30% entre 2000 y 2011 más deprisa que hace 10 años, contribuyendo a la subida del nivel del mar en todo el mundo. Cuanto más deprisa se mueven, mayor es la cantidad de agua que aportan y por tanto mayor el incremento del nivel del mar aunque no todos los glaciares se mueven al mismo ritmo.

Los glaciares interiores sin salida directa al mar registran velocidades máximas de entre 9 y 99m al año, mientras que los que terminan en un océano pueden llegar a desplazarse 11,2 km anuales.

Los satélites han mostrado que los glaciares situados al este, sudeste y noroeste de la isla, que son más de 200 glaciares, son los más rápidos.

Groenlandia contiene aproximadamente un 10% del agua dulce del mundo.



Fig. 108: Groenlandia. Fuente: Google Maps.



Fig. 109: Helheim. Fuente: Google Maps.

El glaciar escogido en Groenlandia es el glaciar Helheim por ser uno de los más representativos, aunque hay dos más de gran relevancia que están en una misma situación: el Jakobshavn y el Kangerdlugssuaq.

## Glaciar Helheim

### Características del glaciar:

Localización: Sur este de Groenlandia, Sermersooq.

Tipo: Corriente de hielo.

Estado: Retroceso.

Latitud: 66.4°N

Longitud: 38°W

Longitud: 190 km.

Ancho: 84.7km.

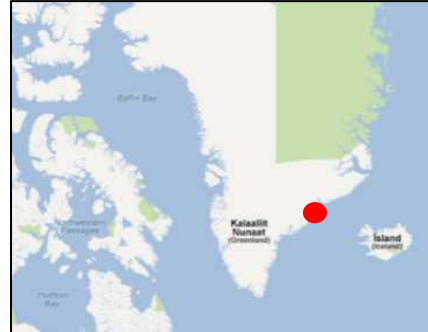


Fig. 110: Groenlandia.  
Fuente: Google Maps.

El glaciar Helheim se ubica a través de una grieta estrecha en la cordillera de la costa y hacia abajo en el mar a una velocidad de varios kilómetros por año. Desde la década de 1970 hasta alrededor de 2001, la posición del frente del glaciar a cambiado muy poco. Sin embargo, entre 2000 y 2005, el frente se retiró unos 5 km. Entre 2001 y 2003, el glaciar también se adelgazó hasta 40 metros.

La causa más probable subyacente de estos cambios es el aumento de las temperaturas del aire y el agua en el área del sur de Groenlandia. Sin embargo, el estudio también identifica una relación entre la parte frontal retirada de glaciares tales como Helheim y un aumento en la tasa de flujo (como la parte delantera de los retiros glaciar que ofrece menos resistencia al movimiento del glaciar). Las interacciones dinámicas de temperatura, tipos de glaciares de flujo y el espesor del hielo complican la modelación de los cambios futuros en la capa de hielo de Groenlandia. Estos procesos es probable que continúen vigentes para acelerar en escenarios de cambio climático.

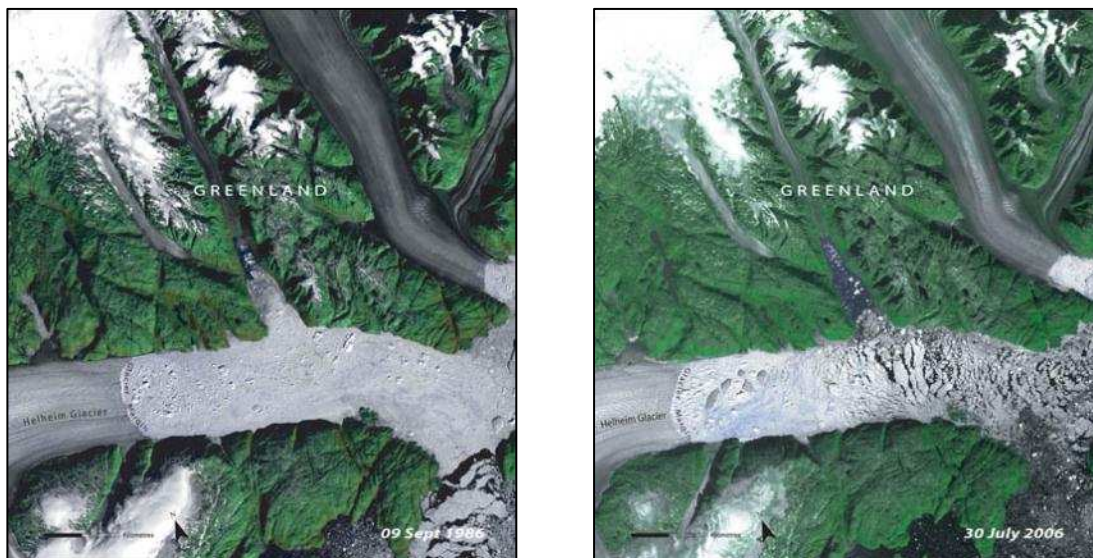


Fig. 111: Imagen derecha, retroceso glaciar Helheim del 09 de Septiembre del 1986 (Landsat); Imagen izquierda del 30 de Julio de 2006 (ASTER). Fuente: United Nations Environment Programme Global Resource Information Database.



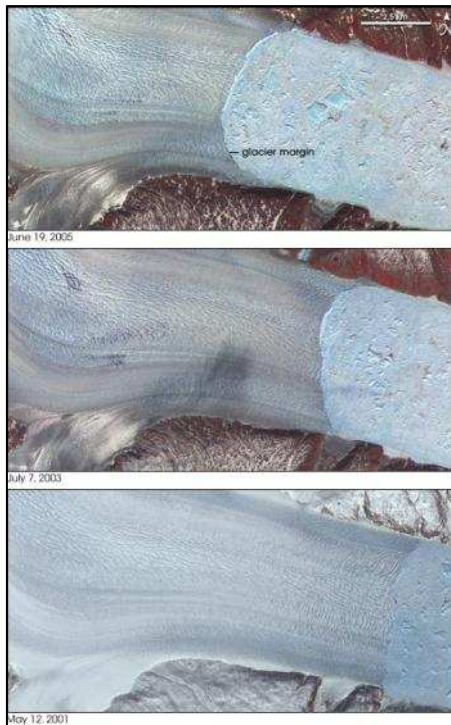


Fig. 112: Retroceso del glaciar Helheim entre el 2001 y 2005. Fuente: www.eoearth.org

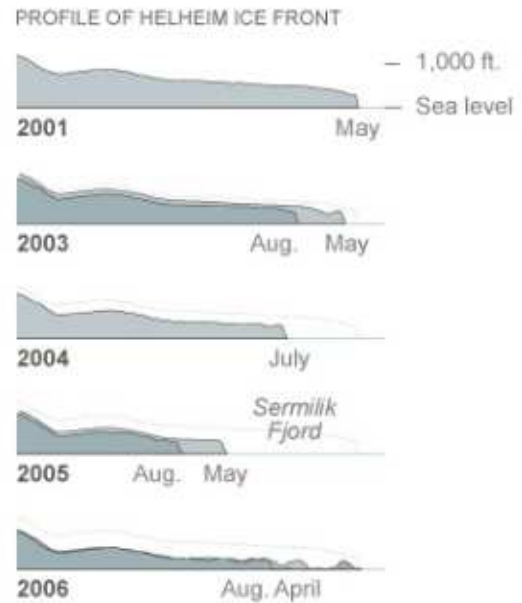


Fig. 113: Retroceso del glaciar Helheim. Fuente: www.eoearth.org

### 5.5.2. Datos usados

La imagen más antigua con mejor visibilidad encontrada corresponde a una imagen Landsat L7 ETM+ SCL-on, del 12 de Julio de 1999, Fig.114. La imagen más actual corresponde a una imagen Landsat L7 ETM+ SCL-off, 10 de Julio de 2010, Fig.115. En esta última Landsat tuvo un fallo técnico y desde mayo de 2003 las imágenes en estas bandas aparecen con zonas sin información. Es un problema conocido como SCL-off. Los efectos SCL-off son más pronunciados a lo largo del borde de la escena y disminuyen gradualmente hacia el centro de la escena. La pérdida de datos es pequeña, y esta región de cada imagen es muy similar en calidad a la anterior ("SLC-on"). Ambas son imágenes Landsat descargadas de la página de GLCF.



Fig. 114: Imagen del glaciar Helheim del 12 de Julio de 1999. LE72320131999193SGS02.

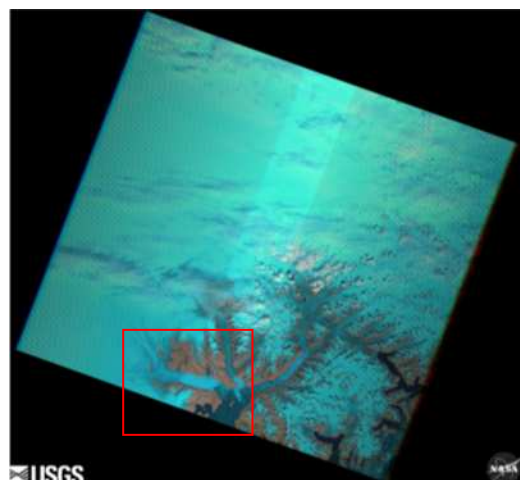


Fig. 115: Imagen del glaciar Helheim del 10 de Julio de 2010. LE72320132010191EDC00.

## Fusión de Datos

Con esta técnica se pueden observar mejor los detalles de la imagen. Resulta muy útil como referencia en el momento de analizar o discriminar datos obtenidos después de los procedimientos obtenidos.

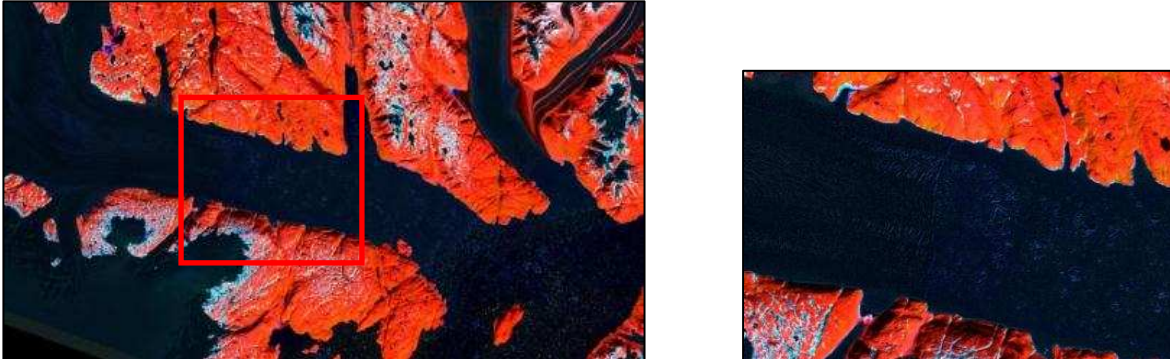


Fig 116: Imagen fusionada con la pancromática y su detalle ampliado. Referencia de la imagen: p232r013\_7f20010802\_z24\_ps742

### 5.5.3 Tratamiento de la imagen

Una vez descargadas se convierten de TIFF o GeoTIFF a IMG. Y se procede a hacer una combinación de bandas 247 RGB en 24 bits.

Se recorta la imagen para delimitar la zona de estudio al glaciar y posteriormente se realiza la expansión del contraste, Fig 117.

Se puede observar que el color amarillo intenso corresponde a la nieve y el más oscuro al hielo glaciar.

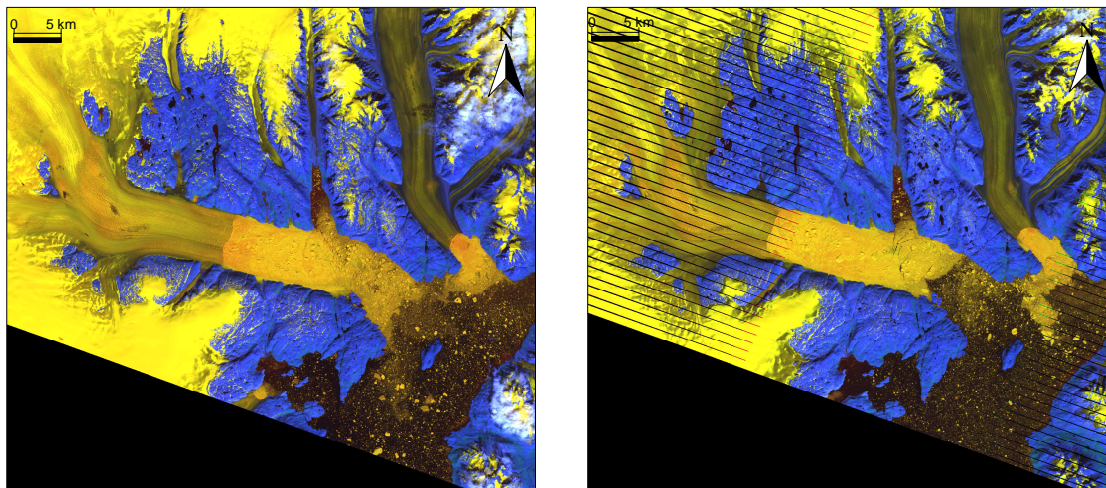


Fig. 117: Combinación de bandas 247. Izquierda, Columbia 1986; Derecha, Columbia 2010.

### NDSI (*Normalized Difference Snow Index*)

Primero se realiza el índice de nieve y se aplica un **filtro selectivo** para poder corregir las zonas sin información, NODATA, provocadas por el SCL-off. Una vez seleccionados los píxeles se genera la imagen binaria.

Este resultado se desestima ya que este índice no diferencia la zona de deshielo desprendida del glaciar por tener una respuesta espectral igual al glaciar y crea confusión

para delimitar el inicio del frente, Fig. 119. En la zona de deshielo se encuentran témpanos y agua congelada y esta no deben considerarse como glaciar ya que de esta manera no se puede obtener el retroceso.

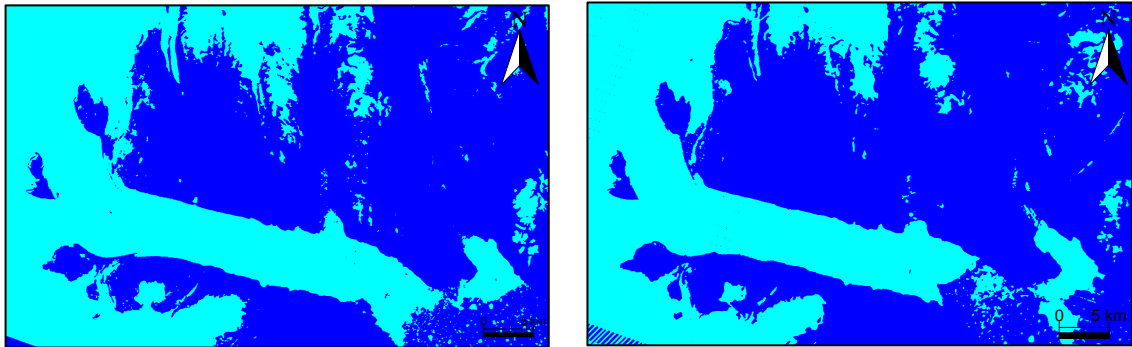


Fig. 118: Máscaras binarias resultado del NDSI. Izquierda, Columbia 1986; derecha, Columbia

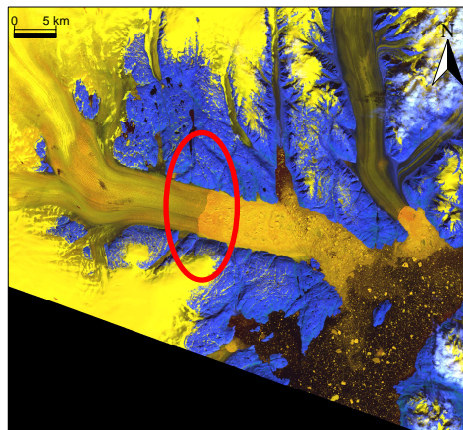


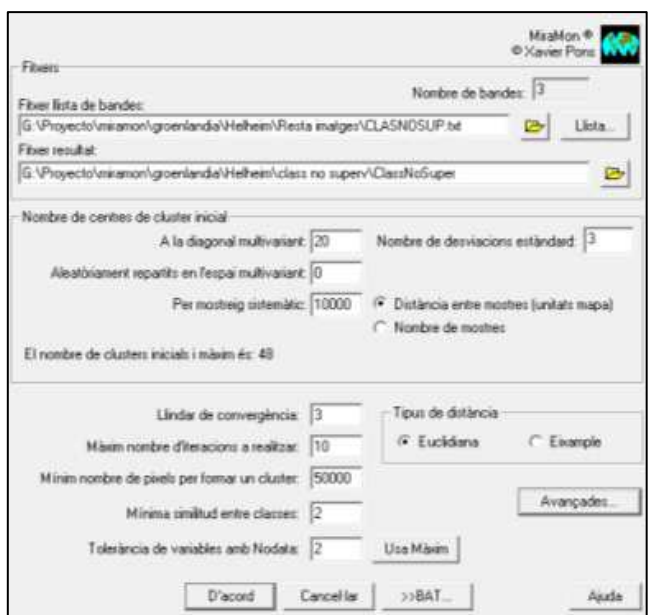
Fig. 119: Combinación de bandas 247 donde se muestra el límite donde se encuentra el frente del glaciar con la zona de deshielo.

### Clasificación no supervisada

Para realizar la clasificación se restan las bandas de cada año para que el resultado de la clasificación nos muestre los píxeles de la zona de glaciar desaparecido con un único valor.

En la Fig. 120 se presentan los valores introducidos para conseguir la imagen clasificada. En la Fig. 121 se aprecia en color rojo los píxeles que corresponden al glaciar perdido.

Fig.120: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada.



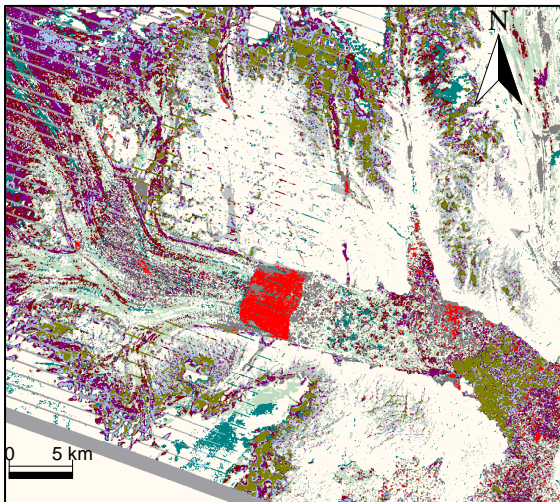


Fig. 121: Pantalla con el detalle de los parámetros de cálculo para la clasificación no supervisada.

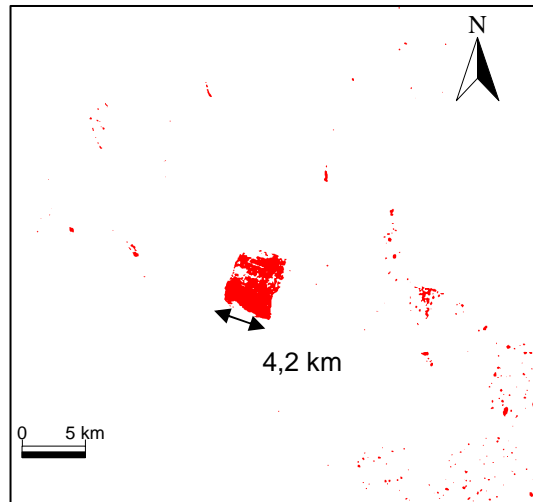


Fig.122: Clasificación no supervisada.

El glaciar en 11 años ha retrocedido unos 4,2 km aproximadamente y la superficie desaparecida es de 2178,3ha.

#### 5.5.4. Resultados obtenidos

El resultado del NDSI no ha sido el más indicado ya que no diferencia el frente del glaciar de la zona de deshielo desprendida por este, por lo que no es posible calcular el retroceso.

Los resultados de la Clasificación no supervisada, gracias a la resta de bandas de los dos años, muestra en color rojo la zona de retroceso siendo esta de 2178,3ha y 4,2km de distancia.

Según datos encontrados en la revista científica *Geophysical Research Cartas de Ian Howat, Joughin I., Tulaczyk S. y S. Gogineni* y *the Geological Survey of Denmark and Greenland – GEUS* el retroceso es de 5 km desde el 2000 al 2005 y con una velocidad de 1,25 km por año.

## 5.6. Resultados

Los análisis realizados han permitido cuantificar los cambios experimentados en el frente del glaciar tanto en longitud como en superficie, a partir la aplicación de Índices de Nieve (NDSI) y agua, (NDWI), la creación de máscaras, extracción del perímetro y la clasificación no supervisada a partir de la resta de bandas de los dos años de análisis. Estos métodos han permitido comprobar los glaciares sufre un retroceso o un aumento.

La aplicación del filtro de convolución ha ayudado a homogeneizar imágenes en que la dispersión de los píxeles dificultaba la delimitación de los frentes para su análisis.

Con Aletsch y Upsala, se lograron resultados satisfactorios con ambos métodos, en cambio, con Mer de Glace únicamente con la clasificación no supervisada puesto que sus resultados son más próximos a los datos de la fuente con que se comparan.

Para los glaciares de Alaska la aplicación del NDSI ha sido óptima en el Columbia aunque para el Bering se ha desestimado por dar mejores resultados el NDWI. Este índice a permitido diferenciar el glaciar de las zonas del lago helado y los témpanos desprendidos de este.

En el glaciar de Groenlandia Helheim el NDSI no diferenciaba la zona de deshielo desprendida del glaciar de este, por tener una respuesta espectral igual.

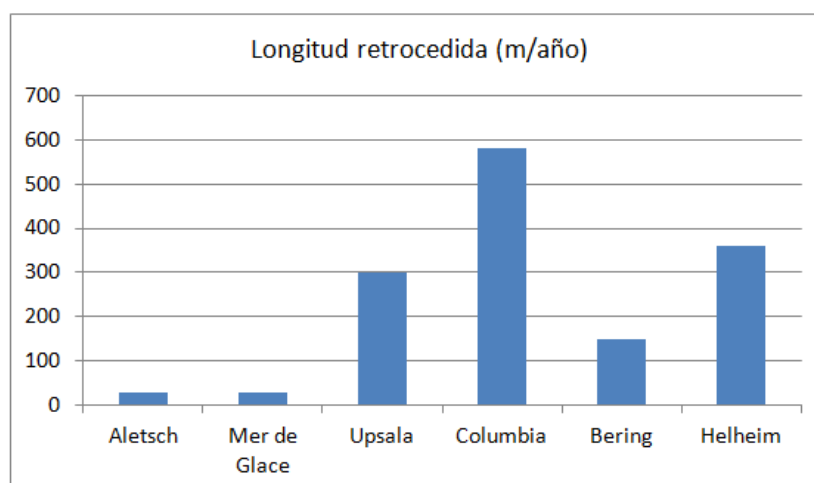
La clasificación no supervisada ha sido satisfactoria para el Bering y Helheim pero no para el Columbia ya que no ha extraído la zona de glaciar desaparecido.

El Columbia y el Bering al tratarse de un tipo de glaciares llamados Tidewater, que desembocan en el mar o un lago muchas veces congelado, y que al encontrarse en zonas de latitud elevada el agua aparece congelada dando una respuesta espectral que creaba confusión, dificultando así, el trazado de una línea fronteriza con el frente del glaciar.

Los análisis han permitido comprobar el aceleramiento en su retroceso al haberse escogido fechas que abarcan un rango de hace dos décadas hasta la actualidad.

Las tablas recopilan todos los glaciares analizados para comparar entre ellos y tener una visión más general sobre la longitud y volumen retrocedido concretamente en frentes de los seis glaciares.

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos por cada glaciar unificándolos en gráficas:



## CAPITULO 6 – CONCLUSIONES

La intención de este proyecto ha sido realizar un análisis con técnicas de Teledetección sobre los glaciares más representativos del mundo, seleccionando aquellos que mostraban mayores evidencias de un retroceso, de ésta forma las comparaciones temporales resultarían más patentes. Por otro lado también el propósito del mismo ha sido la evaluación y descarte de diferentes técnicas, llegando a encontrar la más satisfactoria.

La cobertura de nieve posee una signatura espectral que la diferencia muy bien sobre otras superficies. Ello implica probar diferentes métodos para buscar el procedimiento más indicado y que mejor seleccione todos aquellos pixeles pertenecientes al glaciar. En las máscaras creadas siempre se ha buscado obtener las selecciones lo más fielmente posibles al perímetro del glaciar retrocedido.

Se han elegido imágenes, gráficos y datos dentro de los requisitos, creando un muestreo con una diferencia de época lo más amplia posible, según lo permitieran las imágenes a veces afectadas por elementos externos, todo ello a partir de imágenes Landsat. Con todos estos datos hemos obteniendo resultados espaciales del retroceso de cada glaciar estudiado, cómo volúmenes de pérdida de masa, todo ello recogido en el capítulo individual de cada glaciar

El método usado, con el que mejores resultados se han obtenido ha sido con el *Normalized Difference Snow Index*, sacando medidas muy representativas, sin embargo en algún glaciar, concretamente el glaciar Bering, este método no ha respondido satisfactoriamente sobre sus características espectrales. Así mismo, se comprobó cómo aplicando el *Normalized Difference Water Index* se obtenían resultados más aceptables.

En un principio de este trabajo se aplicó la transformación *Tasseled Cap*, pero se desestimó ya que es una técnica que pone más en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación que en cualquier otra cobertura, sin que se obtuvieran tan buenos resultados como con la Clasificación No Supervisada o los Índices de Nieve o Agua.

También el uso de los programas Miramon y Envi han sido satisfactorios, ya que se complementaban con sus diferentes aplicaciones y prestaciones, ampliando así, los conocimientos que se tenían *a priori*.

Después de realizar este proyecto, se es más consciente de los delicados comportamientos de los glaciares, resultando un claro indicador del estado del medio ambiente. Son extremadamente vulnerables a los cambios producidos acelerándose por la actividad humana y son un buen indicador para poder comprobar los efectos del calentamiento global. En poco tiempo han experimentado un claro retroceso acelerándose en las últimas décadas, y cómo se ha comprobado tanto en nuestros resultados, cómo en algunos estudios sobre el tema.

Sí que es cierto que este retroceso es un proceso natural, pero está acelerado en mayor o menor grado por la actividad humana, que entre otros efectos provoca, una reducción del porcentaje de albedo, que cada vez reflejaría menos radiación solar, conllevando un aumento de las temperatura que haría acelerando la desaparición de la criosfera. Igualmente, hay que tener en cuenta que la nieve es la superficie terrestre que tiene más porcentaje de albedo.

Cabe destacar la dificultad en la disponibilidad de datos temporales en cuestiones de glaciología, muchos no son coherentes y otros no accesibles por el usuario. Se han usado las imágenes más nítidas, intentando una diferencia temporal considerable con el fin de tener una visión más amplia del retroceso. También, se han escogido las imágenes en época cálida correspondiente al hemisferio donde se encuentra cada glaciar con el fin de obtener los mejores perímetros de nieve.

Con la confección de este trabajo se ha querido aportar más datos en el ámbito de la glaciología remota, concretamente con el óptico, campo aun con pocos estudios realizados o a disposición de ser consultados. Se pone de manifiesto la utilidad de la observación remota en la superficie terrestre con imágenes satelitales de suficiente resolución para el ámbito medioambiental. Esto ha constituido una herramienta precisa de medición en el monitoreo de los cambios presentes y futuros.

## **RECOMENDACIONES**

Para líneas de estudio futuras sería muy aconsejable incluir el uso de imágenes SAR, tanto desde satélite como desde avión, de las zonas de los glaciares por sus ventajas inherentes de poder ser tomadas tanto de día como de noche así como su independencia de la cobertura nubosa. El SAR permite la monitorización a largo período de los efectos del cambio climático en los glaciares de difícil acceso para el uso de los métodos tradicionales en glaciología y con ello la capacidad de detectar y comprender la variabilidad natural y predecir tendencias.

En resumen, SAR es un instrumento dando información única y complementaria a los sensores ópticos, especialmente por su independencia de las condiciones atmosféricas y del día y de la noche.

## BIBLIOGRAFÍA

Chuvieco Salinero, E. (2008, 3ª Ed.), Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio, Ed. Ariel Ciencia, Barcelona.

Jähne, B. (1997), Digital Image Processing. Concepts, Algorithms, and Scientific Applications, 4th. Ed., Germany.

Acharya, T., Ray, A.K. (2005), Image Processing. Principles and Applications, Editors A. Odgaard, Hoboken : John Wiley & Sons, Cop, U.S.A.

Jensen, J.R. (2000), Remote Sensing of the Environment. An earth Resource Perspective, Upper Saddle River : Prentice Hall, New Jersey.

Pellikka, P., Rees, G. (2010), Remote sensing of glaciers : Techniques for Topographic, Spatial, and Thematic Mapping of Glaciers, CRC Press, Boca Raton.

Casparian, E.L., 2011. The evolution of the Mer de Glace glacier. *Cinq Continents* 1 (2): 118-132 [En línea]. -2012- [http://www.cinqcontinents.uv.ro/1/1\\_2\\_Casparian.pdf](http://www.cinqcontinents.uv.ro/1/1_2_Casparian.pdf)

Hokkaido University Patagonia Project Committee, Hyoga to iwa to mori no kuni (in Japanese) (the country of the glaciers, rocks and forests), Hokkaido University Press, 1974 ) [En línea]. -1012- <http://www.eorc.jaxa.jp/en/imgdata/topics/2008/tp080903.html>

ESDI Earth Science Data Interface [En línea]. - 2011- <http://glcfapp.glc.f.umd.edu>

USGS Global Visualization Viewer [En línea]. - 2011- <http://glovis.usgs.gov>

USGS EarthExplorer [En línea]. - 2011- <http://earthexplorer.usgs.gov>

USGS Water Resources of Alaska [En línea]. - 2012- <http://ak.water.usgs.gov>

USGS Photogrammetric Data set, 1957-2000, and Bathymetric Measurements for Columbia Glacier, Alaska [En línea]. - 2012- <http://pubs.usgs.gov>

ESDI Earth Science Data Interface [En línea]. - 2010- <http://glcfapp.glc.f.umd.edu>

NASA Earth Observatory [En línea]. -2012- <http://earthobservatory.nasa.gov>

JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency [En línea]. -1012- <http://www.jaxa.jp>

The Bering Glacier [En línea]. -1012- [www.beringglacier.gov](http://www.beringglacier.gov)

GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space [En línea]. -1011- <http://www.glims.org>

LGGE Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement [En línea]. -1011- <http://lgge.osug.fr>

GLACIOCLIM Service d'Observation [En línea]. -1011- <http://www-lgge.ujf-grenoble.fr>

VAW Swiss Glacier Monitoring Network [En línea]. -1011- <http://glaciology.ethz.ch>

ETH Swiss Federal Institute of Technology, Zurich [En línea]. -1011 <http://www.ethz.ch>



## **AGRADECIMIENTOS**

Deseamos expresar nuestro agradecimiento primeramente a Juan José Martínez Benjamín por tutorizarnos nuestro proyecto.

Igualmente agradecer a Gerard Moré Gómez, del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM, por toda la ayuda recibida a lo largo de la realización de este proyecto y por los nuevos conocimientos enseñados sobre Miramon.

A Jordi Corbera, del Programa Català d'Observació de la Terra (PCOT), por el interés mostrado en este proyecto y su disposición en ayudarnos.

A Stephan Bader, del Federal Department of Home Affairs FDHA-Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW) dentro del Swiss Institute of Technology in Zurich (ETH) Zurich, por los datos facilitados sobre el glaciar Aletsch.

A Delphine Six, del Service d'Observation GLACIOCLIM dentro del Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE), Grenoble, por todos los datos que enviados sobre el glaciar Mer de Glace.

También agradecer a Peter Gibbons, del National Snow and Ice Data Center (NSIDC) - World Data Center for Glaciology, Boulder, University of Colorado, por los links de interés enviados.

Igualmente al Department of Geography-University of Zurich dentro del World Glacier Monitoring Service (WGMS), por los datos y links de interés enviados.

Finalmente agradecer por los datos facilitados a Robert McNabb del Geophysical Institute, University of Alaska.

Contenido del CD:

- PFC Técnicas medioambientales en el estudio de los cambios que se producen en la criosfera en formato PDF.



**INGENIERÍA TÉCNICA EN  
TOPOGRAFÍA  
PFC**

**TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN  
EN EL ESTUDIO DE LOS CAMBIOS  
MEDIOAMBIENTALES QUE SE  
PRODUCEN EN LA CRIOSFERA**

**Projectista/as:** Carolina Gasca y  
Elena Jiménez

**Director/es:** Juan José Martínez  
Benjamín

**Convocatoria:** Junio 2012.



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

**INGENIERÍA TÉCNICA EN TOPOGRAFÍA**  
**Proyecto de Final de Carrera**

**Projectista/s:** Carolina Gasca y Elena Jiménez

**Director/es:** Juan José Martínez Benjamín

**Convocatoria:** Junio 2012

**TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN EN EL ESTUDIO DE LOS  
CAMBIOS MEDIOAMBIENTALES QUE SE PRODUCEN EN  
LA CRIOSFERA**