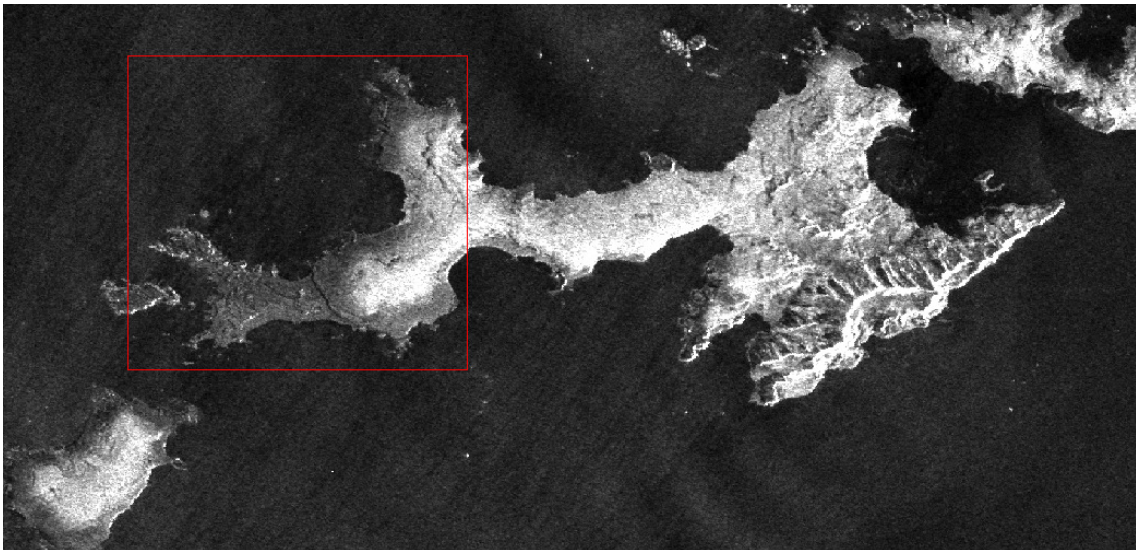


ESTUDIO DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS
DE LA ISLA DE LIVINGSTON MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN



Irene Pérez Llorente Junio 2008

**ANEXO AL CONVENIO DE COOPERACIÓN EDUCATIVA PARA
ACTIVIDADES CURRICULARES ENTRE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE MADRID Y EL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX)**

Madrid, 07 de marzo de 2008

La entidad colaboradora, durante el curso 2007/08, y siguientes, acogerá en régimen de Prácticas de colaboración a los alumnos abajo consignados, según los términos del Convenio de Cooperación Educativa de fecha 26 de septiembre de 2006 del que el presente documento es Anexo inseparable.

Las prácticas de colaboración se desarrollarán en el domicilio del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, sito en Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3 28005 Madrid, comenzarán a partir del 08 de marzo de 2008 y terminarán el 08 de junio de 2008, desarrollándose de lunes a viernes con un horario de 9:00 a 14:00 horas.

El tutor profesional de la entidad colaboradora será el siguiente:

José Antonio Domínguez, del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

El tutor académico de la Facultad de la Facultad de Ciencias será el siguiente:

Antonio Quesada de Corral, del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias

La entidad colaboradora acogerá en principio, en régimen de prácticas en colaboración al alumno:

Irene Pérez Llorente, de cuarto curso de Ciencias Ambientales


DNI: 51071898

Fecha de Nacimiento: 03-08-1985

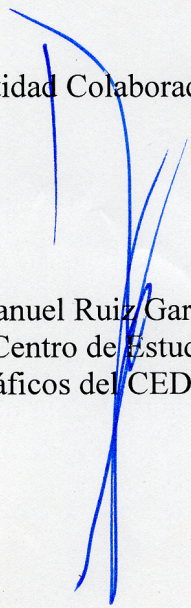
Las prácticas de colaboración tendrán como contenido la participación y aprendizaje de los alumnos en: Teledetección

Las partes se consultarán inmediatamente para la solución de las dificultades que pudieran sufrir en la aplicación del presente Anexo.

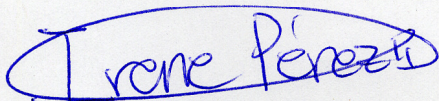
Por la Universidad Autónoma de Madrid


Miguel Ángel Gilarranz Redondo
Vicedecano de Practicum
Facultad de Ciencias

Por la Entidad Colaboradora


Juan Manuel Ruiz García
Director del Centro de Estudios
Hidrográficos del CEDEX

Conforme el estudiante



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias en primer lugar al CEDEX el haberme dado la oportunidad de finalizar mi licenciatura a través de unas prácticas en uno de sus centros, y a Antonio Quesada, que ha hecho que esto sea posible responsabilizándose de mí en nombre de la Autónoma.

También me gustaría agradecer a todo el personal del Centro de Estudios Hidrográficos por haberme acogido con tanta hospitalidad, especialmente al equipo de la sexta planta que, durante este tiempo de convivencia se ha preocupado por mí y me ha hecho sentir una persona más del equipo.

Gracias a José Antonio Domínguez por su paciencia y por haber hecho por mí más de lo que le correspondía, y gracias a mi familia, y a mis amigos, por haberme aguantado en mis momentos de desesperación.

Memoria de las Prácticas en Empresas de la Licenciatura de Ciencias Ambientales realizadas en el Centro de Estudios Hidrográficos y Departamento de Biología de la Universidad Autónoma de Madrid

Proyecto realizado por
Irene Pérez Llorente

Tutor Académico
Dr. Antonio Quesada de Corral

Tutor Profesional
Dr. José Antonio Domínguez Gómez



FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Madrid, Junio de 2008

ÍNDICE

1. Marco Teórico

1.1. Características de la nieve y el hielo en la naturaleza

1.1.1. Formación, precipitación y metamorfismo de la nieve

- Metamorfismo de la nieve seca
- Metamorfismo de la nieve húmeda

1.1.2. Tipos de nieve en función de sus propiedades físicas

1.2. Propagación de las ondas electromagnéticas a través del hielo glaciar

1.3. Principios básicos de la teledetección

1.3.1. Radiación electromagnética

1.3.2. Tipos de sistemas de adquisición de datos

1.3.3. Características de los sensores

1.3.4. Aplicaciones de la teledetección

2. Objetivos

3. Área de estudio

3.1. Proyecto Limnopolar

4. Materiales

4.1. Imágenes

4.1.1. El sistema radar

- Características de la región microondas
- Características y parámetros de observación de las imágenes radar
- Distorsiones geométricas de las imágenes radar
- Factores que afectan a la dispersión microondas
- Características dispersivas de los distintos tipos de hielo

4.1.2. El satélite ENVISAT

4.1.3. El Sensor ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*)

- Modos de operación de ASAR

4.1.4. El modo *Wide Swath*

- Aplicaciones de *ASAR Wide Swath* a la detección remota del hielo

4.1.5. Adquisición de Imágenes

4.2. Softwares utilizados

4.2.1. Eoli-sa 5.3.1.

- Imágenes *ASAR Wide Swath* encontradas y posibles aplicaciones
- Imágenes de otros sensores y posibles aplicaciones

4.2.2. BEAM 4.1.

- Formato de los productos BEAM-DIMAP

4.2.3. ENVI 4.2.

- Descripción de las herramientas del menú radar
- Formato de los productos ENVI

4.3. Información auxiliar

4.3.1. Mapa topográfico

4.3.2. Mapa geomorfológico

5. Metodología

5.1. Tratamientos previos

5.1.1. Análisis visual de las imágenes

- Software BEAM 4.1.
- Software ENVI 4.3.

5.1.2. Corrección del patrón de iluminación de la antena

5.1.3. Corrección geométrica

- Software BEAM 4.1.
- Software ENVI 4.3.

5.1.4. Digitalización de los mapas

5.2. Procesamiento y análisis de la información geoespacial

5.2.1. Filtros

- Software BEAM 4.1.
- Software ENVI 4.3.

5.2.2. Clasificación no supervisada

- Selección del método de clasificación
- Selección de los parámetros de clasificación
- Resultados de la clasificación

5.2.3. Clasificación supervisada

- Definición de Regiones de Interés
- Selección del método de clasificación
- Primera clasificación supervisada
- Segunda clasificación supervisada

5.2.4. Clasificación temporal

- Creación de un archivo multitemporal
- Clasificación Angular temporal
- Post-clasificación

5.2.5. Clasificación del archivo multitemporal con información auxiliar del mapa geomorfológico

- Descripción de las clases

5.2.6. Conclusiones del análisis

6. Conclusión

7. Bibliografía

Anexo I. Clasificación Internacional de la Nieve Estacional en el Suelo basada en la Forma del Grano

1. Marco Teórico

La región antártica resulta de gran interés para estudios sobre el calentamiento global debido a su extremada sensibilidad frente a los cambios de temperatura. Actualmente se están desarrollando numerosas investigaciones en esa línea, pero las adversas condiciones ambientales y la ausencia de núcleos de población dificultan la recogida de datos *in situ*.

La capacidad de los sistemas de teledetección para tomar datos de la superficie terrestre sin necesidad de trasladarse a la zona de estudio los convierte en una herramienta ideal y de uso generalizado en investigaciones sobre áreas remotas. La información recogida por satélites de observación de la tierra ha servido de base para numerosos estudios sobre los parámetros de la cubierta helada (espesor, balance de masa, extensión espacial y duración temporal del deshielo, etc.) en distintas regiones, con resultados tan válidos como los obtenidos a partir de las mediciones realizadas sobre el terreno.

1.1. Características de la nieve y el hielo en la naturaleza

La mayor parte del volumen de agua de la Tierra se encuentra en forma líquida, principalmente en los océanos y mares, y en menor medida en forma de agua subterránea o superficial (en ríos y arroyos). El agua en estado sólido, que aparece principalmente en los casquetes glaciares y banquisas de latitudes polares, y en menor proporción en los glaciares de montaña, representa aproximadamente un 3% del agua total. La fracción gaseosa, presente en la atmósfera como vapor o en estado agregado formando las nubes, supone una parte mínima del contenido en agua, pero su papel es esencial para el intercambio entre compartimentos y redistribución del agua a lo largo de la superficie terrestre.

El **hielo** es agua sólida cristalizada. Cuando el agua es pura y la presión de una atmósfera la congelación tiene lugar a 0° C.

La estructura hexagonal de la molécula del hielo, con un ángulo de enlace mayor que la molécula tetraédrica del agua líquida (109,28 °C frente a 104,5 °C), hace que el agua aumente de volumen al congelarse, alcanzando su densidad máxima en estado líquido (a 4 °C y presión atmosférica).

Por **nieve** se entiende la precipitación atmosférica constituida por hielo cristalizado en forma de estrellas hexagonales ramificadas siguiendo parámetros fractales y que aparecen frecuentemente mezcladas con simples cristales. Estos cristales se aglomeran dando lugar a los copos de nieve.

En geología se denomina **permafrost** al suelo con una temperatura igual o inferior al punto de fusión del agua durante al menos dos años. El hielo no tiene porque estar presente (como es el caso de lechos rocosos no porosos) pero cuando aparece suele hacerlo en cantidades que exceden el potencial de saturación hídrica del suelo.

1.1.1. Formación, precipitación y metamorfismo de la nieve

La formación de nieve en la atmósfera tiene lugar a temperaturas inferiores a 0 °C a partir de agua sobrefriada, la cual forma cristales de hielo en presencia de elementos de nucleación externos (sal marina, polvo, partículas minerales). Estos cristales crecen a través de la agregación de otros más pequeños y de la absorción de vapor de agua hasta formar el copo de nieve, cuya forma básica está determinada por la temperatura de crecimiento y su tasa de crecimiento y elementos característicos por el grado de sobresaturación. Cuando finalmente alcanza la tierra forma una cubierta porosa compuesta por cristales de hielo, agua líquida y aire húmedo, que en ausencia de viento y con una temperatura atmosférica inferior a -5 °C adquiere una densidad de alrededor de 50 Kg/m³. Si por el contrario la temperatura ambiente se aproxima a los 0 °C, los cristales se aglutinan y forman una nieve húmeda cuya densidad oscila entre los 100 Kg/m³ y 200 Kg/m³ y con un aspecto que puede diferenciarse a simple vista del anterior.

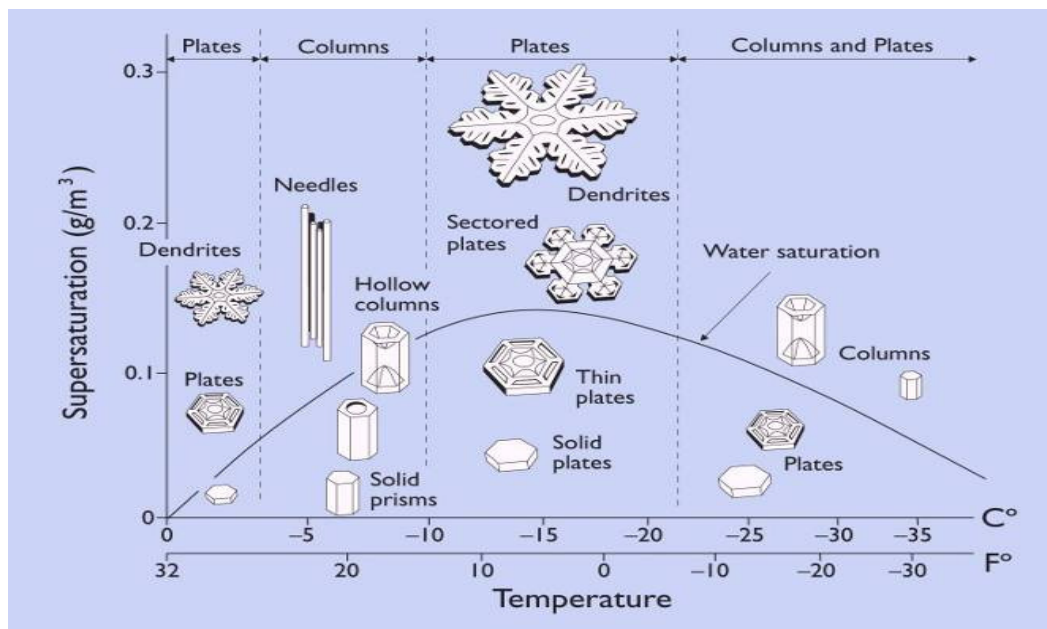


Figura 1. Patrón de crecimiento de los cristales de nieve en función de la temperatura y grado de sobresaturación (R. Luca, 2007).

Con el paso del tiempo el viento y la nieve húmeda caída posteriormente van redondeando los granos por acción mecánica. Pero además, una vez depositada, la nieve sufre una serie de procesos termodinámicos conocidos como **metamorfismo** que modifican la densidad, tensión, porosidad, conductividad termal, reflectividad (albedo) y la morfología de los granos. El resultado de estos procesos depende de la magnitud del gradiente vertical de temperatura, de la presión y de la presencia de agua líquida.

En función del tipo de nieve y del gradiente vertical de temperatura pueden distinguirse los siguientes tipos de metamorfismo:

Metamorfismo de la nieve seca

· Metamorfismo de equilibrio (gradiente débil): cuando las diferencias de temperaturas son suaves se produce la difusión del vapor de agua en las partes sobresalientes del grano y su posterior sublimación, dando lugar a granos finos (diámetro de 0,2 mm a 0,4 mm) y redondeados unidos a menudo por puentes de hielo. Reduce la superficie a razón del volumen aumentando la densidad y la resistencia estructural.

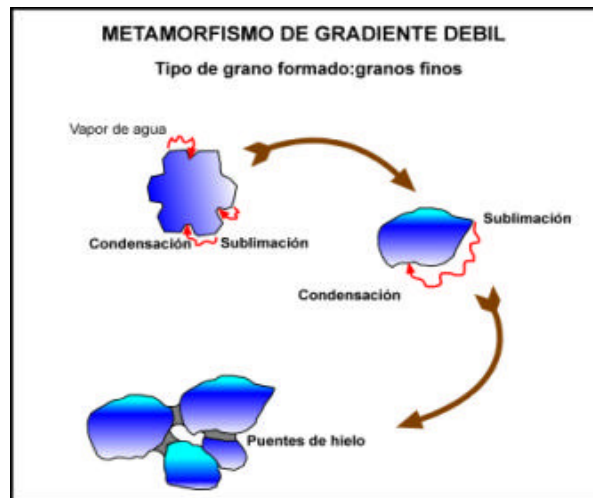


Figura 2. Formación de granos finos y puentes de hielo durante el metamorfismo de gradiente débil (M. Mases, 2005).

· Metamorfismo cinético (gradiente medio): el vapor resultante de la sublimación de la parte más superficial de los granos, con una temperatura ligeramente mayor, se condensa en la base de los granos inmediatamente superiores, formando plaquetas o granos de caras planas y angulares (diámetro de 0,3 mm a 0,5 mm) con uniones débiles. Como consecuencia la resistencia y la densidad (menor de 350 kg/m^3) decrecen. Si el gradiente disminuye los granos de caras planas pueden transformarse en granos finos, con lo que el manto nivoso se estabiliza.

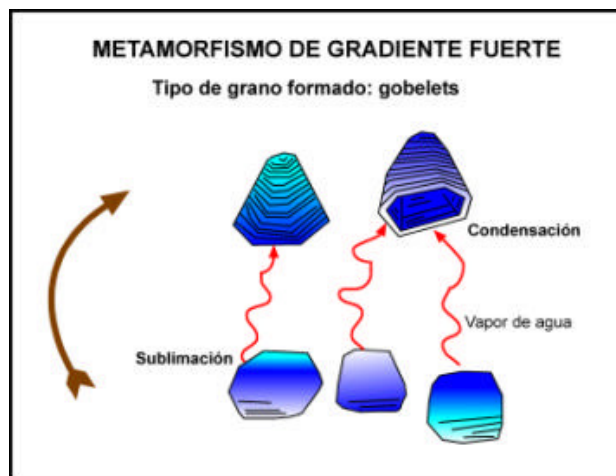


Figura 3. Formación de los granos de caras planas durante el metamorfismo de gradiente medio. (M. Mases, 2005).

- Metamorfismo de gradiente fuerte: la sublimación de la parte superior de los granos y la condensación en su parte inferior es muy rápida y los intercambios de vapor de agua entre los granos muy intensos. El resultado es la formación de unos granos con forma piramidal (también llamados *gobelets*) y de un tamaño mayor (entre los 0,5 mm y 4 mm) sin ningún tipo de cohesión.

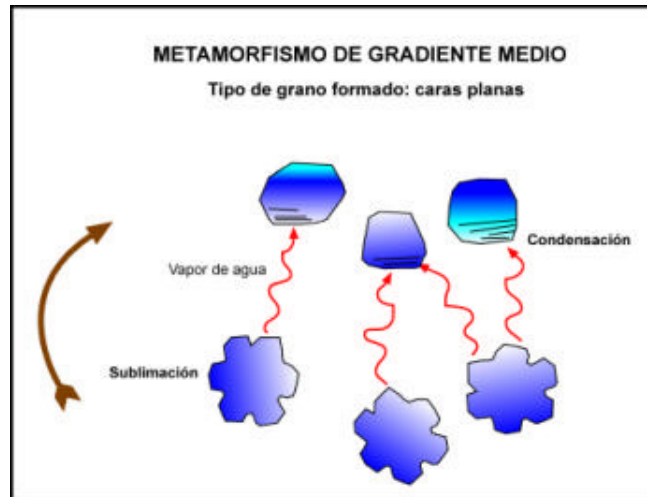


Figura 4. Formación de gobelets durante el metamorfismo de gradiente fuerte. (M. Mases, 2005).

Metamorfismo de la nieve húmeda

El agua líquida aparece en el manto nivoso debido a la caída abundante de lluvia o bien por procesos de fusión accionados por el incremento de la temperatura atmosférica o la incidencia directa de los rayos solares.

En la nieve húmeda las partes convexas y granos más pequeños se funden, y el agua resultante envuelve los granos más grandes formando una película capilar que llena sus partes cóncavas. Cuando esta agua se hiela forma granos redondos que van aumentando progresivamente de tamaño (entre 0,3 mm y 0,2 mm).

El agua intersticial proporciona una cohesión de capilaridad a los granos, pero cuando su presencia es importante el manto nivoso se inestabiliza.

La fusión de los granos durante los ciclos de deshielo y congelación da lugar a la aparición de una capa dura llamada costra de hielo, que por la presión de las capas superiores se transforma en *firn* (hielo que ha sobrevivido un año) y con el paso del tiempo evoluciona hasta formar hielo glaciar con burbujas de aire encerrado.

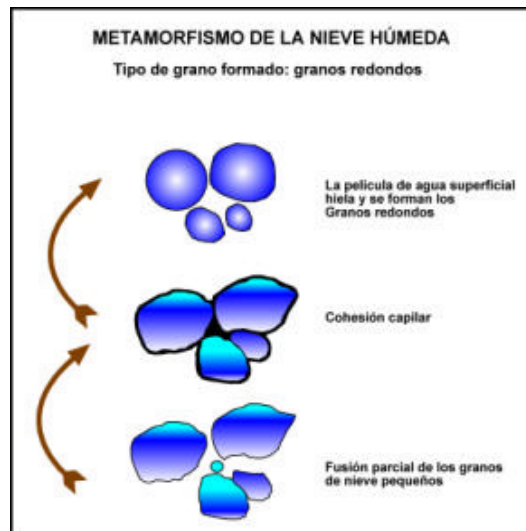


Figura 5. Formación de los granos redondos durante el metamorfismo de nieve húmeda. (M. Mases, 2005).

1.1.2. Tipos de nieve en función de sus propiedades físicas

La nieve es muy porosa y a veces contiene agua líquida, por lo que puede ser considerada como una mezcla de hielo, aire y agua. Los cristales suelen encontrarse unidos formando una textura característica, la cual determina, junto con la temperatura y proporción relativa de sus constituyentes, las propiedades físicas de la masa de nieve.

En 1985 la Comisión Internacional del Hielo y Nieve estableció un grupo de trabajo para actualizar el antiguo sistema de clasificación de la precipitación sólida sobre la superficie terrestre. A continuación se describen los aspectos morfológicos y procesos físicos dominantes utilizados en el sistema de clasificación internacional:

- Tamaño del grano: se define como la longitud de su eje mayor y determina la superficie y rugosidad de la cubierta nevada. La forma y tamaño de los granos determina la densidad y contenido de agua líquida de la masa de nieve.

Término	Tamaño (mm)
Muy fino	< 0,2
Fino	0,2 – 0,5
Medio	0,5 – 1,0
Grueso	1,0 – 2,0
Muy grueso	2,0 – 5,0
Extremo	> 5,0

Tabla 1. Clasificación de la nieve en función del tamaño de grano (Colbeck *et al.*, 1990)

- Forma del grano: la clasificación internacional define 9 tipos básicos de nieve estacional en función de aspectos morfológicos y los procesos físicos implicados en su formación:

Clasificación Internacional de la Nieve Estacional		Graphic Symbol	Examples	Symbol	Type of Particle
1. Partículas de precipitación	+			F1	Plate
2. Partículas de precipitación descompuestas y fragmentadas	/			F2	Stellar crystal
3. Cristales redondeados (monocristales)	●			F3	Column
4. Cristales con caras planas	□			F4	Needle
5. Cristales piramidales (<i>depth hoar</i>)	∧			F5	Spatial dendrite
6. Granos húmedos	○			F6	Capped column
7. Cristales ligeros	∇			F7	Irregular column
8. Masas de hielo	■			F8	Graupel
9. Depósitos y crestas superficiales	∇			F9	Ice pellet
				F0	Hail

Tabla 2. Clasificación Internacional de la nieve en base a la forma de los granos (Colbeck *et al.*, 1990).

Figura 6. Tipos de partículas, símbolos y ejemplos de la Clasificación Internacional de la Precipitación Sólida (R. Luca, 2007).

En el anexo se adjunta la descripción detallada de las distintas clases de la clasificación internacional con sus correspondientes subclasificaciones.

· Contenido de agua líquida: la proporción de agua líquida de la nieve determina su comportamiento y permite clasificarla en distintos tipos de acuerdo a su porcentaje en volumen.

Término	Porcentaje en volumen (%)	Observaciones
Seco	0	Poca tendencia de los granos desagregados a mantenerse adheridos al hacer una bola de nieve. Puede aparecer a $T > 0$ °C.
Húmedo	< 3	El agua no es visible por debajo de 10 aumentos. Aplastada ligeramente muestra una clara tendencia a la agregación.
Mojado	3 - 8	A 10 aumentos se reconocen meniscos de agua líquida entre granos adyacentes, pero no puede extraerse apretando la nieve en las manos.
Muy mojado	8 - 15	Puede extraerse agua de forma moderada, pero hay una cantidad considerable de aire confinado en los poros.
<i>Slush</i> (saturada parcialmente derretida)	> 15	Nieve empapada en agua y con una cantidad relativamente pequeña de aire.

Tabla 3. Clasificación de la nieve por su contenido en agua líquida (Colbeck *et al.*, 1990).

- Equivalente nieve/agua: es el peso equivalente de agua líquida que tendría una determinada superficie de nieve si fuese totalmente derretida. Se expresa en mm.

- Densidad: influye en la conductividad térmica efectiva, en la permeabilidad de los gases, en el equivalente nieve-agua y en las propiedades dieléctricas de la nieve.

La compactación de la nieve, que determina su densidad, está controlada por la presión de la capa superior, la temperatura media anual, la velocidad del viento y la tasa de acumulación, y tiene lugar en dos etapas. Durante la primera parte la tasa de reducción del volumen depende de procesos termodinámicos; posteriormente la densificación se ralentiza a medida que los poros colapsan por la presión de sobrecarga de la nieve, dando lugar a *firn* y hielo glaciario con burbujas de aire y una densidad de 830 kg/m³.

- Presencia de impurezas: normalmente aparecen en cantidades muy pequeñas, pero cuando su contenido influye en las propiedades físicas de la nieve deben enumerarse y describirse de forma detallada, expresando su cantidad como porcentaje en peso. Las impurezas más comunes son partículas de polvo, arena y compuestos orgánicos y solubles.

En las zonas costeras la entrada de impurezas se produce principalmente por precipitación de aerosoles, mientras que en plataforma antártica los principales mecanismos son la deposición seca y adsorción de gases debido a las bajas tasas de precipitación.

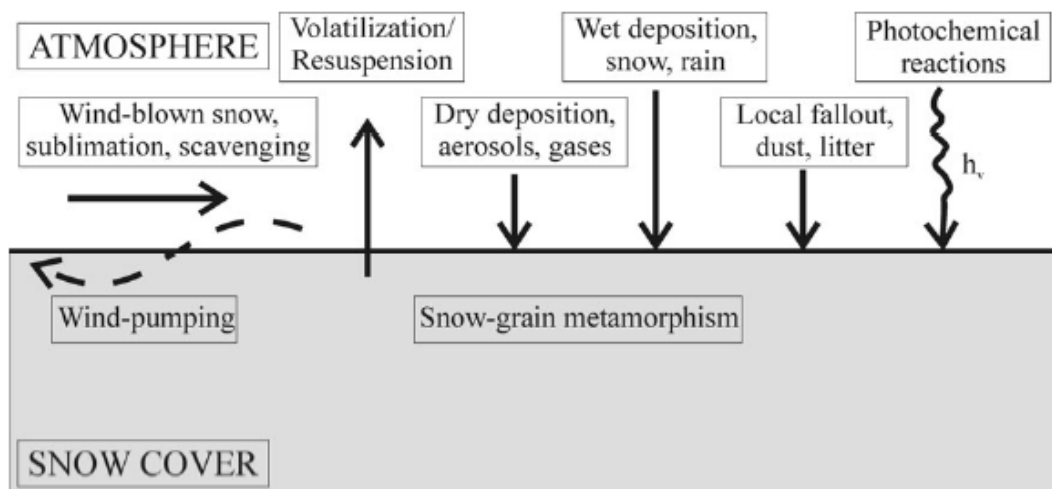


Figura 7. Principales procesos físicos y químicos que influyen en la composición química y presencia de impurezas de la cubierta de nieve fría y seca (E. Kanto, 2006).

- Resistencia de la nieve: depende del estado (compresivo, tenso o cortante) de estrés y tasa del estrés, de la presión y tasa de la presión y, debido a la heterogeneidad espacial de la nieve, del volumen de la muestra. En función de este parámetro la nieve puede definirse como dúctil, de fractura frágil o de máxima resistencia a bajas tasas de presión.

- Dureza: es un parámetro subjetivo que depende del instrumento usado para medirlo y se expresa como a través de un valor índice.

<i>Term</i>	<i>Swiss Rammsonde (N)</i>	<i>Order of magni- tude strength (Pa)</i>	<i>Hand test</i>	<i>Symbol</i>	<i>Graphic symbol</i>
Very low	0-20	0-10 ³	fist	R1	
Low	20-150	10 ³ -10 ⁴	4 fingers	R2	/
Medium	150-500	10 ⁴ -10 ⁵	1 finger	R3	X
High	500-1000	10 ⁵ -10 ⁶	pencil	R4	//
Very high	> 1000	> 10 ⁶	knife blade	R5	⊗
Ice				R6	—

Figura 8. Clasificación de la nieve en función de sus valores de dureza medidos a través de distintos instrumentos (Colbeck *et al.*, 1990).

• Rugosidad de la superficie: se refiere al aspecto superficial de la capa de nieve moldeada por acción del viento, la lluvia, la precipitación sólida o el deshielo irregular.

<i>Term</i>	<i>Symbol</i>	<i>Graphic symbol</i>
Smooth	Sa	————
Wavy	Sb	~~~~~
Concave furrows	Sc	~~~~~
Convex furrows	Sd	~~~~~
Random furrows	Se	~~~~~

Figura 9. Tipos de nieve en función de la rugosidad de su superficie (Colbeck *et al.*, 1990).

• Estratigrafía: la disposición de la nieve en capas horizontales es el resultado de una secuencia de fenómenos meteorológicos y procesos de metamorfismo.

Las capas superiores están bastante influidas por la penetración de la radiación solar y las inversiones diurnas en el gradiente de temperatura, dando lugar a diferentes superficies estacionales. La interrupción en el aporte de nieve durante otoño y primavera da lugar a costras de hielo con cristales modelados por el viento, mientras que la capa de nieve estival se caracteriza por una fina capa de hielo formada cuando la radiación máxima derrite una pequeña película de la nieve laminar amontonada por el viento.

La percolación de las aguas de deshielo crea además lentes y capas gruesas de hielo, y cuando alcanza una costra de hielo a cierta profundidad suele extenderse sobre ella por efecto de su alta capilaridad y reducida permeabilidad.

1.2. Propagación de las ondas electromagnéticas a través del hielo glaciar

La radiación electromagnética es una oscilación de los campos eléctrico y magnético, perpendiculares entre sí, que se propaga en el espacio transportando energía (Hunt, 1980). Al generarse mutuamente no necesitan de ningún medio material para transmitirse.

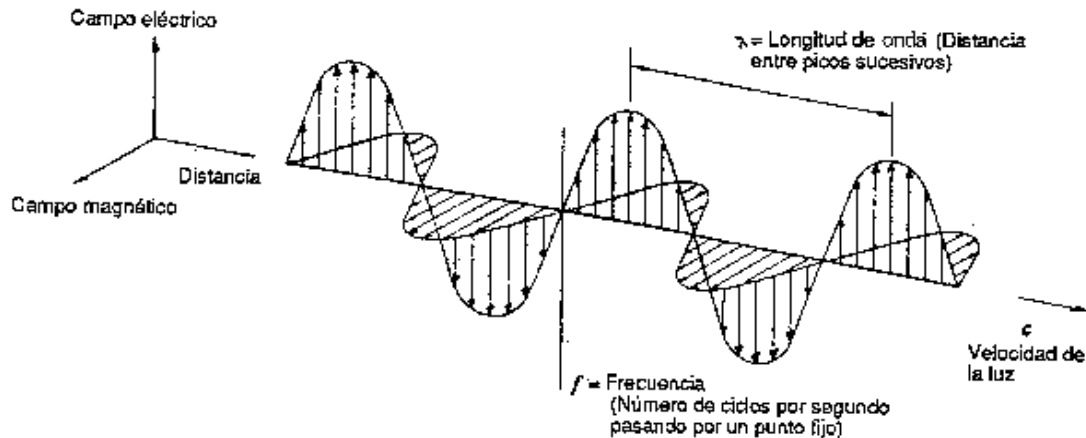


Figura 10. Componentes de una onda electromagnética. (Butler *et al.*, 1990)

La **propagación de una onda electromagnética** a través del vacío fue descrita por Maxwell (1864) mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

donde \vec{B} es la densidad de flujo magnético, \vec{E} la cantidad de campo eléctrico de una onda electromagnética, y ϵ_0 y μ_0 son la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética medidas en el vacío.

La **velocidad de la luz** en el vacío (c) viene dada por la siguiente expresión:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Cuando las ondas se propagan a través de **un medio material**, cuya permitividad y permeabilidad son distintas a las del vacío, su velocidad es inferior a c y puede obtenerse a través de la ecuación (A. Pälli, 2003):

$$v_r = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Medio	Velocidad de la luz (m/s)
Aire	299,912
Agua	224,900
Hielo	229,182

Tabla 4. Velocidad de propagación de la luz a través de distintos medios (El liceo digital. Física, 2008¹).

¹ Las fuentes consultadas de las que se desconoce la fecha de publicación llevan la fecha en la que se realizó la consulta.

μ y ϵ se refieren a la permeabilidad magnética² y permitividad eléctrica³ absolutas del medio. Su expresión es la siguiente:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad \epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

donde μ_r y ϵ_r son los valores relativos de estos parámetros.

La permeabilidad y permitividad provocan una atenuación en los campos magnéticos y eléctricos de las ondas que se propagan a través de un medio. Dado que la respuesta magnética de la mayor parte de los materiales (la nieve y el hielo entre ellos) es despreciable, la absorción depende principalmente de la conductividad⁴ y permitividad dieléctrica del medio.

La respuesta de los materiales a la aplicación de campos eléctricos no es instantánea, sino que existe una diferencia de fase que depende de la frecuencia. Por esta razón la **permitividad y conductividad aparentes** ($\tilde{\epsilon}$ y $\tilde{\sigma}$), que describen el comportamiento de los conductores dieléctricos, se expresan a través de funciones complejas:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon'_e - j\epsilon''_e, \quad \tilde{\sigma} = \sigma'_e - j\sigma''_e$$

ϵ'_e y σ'_e son los valores reales efectivos y están relacionadas con la energía almacenada en el medio; ϵ''_e y σ''_e son las partes imaginarias, y hacen referencia a la disipación o pérdida de energía en el medio; $j = \sqrt{-1}$.

La conductividad y permitividad se relacionan entre sí a través de la frecuencia angular (ω):

$$\sigma + j\omega\epsilon \equiv \sigma'_e + j\omega\epsilon'_e$$

Cuando una onda electromagnética pasa de un medio a otro se produce una reflexión de parte de la energía, cuya fuerza viene dada por el **coeficiente de reflexión** (r), y un cambio de fase, que suele expresarse a través de la impedancia (η), debido a las diferencias en las permeabilidades o conductividades relativas de los medios:

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}, \quad \eta = \left(\frac{\mu}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\mu} \left(\epsilon' \left(1 - j \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right) \right)^{-\frac{1}{2}}$$

² **Permeabilidad magnética:** capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos, cuyo valor depende de la relación entre la intensidad del campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.

³ **Permitividad eléctrica:** habilidad de un material para polarizarse en respuesta a un campo eléctrico aplicado y, de esa forma, cancelar parcialmente el campo dentro del material.

⁴ **Conductividad eléctrica (S/m):** capacidad de un cuerpo para permitir el paso de la corriente eléctrica. Varía con la temperatura.

En el hielo los cambios de fase pueden deberse a variaciones en la densidad, impurezas, temperatura, tamaño y orientación del cristal o por la presencia de una capa de otro material.

La **intensidad (I)** de una onda que viaja a través de un medio sufre una atenuación exponencial proporcional al coeficiente de absorción o distancia de atenuación (α^{-1}), que es característico de cada material:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x),$$

La **distancia de atenuación** de las ondas transmitidas a través del **hielo** depende de su temperatura y concentración de impurezas (que determina el valor de la conductividad), pero para frecuencias comprendidas entre 1MHz y 10GHz es independiente de la frecuencia de la onda (ventana de radio/microondas), lo que permite usar este rango del espectro para el sondeo de glaciares y capas de hielo. La presencia de agua produce una dispersión efectiva y atenúa la onda transmitida de forma que las reflexiones más profundas, como las del lecho rocoso, son difíciles de distinguir.

La velocidad de **propagación de una señal radar a través del hielo** es principalmente función de las distintas fracciones que lo componen, las cuales determinan el valor de la permitividad aparente.

En la nieve seca próxima al punto de fusión y en el *firn* (hielo con cierto grado de compactación y presencia de aire pero sin agua líquida) la permitividad es independiente de la temperatura, de forma que la densidad del *firn* (ρ_f) es el único factor que afecta a las propiedades dieléctricas de la nieve (Frolov y Macheret, 1999):

$$\epsilon_d = (1 + 0.857 \rho_f)^2, \quad v = \frac{c}{1 + 0.857 \rho_f}$$

Otra forma de definir la constante dieléctrica de un material es como una función de las permitividades dieléctricas de sus k componentes en una fracción de volumen f_k (Sihvola *et al.*, 1985):

$$\epsilon_m^a = \sum f_k \epsilon_k^a$$

· Hielo frío glaciar (mezcla de hielo y aire): en el caso anterior, la permitividad quedaría definida en función de la densidad del hielo frío glaciar (ρ_d) y de la densidad del hielo sólido ($\rho_i = 0,917 \text{ Mg/m}^3$).

$$\epsilon_d = \left[\left(\frac{\rho_d}{\rho_i} \right)^{1/3} (\epsilon_i^{1/3} - 1) + 1 \right]^3$$

· Hielo húmedo (mezcla de hielo y agua): su permitividad es una función de la frecuencia, temperatura, contenido de agua, densidad y forma de las partículas y contenido de agua líquida. También puede expresarse en función de la proporción relativa de sus distintos componentes:

$$\varepsilon_s = \left[\left(\varepsilon_i^{1/3} + W \left(\varepsilon_w^{1/3} - \varepsilon_i^{1/3} \right) \right) \right]^3$$

· Hielo húmedo con inclusiones de aire: como la permitividad del agua líquida (80) es bastante mayor que la del hielo (3,17) y la del aire (1), su comportamiento dieléctrico está controlado principalmente por la fracción líquida:

$$\varepsilon_s = \left[\varepsilon_i^{1/3} (1 - P) + W \varepsilon_w^{1/3} + P - W \right]^3$$

donde ε_s , ε_i y ε_w son las permitividades del hielo húmedo glaciar, hielo sólido y agua líquida, respectivamente. W es la fracción de agua líquida y P la porosidad total (suma de las fracciones de aire y agua).

1.3. Principios de la teledetección

La teledetección o percepción remota es la adquisición de información acerca de una superficie o material por medio de un instrumento alejado del objeto de interés. Los **datos** se refieren a los valores medidos o registrados por un sensor a partir de la radiación electromagnética que le llega desde la superficie, mientras que la **información** implica una transformación e interpretación de estos datos que permita describir la naturaleza o superficie de un objeto en términos biofísicos o geográficos. Para ello es necesario el uso de modelos conceptuales o específicos que relacionen la señal percibida con los procesos o estructuras de la superficie. Los datos de campo constituyen un elemento importante para la evaluación de los productos derivados del procesamiento y el contraste de los modelos aplicados.

El objetivo final es identificar y categorizar los objetos de la superficie en base a su clase, sustancia y distribución espacial basándose en los productos generados (imágenes, mapas o gráficos).

Los tres elementos básicos de cualquier sistema de teledetección son: el objeto observado, un flujo energético y el sensor.

1.3.1. Radiación electromagnética

La adquisición de información a distancia implica la existencia de un flujo de información entre el objeto observado y el sensor. La fuente de energía más comúnmente utilizada para transportar esta información es la radiación electromagnética.

El **espectro electromagnético** es la ordenación de las ondas en función de su energía:

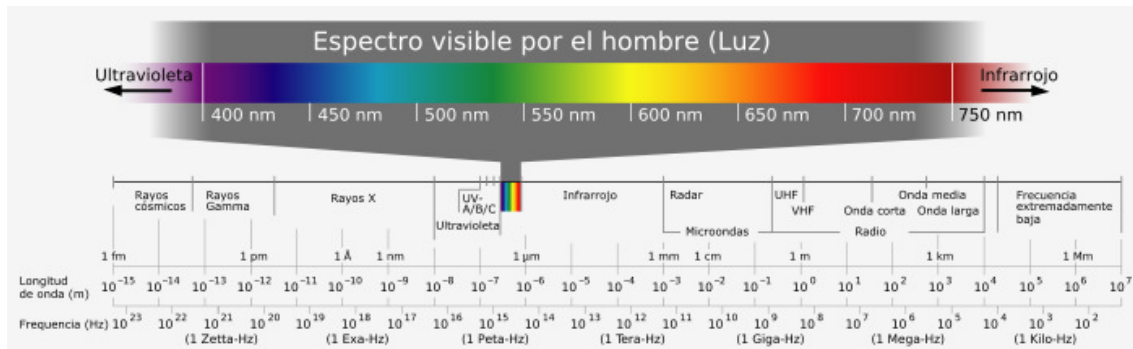


Figura 11. Diagrama del espectro electromagnético en función de la longitud de onda y la frecuencia (Wikipedia, 2008).

La radiación presenta propiedades de onda y de corpúsculo, por lo que su comportamiento se explica a través de dos teorías:

- La teoría electromagnética (Maxwell, 1860), que describe la radiación como una onda que viaja de forma sinusoidal, con los campos eléctrico y magnético perpendiculares entre sí y respecto a la dirección de propagación (Fig. 10), a la velocidad de la luz:

$$c = \lambda \nu$$

donde $c = 3 \cdot 10^8$, es la velocidad de la luz en el vacío, λ es la longitud de onda⁵ y ν es la frecuencia⁶.

- La teoría cuántica (Planck, 1900; Einstein, 1905), que establece que la radiación está compuesta por una sucesión de unidades discretas de energía llamadas cuantos o fotones. La energía de un fotón (E) viene dada por la siguiente expresión:

$$E = h \nu$$

donde $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, es la constante de Planck.

Cualquier cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto (0 Kelvin = 273 °C) emite radiación electromagnética con una intensidad proporcional a su temperatura, de acuerdo a la **ley de Stephen-Boltzmann** (1879):

$$M_n = \sigma T^4$$

donde M_n es la emitancia⁷, σ es la constante de Stephen-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), y T la temperatura absoluta (expresada en Kelvin) del cuerpo.

⁵ **Longitud de onda** (μm): distancia entre dos crestas o dos valles de una onda.

⁶ **Frecuencia** (Hz): número de ciclos que pasan por un punto fijo en la unidad de tiempo.

⁷ **Emitancia** (W m^{-2}): energía total radiada por un cuerpo en todas las direcciones por unidad de área y tiempo.

La distribución de la energía emitida por un cuerpo negro⁸ a lo largo del espectro viene dada por la **ecuación de Planck**:

$$M_{\lambda} = [2\pi hc^2 \lambda^{-5}] \cdot [1 / (e^{(hc/\lambda kT)} - 1)]$$

donde M_{λ} es la emitancia espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda y k la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$).

La **ley de desplazamiento de Wien** (1893) permite calcular, a partir de la ecuación de Planck, la λ a la cual se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura:

$$\lambda_m = \alpha T^{-1}$$

donde λ_m es la longitud de onda dominante y $\alpha = 2898 \mu\text{m K}$.

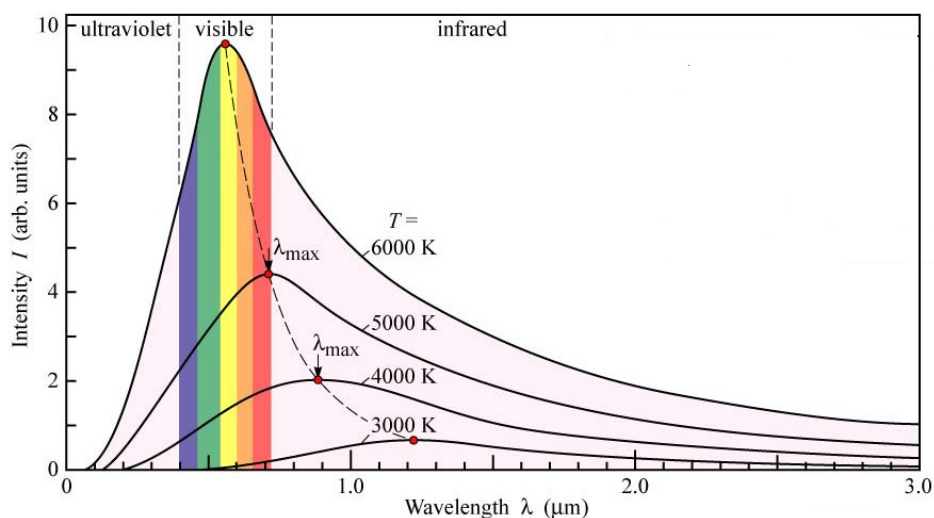


Figura 12. Distribución de la energía emitida por un cuerpo negro en función de la longitud de onda para varias temperaturas (E. F. Shubert, 2006).

La radiación empleada en teledetección puede dividirse en tres grupos en función de su origen:

- Energía emitida por el sol y reflejada por la Tierra. El Sol con una temperatura en torno a los 6000 K, es el principal emisor de radiación del sistema solar. Su radiación, que presenta una emitancia máxima en torno a $0,5 \mu\text{m}$ (en el rango visible), constituye la fuente de energía más utilizada en teledetección, y es la que nos permite ver los objetos.
- Energía emitida por el propio objeto. La radiación emitida (no reflejada) por los objetos de la superficie terrestre, con una temperatura media de unos 300 K ($27 \text{ }^\circ\text{C}$), alcanza su máximo en las longitudes de onda del infrarrojo térmico (de $8 \mu\text{m}$ a $12 \mu\text{m}$). Este nivel de energía es muy bajo si lo comparamos con la energía solar reflejada, pero es dominante durante la noche y, aunque no puede ser captado por sistemas fotográficos, sí lo es por sensores multispectrales utilizados en teledetección.

⁸ **Cuerpo negro** (G. Kirchhoff, 1862): objeto teórico ideado para estudiar la emisión de radiación electromagnética que absorbe toda la energía radiante que incide sobre él. Ninguna parte de la radiación incidente se refleja o pasa a través de él.

- Energía emitida por el sensor. Emplea radiación electromagnética artificial generada por el sensor, generalmente de gran longitud de onda (microondas o hiperfrecuencias), para posteriormente registrar su "eco" sobre la superficie terrestre.

1.3.2. Tipos de sistemas de adquisición de datos

Los **sensores** son instrumentos susceptibles de percibir una señal electromagnética en un intervalo de longitudes de onda determinado que les llega desde la Tierra o la atmósfera y convertirla en una señal física (analógica o digital) que pueda ser tratada y almacenada.

Existen dos tipos básicos de sensores en función del **tipo de energía** que registren:

- Sensores pasivos: detectan la radiación electromagnética emitida o reflejada por fuentes naturales (sistemas fotográficos, radiómetros multi e hiperespectrales, espectrómetros de imagen, etc.).

La energía solar reflejada sólo está disponible cuando el sol ilumina el objetivo, mientras que el infrarrojo térmico (emitido por las superficies que previamente han absorbido radiación solar) puede ser aprovechado tanto de día como de noche siempre que la cantidad de energía sea suficiente para ser detectado.

- Sensores activos: poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación y la emiten en una dirección determinada (radar, lidar). La energía dispersada al chocar con las superficies se recibe, se amplifica y se analiza para determinar la localización y propiedades de los objetos.

Los sensores activos permiten el uso de longitudes de onda mayores al rango de emisión del sol, las cuales no interactúan con los componentes de la atmósfera. La forma en que se emite el haz artificial puede manipularse además para adquirir la información en las condiciones más adecuadas en función de los objetivos.

Aunque algunos sistemas de teledetección captan la energía de una sola banda del espectro, generalmente suelen registrar varios rangos separados de **longitud de onda**. Los sensores con estas características pueden dividirse en dos grupos:

- Sensores Multiespectrales: registran simultáneamente varias franjas del espectro separadas a distintas resoluciones espectrales.
- Sensores Hiperespectrales: tienen capacidad para captar la energía de cientos de longitudes de ondas individuales de forma simultánea a lo largo del espectro.

Muchos sensores electrónicos se sirven de scanners para observar la superficie terrestre, los cuales utilizan un campo de visión estrecho que "barre" el terreno y produce una imagen bidimensional de la superficie. Existen dos **tipos de scanners** en función de su dirección de observación:

- Scanners de barrido (*cross-track*): escanean la tierra en una serie de líneas perpendiculares al movimiento del satélite.
- Scanners de empuje (*along-track*): escanean en la dirección del movimiento a través de un conjunto de detectores dispuestos linealmente en la dirección perpendicular.

Para poder observar la superficie terrestre a cierta distancia los aparatos sensores deben colocarse sobre una plataforma estable. Existen distintos **tipos de plataformas**:

- terrestres: recogen información detallada del objetivo, que puede compararse con la recogida por otro tipo de sensores.
- aéreas (avión, helicóptero, globo): están situadas dentro de la atmósfera y permiten obtener información de cualquier porción de la superficie en el momento deseado.
- espaciales (satélites, naves o transbordadores espaciales): plataformas lanzadas al exterior de la atmósfera que giran alrededor de la tierra, ofreciendo una cobertura frecuente de la superficie de forma continua.

Los satélites son una de las plataformas más usadas en teledetección debido a sus características. La ruta seguida por un satélite es referida como su **órbita**, que se caracteriza por su altitud, plano orbital respecto al Ecuador y rotación relativa a la Tierra y determina los parámetros de observación del sensor.

Los principales tipos de órbitas usados en teledetección son:

- Órbitas Geoestacionarias (GEO): sus parámetros orbitales (forma circular cuasi-perfecta, plano ecuatorial y altura de 3600 km) y la velocidad y movimiento (progrado) del satélite permiten la sincronización del satélite con el movimiento de rotación de la Tierra. De esta forma se consigue una cobertura espacial (alrededor de 45% del globo) y temporal (30 minutos) grande de una porción fija de la superficie.
- Órbitas heliosíncronicas (HEO): sus parámetros (órbita aproximadamente polar, de 800 km de altitud y velocidad igual a la de la Tierra alrededor del Sol) se establecen para observar sistemáticamente la misma parte de la Tierra a una hora fija y poder tomar datos siempre en las mismas condiciones.
- Low Earth Orbit (LEO): bajas y próximas a la parte superior de la atmósfera (150 km– 300 km de altura). Periodo de unos 90 min.
- Near Earth Orbit (NEO): entre 300 km y el doble del radio de la Tierra. Su interacción con la atmósfera es pequeña y obtienen suficiente detalle.

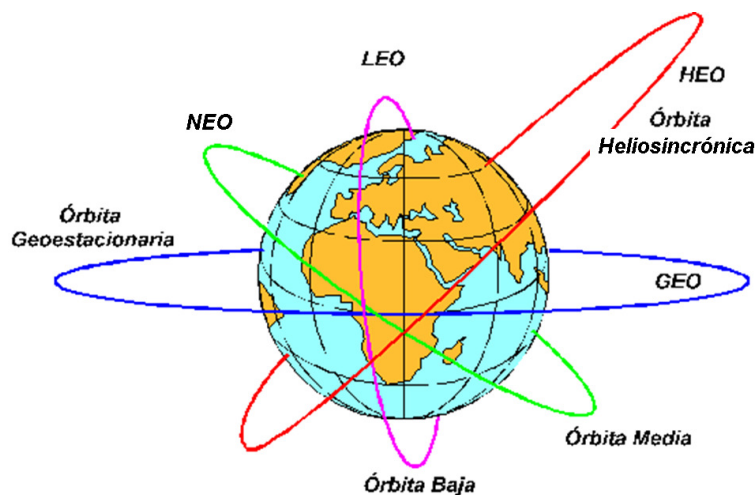


Figura 13. Tipos de órbitas satelitales (Radiomen, 2008).

1.3.3. Características de los sensores

La distancia del sensor al objetivo determina en gran medida el detalle de la información obtenida y el área total cubierta por el sensor. A continuación se describen los principales parámetros de los sensores que afectan a la calidad de las imágenes.

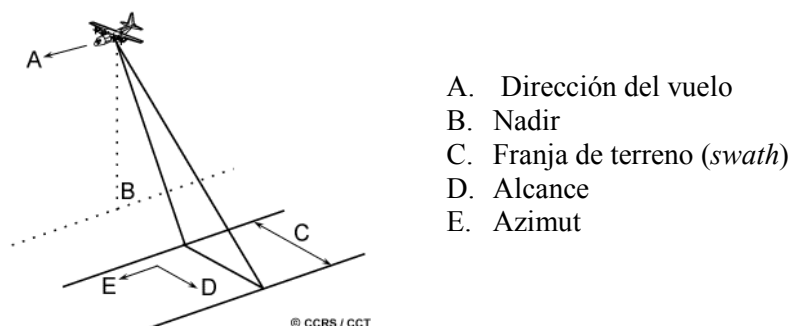


Figura 14. Parámetros de observación de los sistemas de teledetección (CCRS⁹, 2008).

La **resolución espacial** hace referencia al tamaño de la característica más pequeña que puede ser detectada. Pueden distinguirse dos tipos de resolución en función de la dirección que se considere:

- **Resolución del alcance:** es la resolución en la dirección perpendicular a la trayectoria de vuelo del sensor.
- **Resolución del azimut:** resolución en la dirección longitudinal (paralela a la línea de vuelo), que está limitada por el ancho de haz en esa dirección.

La **resolución espectral** se define como el tamaño y número de intervalos de longitudes de onda que puede ser detectado por un sensor.

Una resolución espectral alta reduce la relación entre el nivel de señal (información contenida en los datos) y nivel de ruido (SNR, variaciones no deseadas que se añaden a la señal) mejorando la calidad de la imagen.

La **resolución radiométrica** es el número de niveles digitales usados para expresar los datos registrados por el detector y determina su sensibilidad frente a variaciones en la radiancia. La distancia entre los niveles digitales debe ser mayor que la relación señal/ruido para poder distinguir si los cambios de nivel se deben a cambios reales de la radiancia o a un cambio en la magnitud del ruido.

La **resolución temporal** se refiere a la frecuencia con la que un satélite puede obtener imágenes de una misma porción de la superficie terrestre. Está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (ángulo de observación y ángulo de cobertura).

La **resolución angular** es la capacidad para observar la misma zona desde distintos ángulos. Facilita una mejor caracterización de la superficie al obtener distintos tipos de información.

⁹ CCRS: Canada Centre for Remote Sensing (Natural Resources Canada).

1.3.4. Aplicaciones de la teledetección

Las aplicaciones de esta técnica de observación remota pueden extenderse a cualquier disciplina que tenga en cuenta la dimensión espacial.

En función de la superficie observada, pueden distinguirse las siguientes aplicaciones ya consolidadas:

- Litosfera: cartografía de los riesgos de erosión, análisis geomorfológico, prospecciones geomineras o estudios de radiación a nivel de la superficie terrestre. Caracterización de la rugosidad y humedad de la superficie y desarrollo de modelos digitales de elevación.
- Hidrosfera: análisis de las características físicas de los mares y los océanos (temperatura superficial, corrientes de agua, oleaje), características químicas (salinidad, turbidez, contenido en contaminantes) y aspectos bióticos (localización de pesquerías o análisis del contenido en plancton). Respecto a las aguas continentales destaca la medición de superficies nevadas y la profundidad de la nieve para evaluar la magnitud de la acumulación de agua y predecir el deshielo, la medida de la evapotranspiración o la inferencia de acuíferos subterráneos.
- Atmósfera: predicción meteorológica, estudios del perfil atmosférico, medición de la magnitud del agujero de la capa de ozono, establecimiento de modelos climáticos regionales y globales o análisis de fenómenos climáticos como “El Niño”.
- Biosfera: estudios sobre el seguimiento de la vegetación, estimación de la producción agrícola o control de sus superficies para el seguimiento de la Política Agraria Comunitaria (PAC), control de determinadas plagas o enfermedades en plantas cultivadas y forestales, determinación de la producción de biomasa producida en una región, cuantificación de la deforestación, seguimiento de los incendios forestales en tiempo real y evaluación de los daños ocasionados.

Cabe citar además otros dos grupos de aplicaciones:

- Cartografía: creación de mapas a partir de imágenes espaciales y utilización de imágenes de alta resolución espacial para la actualización de la cartografía topográfica de escala 1:50.000.
- Ordenación del territorio: descripción de la situación y seguimiento de la política de ordenación.

2. Objetivos

El objetivo del presente estudio es analizar la evolución temporal del deshielo y las características de las masas de agua continentales de la península de Byers (isla de Livingston) mediante la aplicación de técnicas de teledetección.

La metodología consiste en el tratamiento digital de las imágenes del área de estudio adquiridas por la base de datos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX para identificar y describir las distintas cubiertas a partir de sus características dispersivas y del uso de información adicional.

Este trabajo forma parte del Proyecto Limnopolar, una investigación interdisciplinar sobre los ecosistemas acuáticos no marinos y costeros en latitudes polares y su sensibilidad frente a variaciones climáticas.

3. Área de estudio

La **isla de Livingston** (ubicada entre los 62° 27' y 62° 48' de latitud sur, y entre los 59° 45' – 61° 15' de longitud oeste), con un área de 845 km², es una de las más extensas entre las 14 que conforman las Islas Shetland del Sur, un archipiélago situado a 120 km de la Península Antártica. Está constituida por numerosas penínsulas y cabos entre los que se extienden bahías con perfiles submarinos en forma de artesa, salvo en la parte occidental, donde la plataforma muestra una gran continuidad. También es notable la presencia de islas menores.

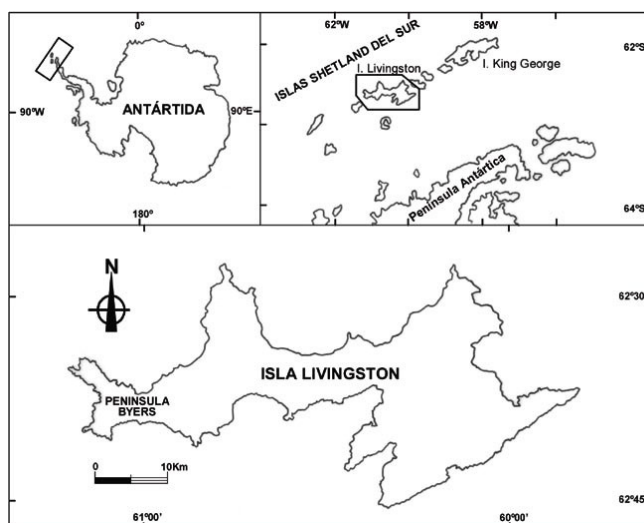


Figura 15. Localización de la Península de Byers (isla de Livingston), en las islas Shetland del Sur, próximas a la Península Antártica (Toro *et al.*, 2006).

Las suaves temperaturas, con medias de 0 °C -3 °C en verano y -10 °C en invierno y abundantes precipitaciones (entre los 700 mm – 1.000 mm anuales), hacen que se incluya dentro del clima antártico marítimo.

Su interés reside en que la **Península de Byers**, al oeste de la isla, contiene la mayor superficie descubierta de hielo en verano (80 km²) del continente Antártico. La dinámica anual de fusión-congelación que sufre su capa activa de permafrost, de naturaleza principalmente mineral, condiciona los procesos hidrológicos y geoquímicos de las cuencas de los más de 60 cuerpos de agua, de características ecológicas variadas y con la mayor diversidad no marina de la región, excavados sobre sus afloramientos rocosos. En general estos sistemas se caracterizan por su bajo grado de mineralización, la escasa entrada de nutrientes y la sencillez de sus redes y comunidades tróficas, cuya biomasa está representada principalmente por cianobacterias, diatomeas y tapetes de musgos acuáticos.

La única entrada de agua a estos **sistemas fluviales y lacustres** durante el invierno se produce por precipitación, pero a finales de octubre la escorrentía superficial procedente de la fusión del manto aumenta el volumen de entrada, el cual se almacena hasta que los diques de hielo que bloquean las salidas se rompen por la presión de los excedentes.

De noviembre a enero, la fusión de la capa activa del permafrost por absorción de radiación o su sublimación por acción del viento da lugar a procesos de escorrentía sub-superficial y solifluxión.

En verano se produce un intenso deshielo en los frentes glaciares, que se manifiesta en forma de regueros supraglaciares, conos de barro o torrentes proglaciares. No obstante, en las áreas más descubiertas permanecen algunas masas residuales de hielo, en forma de pequeñas lenguas o lóbulos, que aportan entradas a charcos y arroyos.

La **cubierta de hielo** sufre en general una evolución regresiva observable en la morfología de los bordes glaciares. Las zonas de acumulación aparecen principalmente a partir de los 200 m, donde las mayores precipitaciones se unen a una menor fusión.

La **litología del terreno** y las fracturas existentes condicionan la topografía de la isla y la disposición de las estructuras geológicas. Los principales relieves están constituidos por rocas plutónicas, mientras que los pitones basálticos y andesíticos dan lugar a cerros aislados. El territorio puede dividirse en 3 unidades morfográficas (López-Martínez *et al*, 1992):

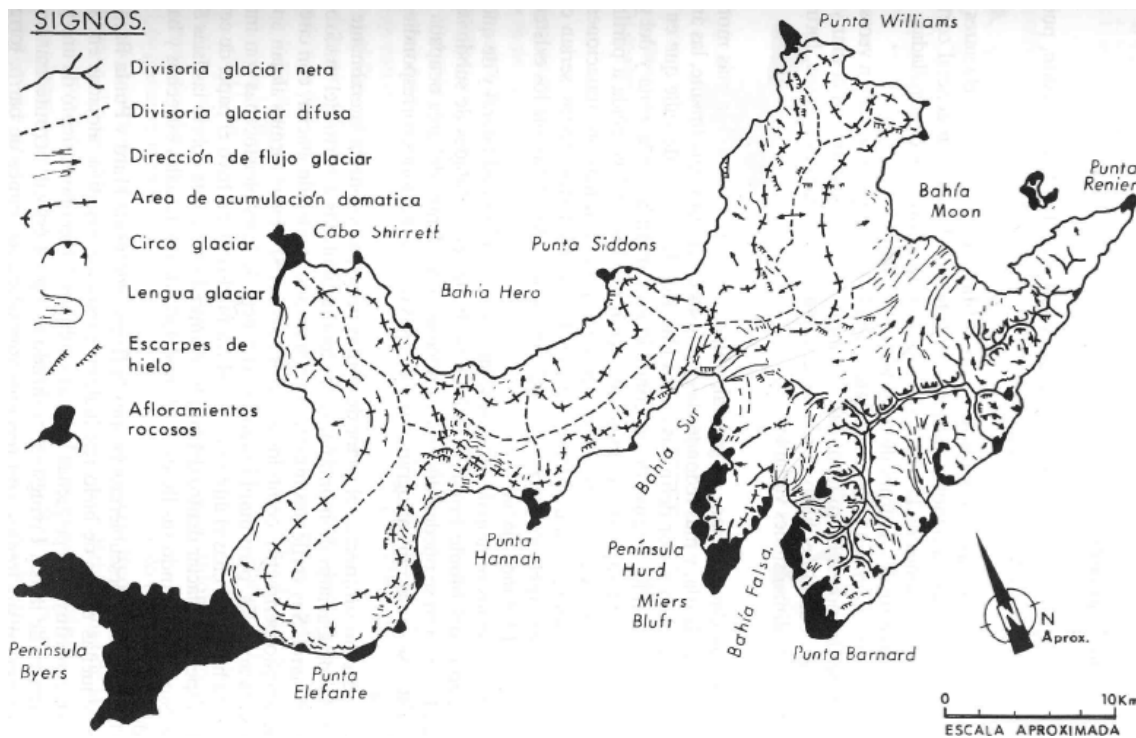


Figura 16. Principales cuencas y flujos glaciares de la isla de Livingston. (Martínez de Pisón *et al.*, 1992).

- **Sector montañoso:** constituido por una alineación montañosa ubicada entre la Bahía Sur y Bahía Moon, en la parte suroriental de la isla, hasta una distancia de 5 km de la costa. Presenta un relieve abrupto de picos y crestas con una cota máxima de 1770 m. Los glaciares que aparecen en esta zona son de circo o de valle, con lenguas cortas y divisorias y áreas de acumulación bastante marcadas.
- **Alineación glaciar alomada:** aparece al norte del sector montañoso y se extiende hasta el Domo de Rotch, que limita con Byers. Está constituida por glaciares de domo unidos lateralmente, con alturas inferiores a los 400 m y divisorias redondeadas que se acentúan en el extremo oriental, a medida que se aproximan al sector montañoso. Sus lenguas forman largos frentes que acaban en el mar y cuando se encajan entre relieves rocosos dan lugar a lóbulos.
- **Península de Byers:** puede dividirse a su vez en 3 unidades de paisaje:
 - **Playas elevadas** hasta 20 m sobre el nivel del mar interrumpidas por escollos y rompientes.
 - **Plataforma intermedia** del holoceno, que se eleva entre los 30 m y 50 m de altura.
 - **Plataforma superior** del holoceno, entre 85 m y 100 m de altura.

Además de relieves cónicos aislados como el Chester Cone, en la parte noroccidental de la península aparece un relieve montañoso más abrupto en el que se encuentra el punto más alto de la península, el Start Peak, con 268 m.

En cuanto a la diversidad biológica, esta zona destaca por albergar dos especies de quironómidos endémicos de la Antártida (*Parochlus steinenii* y *Belgica antarctica*) y las dos únicas especies de plantas fanerógamas de toda la región (*Deschampsia antarctica* y *Colobanthus quitensis*), además de una gran diversidad de musgos (unas 30 especies determinadas) y líquenes (más de 50 especies citadas).

En los lagos habitan más de 120 especies de protozoos ciliados, oligoquetos acuáticos y *Macrothrix ciliata*, la segunda especie de cladóceros observada en la Antártida.

Sus praderas marinas, por otro lado, son usadas como zonas de cría por los elefantes marinos del Sur (*Mirounga leonina*), lobos marinos antárticos (*Arctocephalus gazella*), pingüinos Papua (*Pygoscelis papua*) y Barbijo (*P. antarctica*), charrán antártico (*Sterna vittata*), petreles gigantes del Sur (*Macronectes giganteus*), petreles de Wilson (*Oceanites oceanicus*), o la paloma antártica (*Chionis alba*), entre otras especies.

3.1. Proyecto Limnopolar

Limnopolar es un proyecto interdisciplinar enmarcado dentro del Plan Nacional I+D+i, concebido para el estudio de las alteraciones que se producen en los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas acuáticos antárticos no marinos como respuesta a los cambios ambientales y climáticos. En el marco del proyecto se integran diversos enfoques que abarcan limnología básica, hidrología, ciclos biogeoquímicos, redes tróficas, biodiversidad, teledetección, meteorología, paleoecología, etc.

Las investigaciones sobre la respuesta de los ecosistemas frente a procesos a largo plazo se han centrado típicamente en las regiones polares, por ser ecosistemas remotos y casi libres de la actividad humana. Además de ser una de las regiones del planeta más sensibles al aumento global de temperaturas, la extensión de su cubierta helada, que refleja en gran medida la radiación solar debido a su gran albedo, influye en el ritmo de ese calentamiento.

Por otro lado, la sensibilidad y vulnerabilidad de las comunidades y procesos de los ecosistemas acuáticos los convierte en buenos Indicadores Tempranos de Cambios (*Early Warning Systems*), que integran además las alteraciones de cualquier punto de su cuenca de drenaje. Las variaciones que se produzcan por tanto en los patrones estacionales de precipitación y temperatura afectarán a los procesos hidrológicos y estado de las cuencas, modificando la composición, características y relaciones de las comunidades que conforman estos ecosistemas. Esta interdependencia entre procesos ecológicos y entre la biota y el medio, junto con la relativa simplicidad de sus cadenas tróficas, los convierte en sistemas ideales para evaluar los cambios derivados del clima y establecer un modelo predictivo.

El Proyecto Limnopolar comenzó con la instalación del “Campamento Byers”, en la zona oeste de South Beaches (Byers), en el invierno austral 2001-2002. Desde entonces se han llevado a cabo 4 campañas con el desarrollo de las siguientes actividades:

- Limnopolar I (2001-2004):
 - Descripción de las características físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas acuáticos (lagos, arroyos y otras zonas húmedas).
 - Instalación de la estación meteorológica y de perfiles de termistores en la capa activa de permafrost y en la columna de agua del lago Limnopolar.
 - Mediciones puntuales y en continuo del caudal en las entradas y salidas del lago
- Limnopolar II (2006-2009):
 - Investigación de los procesos ecológicos y ciclos biológicos de las especies más características y su respuesta frente a cambios ambientales a pequeña y mediana escala temporal.
 - Estudios paleolimnológicos y análisis de los restos subfósiles presentes en los sedimentos de los lagos para reconstruir la evolución climática de la región.
 - Papel del bucle microbiano en la estructura de la comunidad, funcionamiento del ecosistema, transporte de energía y su respuesta frente a cambios en los factores bióticos y abióticos del medio.
 - Influencia de los virus en las poblaciones de organismos acuáticos y su respuesta frente a cambios ambientales.
- Campaña 2007-2008: instalación de un Sistema Autónomo de Monitorización y Muestreo Limnológico en el lago Limnopolar para la toma de muestras periódicas de agua (análisis químicos y biológicos) y medición variables limnológicas (profundidad, pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, radiación P.A.R. y clorofila).

Artículos publicados

- “*A new freshwater oligochaete species (Clitellata: Enchytraeidae) from Livingston Island, Antarctica*”, P. Rodríguez y E. Rico. Polar Biology, 2008.
- “*Benthic primary production in polar lakes and rivers*”, A. Quesada, E. Fernández-Valiente, I. Hawes and C. Howard-Williams. In W.F. Vincent y J. Leyborn-Parry, eds. Polar Lakes and Rivers. Arctic and Antarctic Aquatic Ecosystems, 2008.
- “*Community structure and physiological characterization of microbial mats in Byers Peninsula, Livingston Island (South Shetland Islands, Antarctica)*”, E. Fernández-Valiente, A. Camacho, C. Rochera, E. Rico, W.F. Vincent y A. Quesada. FEMS Microbiol Ecol, 59, 377-385, 2007.
- “*Ciliate biogeography in Antarctic and Arctic freshwater ecosystems: endemism or global distribution of species?*”, W. Petz, A. Valbonesi, U. Schiftner, A. Quesada y J.C. Ellis-Evans. FEMS Microbiol Ecol, 59, 396-408, 2007.
- “*Limnological characteristics of the freshwater ecosystems of Byers Peninsula, Livingston Island, in maritime Antarctica*”, M. Toro, A. Camacho, C. Rochera, E. Rico, M. Bañón, E. Fernández-Valiente, E. Marco, A. Justel, W.F. Vincent, M.C. Avendaño, Y. Ariosa y A. Quesada. Polar Biology. 30, 635-649, 2007.
- “*Proyecto LIMNOPOLAR. Ecosistemas acuáticos antárticos no marinos como sensores del cambio climático*”, M. Toro y A. Quesada. Ambienta. 62-69, 2007.
- “*Planktonic microbial assemblages and the potential effects of metazooplankton*

predation on the food web of lakes from the maritime Antarctica and sub-Antarctic islands”, A. Camacho. Reviews of Environmental Science and BioTechnology, 2006.

· “*Landscape control of high latitude lakes in a changing climate*”, A. Quesada, W.F. Vincent, E. Kaup, J.E. Hobbie, I. Laurion, R. Pienitz, J. López-Martínez y J.J. Durán. In: D.M. Bergstrom, P. Convey and A.H.L. Huiskes, eds. Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems. Springer. 2006.

· “*Un mundo dominado por los microorganismos. Ecología microbiana de los lagos antárticos*”, A. Camacho y E. Fernández-Valiente. Ecosistemas, 2. 2005.

· “*Ciliate biodiversity in freshwater environments of maritime and continental Antarctic*”, W. Petz, A. Valbonesi y A. Quesada. Terra Antarctica Reports, 11, 43-50. 2005.

· “*Measuring Impacts on Soils by Human Activity in an Antarctic Special Protected Area*”, P. Tejedo, A. Justel, E. Rico, J. Benayas y A. Quesada. Terra Antarctica Reports, 11, 57-62. 2005

4. Materiales

4.1. Imágenes

El material de partida son 8 imágenes radar de resolución media (150 m) captadas por el sensor ENVISAT ASAR en el modo Banda Ancha (*Wide Swath*). Las fechas en las que las imágenes fueron tomadas, que cubren el inicio del periodo del deshielo, y las principales características de cada una, se detallan a continuación:

Noviembre 2007

L	M	X	J	V	S	D
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Diciembre 2007

L	M	X	J	V	S	D
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Figuras 17. Calendarios que muestran las fechas de las imágenes disponibles resaltadas en azul.

Fecha	Fase	Ciclo	Órbita	Track	Pasada	Polarización
22.11.07	2	63	338	29951	Desc.	H/H
25.11.07	2	63	381	29994	Desc.	H/H
29.11.07	2	63	433	30046	Asc.	H/H
01.12.07	2	63	467	30080	Desc.	H/H
05.12.07	2	64	18	30132	Desc.	H/H
08.12.07	2	64	66	30180	Desc.	H/H
11.12.07	2	64	109	30223	Desc.	H/H
15.12.07	2	64	161	30275	Asc.	H/H

Figura 18. Características de los productos ASAR Wide Swath utilizados (extraídas de los metadatos de los archivos).

4.1.1. El sistema radar

Radar, el acrónimo del inglés de detección y localización por radio (*Radio Detection And Ranging*), es un **sensor activo** que emite radiación microondas y registra la porción reflejada tras interactuar con la superficie u objetos. La fuerza de la señal de retorno se utiliza para discriminar entre distintas cubiertas, a la vez que el tiempo de retraso entre la señal transmitida y reflejada permiten determinar la distancia al objetivo.

El sistema radar consta básicamente de un **transmisor**, un **receptor**, una **antena** y un **sistema electrónico** para procesar y recoger los datos. El transmisor genera pequeñas ráfagas de pulsos microondas a intervalos regulares, que son concentrados por la antena en un haz. La antena recibe la porción de energía transmitida que ha sido reflejada o dispersada por la superficie iluminada. A medida que el sensor avanza en su trayectoria el registro y procesamiento de las señales retrodispersadas da lugar a una imagen bidimensional.

El diseño de la mayoría de los sensores microondas permite, por otro lado, restringir la vibración de la señal transmitida y recibida a una sola dirección (horizontal o

vertical). En función de las distintas combinaciones de **polarización** del pulso transmitido y recibido existen dos tipos básicos:

- polarización similar: la energía transmitida y recibida se polarizan en la misma dirección. Transmite y recibe en horizontal (HH) o en vertical (VV).
- polarización cruzada: la energía transmitida se polariza en una dirección ortogonal a la recibida. Transmite y recibe horizontal y verticalmente (HV y VH).

La polarización permite representar una misma superficie como escenas diferentes con información complementaria, ya que la intensidad de dispersión de las ondas varía con la dirección.

Características de la región microondas

La **radiación microondas** abarca una parte importante del espectro que se describe tanto a través de su longitud de onda (comprendida entre 0,1cm y 1m) como por su frecuencia, y las franjas más usadas se nombran a partir de un código de letras:

Banda	Longitud de onda (cm)		Frecuencia (GHz)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
P	30	100	0,23	1
L	15	30	1	2
S	7,5	15	2	4
C	3,75	7,5	4	8
X	2,42	3,75	8	12,4
Ku	1,66	2,42	12,4	18
K	1,11	1,66	18	26,5
Ka	0,75	1,11	26,5	40
mm	0,1	0,75	40	300

Tabla 5. Bandas de la región microondas (Universidad Politécnica de Valencia, 2008).

En teledetección el uso de sensores microondas es más restringido que el de otros sensores ópticos o multispectrales, debido a que la emitancia natural de la superficie terrestre en esta región es baja, y las frecuentes interferencias entre señales emitidas, reflejadas y transmitidas la hacen difícilmente perceptible. La emisión de radiación artificial, sin embargo, permite optimizar las condiciones de adquisición de imágenes en función de los objetivos propuestos, aunque dada la gran cantidad de factores que intervienen en la señal de respuesta (ángulo, distancia, orientación, polarización, etc.) la interpretación posterior de los datos se vuelve más compleja.

Su principal ventaja es la transparencia de esta región del espectro a la absorción de radiación por parte de la atmósfera, debido que las longitudes de onda que abarca son superiores al tamaño normal de las gotas de agua. Por esta razón la medición remota se hace independiente de las **condiciones meteorológicas**, factor crítico en zonas con una cubierta nubosa casi permanente, como es el caso de las regiones tropicales o polares.

Al tratarse de un sensor activo, que emite su propia radiación, la observación tampoco queda restringida a la existencia de **condiciones de iluminación** óptimas, permitiendo la obtención de imágenes durante las largas noches de invierno polar.

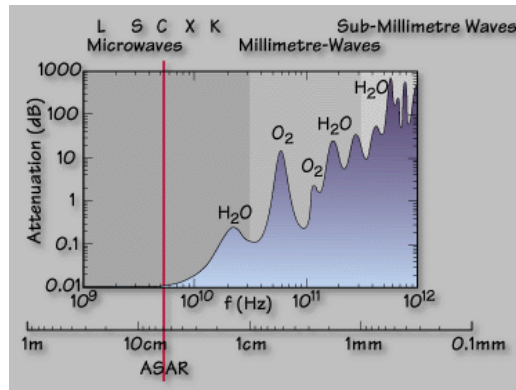
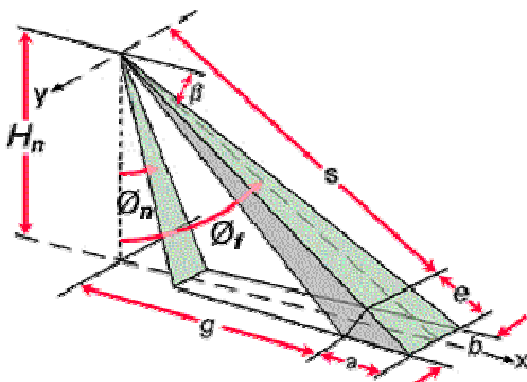


Figura 19. Atenuación de la radiación por parte de la atmósfera a lo largo del espectro (ESA¹⁰, 2008).

Características y parámetros de observación de las imágenes radar

El radar viaja a lo largo de su órbita dirigiendo el haz de microondas de forma oblicua para que ilumine una franja de la superficie a la derecha de la trayectoria que no incluye al nadir¹¹.



- Hn: Altura de vuelo
- β : Ángulo de depresión
- ϕ_n : Ángulo de incidencia del rango cercano
- ϕ_f : Ángulo de incidencia del rango lejano
- s: rango de inclinación
- g: rango del terreno
- a: resolución en la dirección del rango
- b: resolución en la dirección del azimut
- e: resolución en el rango de inclinación

Figura 20. Geometría de visión de las imágenes radar (CIAT¹², 2001).

El **ángulo de incidencia** es el que forman el haz del radar y una línea perpendicular a la superficie terrestre, el cual aumenta a medida que nos alejamos del nadir en una proporción que depende de la altura del sensor. El ángulo de incidencia local tiene en cuenta la inclinación local de la superficie iluminada, que influye de forma determinante en la brillantez de la imagen.

El **rango o distancia de inclinación** representa una línea imaginaria trazada entre la antena y el objetivo, que es la que usa el sistema radar para medir distancias. El **rango o distancia del terreno**, por el contrario, es la distancia horizontal verdadera a lo largo del terreno que corresponde a cada punto medido en rango de inclinación. La transformación del rango de inclinación requiere una corrección geométrica cuya escala varía a lo largo de la franja de la imagen.

¹⁰ ESA: European Space Agency.

¹¹ Nadir: intersección de la vertical que pasa por el centro del sistema óptico-electrónico de adquisición con el terreno.

¹² CIAT: Centro Internacional de Agricultura Tropical.

La **resolución espacial en la dirección del rango** depende de la longitud del pulso (**P**) y de la anchura de la franja de terreno iluminada. Para poder distinguir dos puntos de la superficie su distancia debe ser mayor que la mitad de la longitud del pulso.

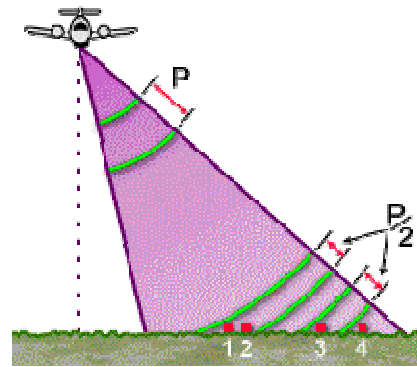


Figura 21. Resolución espacial en la dirección del rango. Los objetivos 1 y 2 no son separables mientras que 3 y 4 sí (CIAT, 2001).

La mayor anchura del haz en el rango lejano se equilibra con el mayor periodo de tiempo en que el objetivo es iluminado, de forma que la resolución en el rango de inclinación permanece constante independientemente de la distancia. Sin embargo, cuando la imagen es transformada a rangos del terreno su resolución varía con el ángulo de incidencia, disminuyendo con inclinaciones crecientes.

Este parámetro puede mejorarse reduciendo la longitud del pulso a partir de ciertas restricciones en el diseño del sensor.

La **resolución en la dirección del azimut** disminuye al aumentar la sección angular del haz, que es inversamente proporcional a la apertura de la antena, y la distancia al sensor en el rango de inclinación. Para que dos objetos puedan ser identificados de forma independiente, deben estar separados en la dirección del azimut por una distancia mayor al ancho del haz (el cual es proporcional a la distancia entre la antena y el objeto e inversamente proporcional a la longitud de onda utilizada).

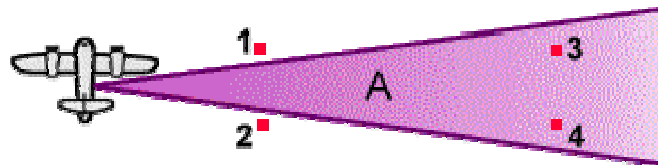


Figura 16. Resolución espacial en la dirección del azimut. Los objetivos en rango cercano se separan (1 y 2), pero los de rango lejano no (3 y 4), (CIAT, 2001).

La resolución en esta dirección está por lo tanto limitada por la longitud del instrumento, cuyas dimensiones quedan restringidas a la capacidad de transporte de las plataformas.

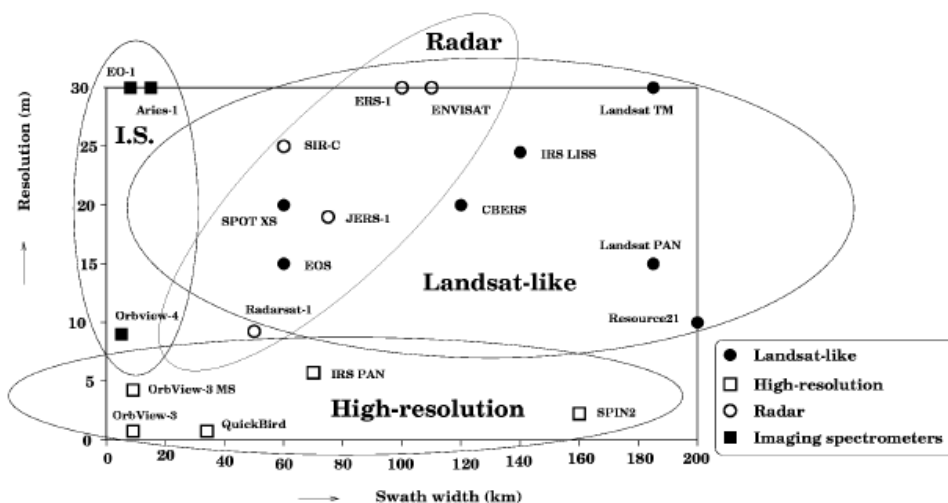


Figura 23. Relación entre resolución espacial y anchura de la franja de terreno cubierta por distintos tipos de sensores (B. Van Leeuwen y R. D. Vargas. UNESCO RAPCA, 2008).

La **apertura** designa al espacio empleado para recoger la energía reflejada, que en el caso de sistemas radar es la antena. En los sensores radar pueden distinguirse dos grandes tipos de apertura, que determinan la resolución espacial finalmente alcanzada:

- Radar de Apertura Real (RAR): equipo de diseño simple y fácil procesamiento de los datos cuya apertura se corresponde con la longitud física de la antena. En estos sistemas solo se procesa la altitud (y no la fase) de cada eco de retorno, de forma que la creación de una imagen implica únicamente la transmisión de un pulso y recepción de su señal dispersada.

Para aumentar la resolución espacial, el ancho del haz emitido debería ser muy superior a la longitud de onda utilizada, lo que requiere antenas de dimensiones impracticables. Por ello su resolución no es muy buena, especialmente en el rango cercano y para misiones de baja altitud y longitudes de onda pequeñas.

- Radar de Apertura Sintética (SAR): aprovecha el movimiento de la plataforma para sintetizar, mediante un elaborado registro y procesamiento de los ecos radar, una gran antena que permita una elevada resolución azimutal a pesar de las dimensiones físicas reales de la antena.

La amplitud y fase de las señales de retorno de un objetivo se registran durante todo el periodo de tiempo en el que éste se encuentra dentro del haz de la antena en movimiento. La distancia recorrida por el sensor desde el punto en que el objetivo entra en el haz hasta que sale determina la longitud efectiva de la antena sintética.

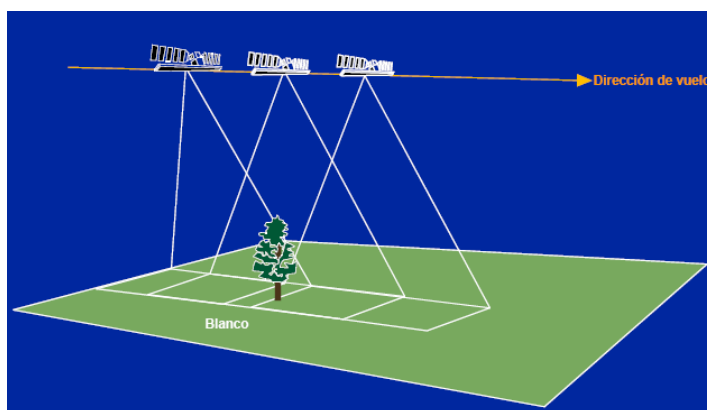


Figura 24. Apertura sintética de un sistema radar (CCRS, 2008).

Distorsiones geométricas de las imágenes radar

La geometría de visión de todos los sensores da lugar a distorsiones, que en el caso del radar se deben a la observación lateral y al hecho de que es un dispositivo diseñado para medir distancias.

La **distorsión** tiene lugar **en la dirección del rango de inclinación**, sobre el cual se calculan las distancias, debido a que el ángulo de observación produce una compresión de los objetos en el rango cercano y una variación creciente de la escala de la imagen a lo largo del rango. Las distancias a rangos de la tierra pueden

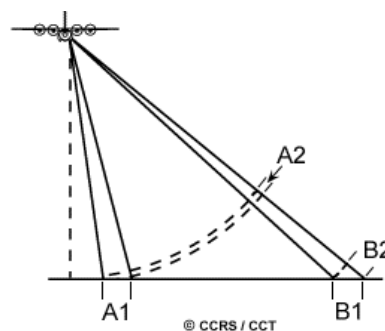


Figura 25. Distorsión de las imágenes en el rango de inclinación (CCRS, 2008).

calcularse de forma correcta usando reglas de trigonometría para corregir las distorsiones de los objetos.

El **desplazamiento del relieve** es un tipo de distorsión geométrica que modifica la disposición de los objetos en la dirección perpendicular a la trayectoria del vuelo, de forma que los más altos aparecen más cerca del sensor. En función del ángulo de incidencia local tienen lugar distintos tipos y grados de desplazamiento del relieve:

- Acortamiento del relieve (*foreshortening*): consiste en la compresión aparente de los objetos elevados de la escena que se encuentran inclinados hacia el radar, los cuales aparecen brillantes en la imagen. La distorsión es máxima cuando el ángulo que forman la pendiente y el haz del radar es ortogonal (el ángulo de incidencia local resultante es cero), lo que hace que la base, pendiente y cima de una colina se observen de forma simultánea, ocupando la misma posición en la imagen.

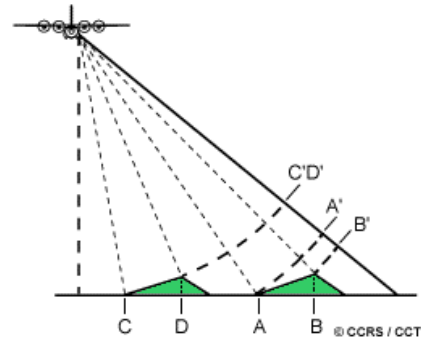


Figura 26. Acortamiento del relieve (CCRS, 2008).

- Inversión por relieve (*layover*): sucede cuando el haz alcanza antes la parte superior de un objeto que la inferior, de forma que la energía reflejada por la porción más elevada se recibe antes. Al procesar la imagen, la parte superior del objeto se verá desplazada por encima de su base.

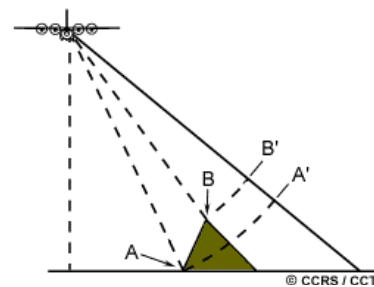


Figura 27. Inversión por relieve (CCRS, 2008).

En general, la inversión por relieve es más pronunciada en geometrías de visualización con ángulos de incidencia pequeños, tales como las que se utilizan en los satélites radar.

- Sombra en las imágenes: la superficie del terreno que el radar no es capaz de iluminar se representa como sombra (en tonos muy oscuros), ya que no se recibe señal de ella. Las sombras aparecen detrás de elementos verticales o pendientes abruptas dispuestas a lo largo del alcance, indicando la dirección de iluminación del radar y la altura del objeto, lo que facilita la interpretación del relieve.

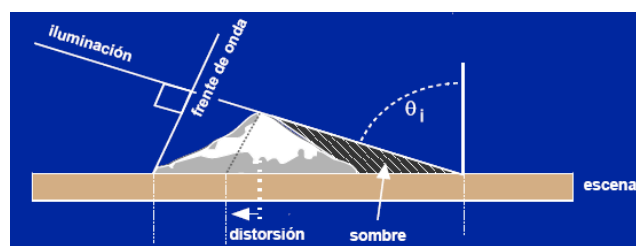


Figura 28. Formación de sombras (Raney, 1998).

Al aumentar el ángulo de incidencia en la dirección del alcance, la iluminación más oblicua induce sombras más prominentes a medida que nos alejamos del radar.

Factores que afectan a la dispersión microondas

Entre los factores que afectan a la dispersión de las microondas pueden distinguirse, por un lado, aquellos relacionados con las **propiedades de la cubierta** (propiedades dieléctricas, rugosidad de la superficie y geometría del terreno) y por otro los que tienen que ver con los **parámetros de observación** (banda empleada, ángulo de incidencia y polarización).

A continuación se describe brevemente la forma en la que los distintos factores influyen en la interacción de la radiación microondas con la superficie y, más concretamente con las cubiertas heladas.

La señal captada por el radar viene dada por la siguiente expresión (Chuvieco, 1996):

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}$$

- Potencia retro-dispersada (**Pr**)
- Potencia emitida por el radar (**Pt**)
- Factor de ganancia de la antena (**G**)
- Distancia entre el sensor y la cubierta (**r**)
- Sección eficaz de retro-dispersión (**σ**)

La sección eficaz de retro-dispersión depende principalmente de la naturaleza del sustrato, que determina las **propiedades eléctricas** de la cubierta. La constante dieléctrica de la mayoría de los materiales aumenta con el contenido de humedad, que como consecuencia aparecen más brillantes en la imagen radar.

La **rugosidad**, que aumenta la dispersión de la radiación y por tanto la intensidad de la respuesta, depende de la estructura de la superficie, pero longitudes de onda y ángulos de incidencia elevados atenúan este factor.

Las superficies horizontales lisas reflejan casi toda la radiación con un ángulo igual al ángulo de incidencia (**reflexión especular**), de forma que casi toda la energía reflejada escapa del detector y aparecen oscuras en la imagen. Las superficies rugosas, por el contrario, reflejan en muchas direcciones (**reflexión difusa**) debido a las irregularidades de su estructura y se presentan con tonos brillantes.

Por otro lado, los objetos geométricos formados por caras que se intersectan entre sí con ángulos rectos modifican el ángulo de reflexión de la energía incidente (**reflexión angular**). La señal de respuesta captada depende de la orientación de la superficie respecto a la dirección de iluminación, siendo su apariencia más brillante cuanto más perpendicular sea ésta.

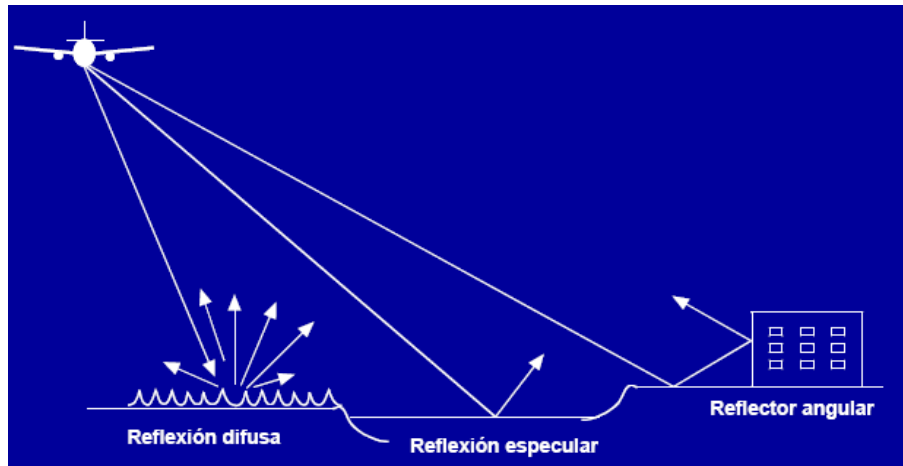


Figura 29. Tipos de reflexión de la radiación radar (CCRS, 2008).

La **pendiente y orientación** del terreno determinan el ángulo de incidencia respecto al flujo de radiación, alterando por tanto la señal recogida.

Los **ángulos de incidencia** elevados disminuyen las distorsiones del terreno y, unidos a longitudes de onda largas, proporcionan información extra de las brillantes pendientes abruptas, ya que permiten al pulso penetrar a cierta profundidad. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia en la dirección del rango, la dispersión superficial también disminuye (a una tasa menor en el caso de superficies rugosas), reduciendo a su vez tanto la rugosidad como la señal de retorno.

Por otra parte, la señal de respuesta del radar muestra una dependencia angular debido a los mecanismos de dispersión y a las interacciones con las superficies, ofreciendo la posibilidad de elegir la configuración más óptima en función de las distintas aplicaciones.

Finalmente la **polarización**, que supone la restricción de la vibración de la señal transmitida y recibida a una sola dirección, influye en el eco del radar, que es selectivo a la dirección de propagación.

La polarización más adecuada para discriminar entre agua y hielo es la HH.

Características dispersivas de los distintos tipos de hielo

El radar es por tanto sensible a las **propiedades físicas del hielo** (temperatura, salinidad, microestructura y rugosidad de la superficie), que dependen de su concentración, tipo, edad y espesor y varían con el tiempo. El espesor no se puede medir directamente pero puede estimarse identificando los distintos tipos de hielo en función de la edad (CCRS):

- Hielo de un año: la radiación microondas no puede penetrar en profundidad, pero sí es sensible a la rugosidad de su superficie. Las superficies de hielo **liso** aparecen en la imagen en tonos oscuros debidos a su reflexión especular, mientras que el hielo **rugoso o con deformaciones** aparece brillante por las reflexiones múltiples que genera su superficie.
- Hielo de varios años: tiene una **menor constante dieléctrica** debido a la eliminación de impurezas durante los ciclos sucesivos de deshielo. Esto permite

una **mayor penetración** de las microondas en el volumen del hielo, que se presenta con tonos brillantes en las imágenes.

Por otro lado, la señal característica de las superficies heladas es modificada por el **derretimiento de su capa superficial**, alterando la capacidad para discriminar los distintos tipos de hielo en función de la estación del año y región geográfica. En verano, cuando la temperatura es mayor y el hielo presenta una capa superficial de nieve saturada, pueden usarse documentos históricos, datos sobre la climatología del hielo o condiciones meteorológicas actuales para identificar el agua en sus distintos estados. La presencia de aerosoles marinos en la superficie también modifica la apariencia y el brillo de las cubiertas heladas.

4.1.2. El satélite ENVISAT

Las imágenes con las que se llevó a cabo el estudio son productos ASAR, un sensor integrado en la misión ENVISAT-1, de la Agencia Espacial Europea (ESA), lanzado el 1 de marzo de 2002 a bordo del cohete Ariane 5. ENVISAT es un satélite de observación de la tierra cuyo objetivo es proporcionar mediciones de la atmósfera, el océano, la tierra y el hielo para apoyar investigaciones en ciencias de la tierra y el monitoreo de los procesos ambientales y climáticos.

Los principales parámetros que definen la órbita de este satélite se recogen en la siguiente tabla:

Órbita	Polar síncrona con el sol (SSO)
Altitud	800 km aproximadamente
Inclinación	98,55°
Periodo	100 min
Ciclo de repetición	35 días (cobertura global cada 3 días salvo para RA-2 y MWR, que crean una malla densa de medidas)
Desviación máxima	+/- 1 km de la franja terrestre y +/- 5 min de la hora solar local media (MLST) al atravesar el ecuador

Tabla 6. Parámetros de la órbita del satélite ENVISAT (ESA, 2008).

ENVISAT lleva a bordo un conjunto de instrumentos con objetivos específicos y complementarios entre sí, que operan en un amplio rango de longitudes de onda:

- **MIPAS** (Interferómetro Michelson para el Sondeo Atmosférico Pasivo);
- **GOMOS** (Monitorización Global de Ozono por Ocultación de Estrellas);
- **SCIAMACHY** (Espectrómetro de Absorción con Imágenes de Escaneo para Cartografía Atmosférica);
- **MERIS** (Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media);
- **AATSR** (Radiómetro Avanzado de Exploración Longitudinal);
- **ASAR** (Radar Avanzado de Apertura Sintética);
- **RA-2** (Altimetro Radar 2);
- **MWR** (Radiómetro Microondas);
- **DORIS** (Orbitografía Doppler y Radioposicionamiento Integrado por Satélite);
- **LRR** (Retro-Reflector Láser)

Las aplicaciones de estos instrumentos sobre la cubierta de hielo se recogen en la siguiente tabla:

	Cartografía	Movimiento	Procesos	Navegación de barcos	Temperatura	Cubierta de nieve	Topografía	Dinámica
ASAR								
GOMOS								
RA-2								
MERIS								
MIPAS								
MWR								
LRR								
SCIAMACHY								
AATSR								
DORIS								

Tabla 7. Aplicaciones de los sensores a bordo de ENVISAT sobre aspectos relacionados con el hielo (ESA, 2008).

4.1.3. El Sensor ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*)

ASAR es un **sensor activo** que emite radiación en la banda C (5,331GHz) de la región microondas y mide la proporción que ha sido retro-dispersada por superficie terrestre. A partir de esta información crea una imagen bidimensional del terreno a la derecha de su trayectoria con una extensión potencialmente ilimitada en la dirección del azimut pero limitada en la dirección del rango por la anchura del haz.

La **Apertura Sintética** permite optimizar la resolución espacial en la dirección del azimut sin necesidad de aumentar las dimensiones del instrumento. Consta de 320 módulos T/R (Transmisión/Recepción) dispuestos en 20 filas a lo largo de la antena que envían varios pulsos de señal sobre un mismo punto de la superficie, de forma que la apertura queda determinada por la distancia recorrida por el sensor entre el primer y último pulso enviados al objetivo.

Las fases de las señales de respuesta, que cambian de forma continua al aumentar la distancia del radar al objetivo (rango de inclinación) con el movimiento de la plataforma, son posteriormente corregidas usando las leyes de la geometría de observación.

La **duración de los pulsos** enviados condiciona tanto la resolución espacial en la dirección de alcance como la resolución radiométrica alcanzada pero en sentidos opuestos. Por un lado, la resolución en la dirección del rango se optimiza con pulsos de corta duración. Y por otro los pulsos cortos, al transmitir una menor cantidad de energía, aumentan la razón señal/ruido, disminuyendo la resolución radiométrica. Por otra parte, la frecuencia de repetición de pulsos (PRF) no puede ser tan alta como para que dos señales de respuesta lleguen simultáneamente al sensor.

Para optimizar la resolución de rango sin perder resolución radiométrica ASAR utiliza una modulación de frecuencia lineal (*chirp*) que genere un pulso lo suficientemente largo como para preservar la resolución radiométrica, y que

posteriormente es comprimida a una anchura definida por la resolución de rango deseada.

La **selección activa de fase** permite controlar la amplitud y fase de la radiación transmitida y ponderar las señales recibidas de forma independiente para las distintas regiones de la antena.

Modos de operación de ASAR

La capacidad para controlar de forma independiente las distintas regiones de la antena ofrece una gran flexibilidad en la generación y características del haz, permitiendo al sensor operar en 5 modos distintos basados en dos técnicas básicas de medida:

- Modos Mapa de Franjas (Stripmap) (*Stripmap*): en los modos Imagen (*Image*) y Olas (*Wave*) el ancho de la imagen se selecciona modificando el ángulo de incidencia y elevación del haz hasta cierto límite impuesto por la aparición de ambigüedades. La observación se lleva a cabo a través de una de las 7 bandas predeterminadas con polarización HH o VV.
- Modos ScanSAR: los modos Banda Ancha (*Wide Swath*), Monitorización Global (*Global Monitoring*) y Polarización Alternante (*Alternating Polarization*) cubren una franja de terreno más ancha gracias al uso de un haz orientable electrónicamente en función de la elevación. Las imágenes son sintetizadas a partir de distintas sub-bandas adyacentes obtenidas por el escaneo secuencial del haz en sus distintas posiciones y ángulos de incidencia, que dan lugar a una cobertura total.

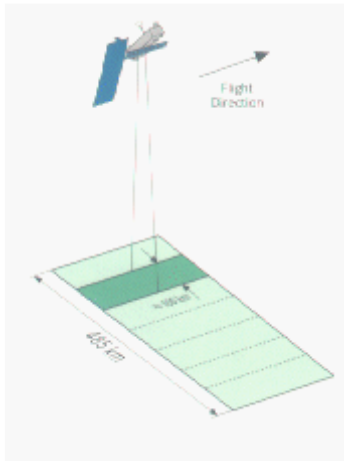


Figura 30a. Modo Mapa de Franjas de ENVISAT ASAR (ESA, 2008).

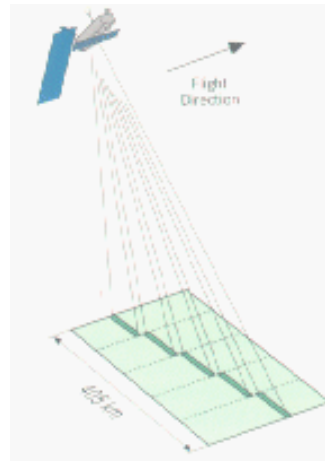


Figura 30b. Modo ScanSAR de ENVISAT ASAR (ESA, 2008).

Modos de operación de ENVISAT ASAR					
	Image	Alternating Polarization	Wide Swath	Global Monitoring	Wave
Anchura del terreno cubierta	de 56km a 100km	de 56km a 100km	405km	405km	Viñetas de 5km
Resolución espacial	30m x 30m	30m x 30m	150m x 150m	1km x 1km	30m x 30m
Polarización	HH o VV	HH/VV, HH/HV o VV/VH	HH o VV	HH o VV	HH o VV

Tabla 8. Características de los distintos modos de operación del sensor ASAR (ESA, 2008).

4.1.4. El modo *Wide Swath*

La **técnica ScanSAR** permite ampliar la banda de las imágenes ASAR *Wide Swath Mode* (WSM) hasta una anchura de 405 km obteniendo una resolución media (150 m) en polarización HH o VV.

La operación está dividida en distintos bloques de pulsos que obtienen respuesta de una de las 5 sub-bandas predeterminadas, la cual es procesada para dar lugar a una sección de la imagen. El sensor cambia entonces la orientación del haz para iluminar una sub-banda distinta y continúa de esta forma hasta que la anchura completa de la banda ha sido cubierta, momento en el cual vuelve a la sub-banda inicial y el ciclo de escaneo comienza de nuevo. La operación debe repetirse lo suficientemente rápido a lo largo del conjunto completo de sub-bandas para que las secciones de cada sub-banda sean contiguas y se superpongan.

Los productos de Nivel 1b y Resolución Media ASAR en el modo Banda Ancha son generados de forma sistemática a partir de datos de Nivel 0 recolectados cuando el instrumento está funcionando en este modo (usando la técnica ScanSAR). Incluyen correcciones del rango de inclinación a los rangos de la tierra y cubren un área continua a lo largo de la banda.

Sus principales características pueden resumirse en la siguiente tabla:

	<i>ASAR Wide Swath Medium Resolution Image</i>
Id (identificación) del producto	ASA_WSM_1P
Tiempo de envío	Producto NRT (en tiempo casi real) disponible 3 horas después de la toma de datos desde estaciones PDHS (Estaciones de Manejos de Datos de Carga Útil) o NS-Es (Estaciones Nacionales proveedoras de Servicios ESA). Producto OFL (fuera de línea) 3 días después.
Cobertura	<i>Stripline</i> (franja) máxima de 406 km (rango) por 4000 km (azimut). Tamaño mínimo del producto extraído de 400 km en la dirección del azimut
Tasa de transferencia	Un producto <i>stripline</i> por segmento adquirido (máximo de 10')
Muestreo geométrico	Espaciado de píxel de 75 m x 75 m
Resolución geométrica	150 m x 150 m aprox.
Precisión geométrica	Precisión absoluta de localización: 150 m + error del dato de la órbita

Resolución radiométrica	De 1'5 dB a 3'5 dB
Datos auxiliares incluidos	Vectores de estado de la órbita, parámetros de correlación del tiempo y ADS (conjuntos de Datos de Anotación) con los parámetros principales de procesamiento, centroide Doppler, <i>chirp</i> , elevación de la antena, malla de geolocalización y PQS (Servicios de Calidad de los Productos).
Algoritmos usados	Descompresión de los datos; corrección de los datos en bruto; construcción de réplicas y estimación de la potencia, procesamiento de la calibración del pulso, cálculo de la función de elevación de la antena, estimación de la potencia de ruido, formación de la imagen (algoritmo SPECAN); geolocalización.

Tabla 9. Características principales de los productos “*ASAR Wide Swath Medium Resolution Image*” (ESA).

Aplicaciones de *ASAR Wide Swath* a la detección remota del hielo

Las imágenes de franja ancha y resolución media WSM resultan adecuadas para aplicaciones que requieren una gran cobertura de área, observaciones frecuentes, así como datos consistentes para estudiar la evolución de procesos que suceden a una escala temporal limitada.

Como se ha mencionado anteriormente, la gran independencia frente a las condiciones meteorológicas y de iluminación proporcionan a los sistemas radar una **gran resolución temporal**. En el caso de las imágenes ASAR la órbita del satélite ENVISAT tiene además un ciclo de repetición de 35 días que, junto con la capacidad de dirigir el haz en la dirección deseada aumentan el potencial de cobertura temporal hasta un periodo de revisita de 3 días en latitudes altas, donde la densidad de observaciones es mayor.

Por ello este sensor resulta de especial interés para el estudio de la cubierta de nieve, de la dinámica de las capas de hielo, el monitoreo de icebergs y otras aplicaciones en las que la cobertura espacial y temporal son de especial relevancia.

En concreto, los productos ASAR WSM se consideran los más adecuados para estudiar los límites del hielo, su exportación debida a desprendimientos (con imágenes cada 2 semanas), y extensión de las zonas de derretimiento (durante 2 semanas en verano).

Sus datos de **polarización múltiple** ofrecen la posibilidad de discriminar los distintos tipos de hielo, especialmente durante los periodos de formación y derretimiento, determinar la concentración, grosor y características del hielo, y crear algoritmos de clasificación o una cartografía de las masas de hielo.

4.1.5. Adquisición de Imágenes

Los productos de la Agencia Espacial Europea pueden incluirse en dos categorías, que determinan las condiciones de distribución de los datos:

- Categoría 1: datos usados para investigaciones a largo plazo sobre aspectos relacionados con las ciencias de la tierra, investigación y desarrollo de usos operativos futuros y aplicaciones internas de la ESA.
- Categoría 2: comprende cualquier otro tipo de datos que no se incluyen en la categoría 1, incluyendo datos operativos y comerciales dependen de la categoría en la que se incluyen.

Hay cuatro formas de solicitar el uso de datos de categoría 1, en función del tipo de datos demandado.

- Registro rápido: para datos adquiridos, generados y distribuidos en línea de forma sistemática. El registro es sometido a un proceso de revisión y tras una semana aproximadamente se manda una notificación al usuario.
- Propuesta: para datos sujetos a determinadas restricciones de adquisición o distribución. El proceso es sometido a una evaluación por pares, cuyos resultados son comunicados 8 semanas después. Si el resultado de la evaluación es positivo la propuesta es aceptada una vez confirmada su viabilidad en términos de disponibilidad de datos y servicios.
- Anuncio de Oportunidad (AO): datos que forman parte de un tema determinado contemplado en los anuncios de oportunidad (convocatoria para usar los datos o proporcionar elementos de utilidad a una misión satélite). La notificación de la aceptación se envía varias semanas después del cierre de la convocatoria.
- Campañas de Observación de la Tierra (EO): conjuntos de datos disponibles en Internet o en los medios y a los que puede accederse registrando una solicitud a la ESA.

En cuanto a los datos de categoría 2, las entidades de distribución EMMA y SARCOM sólo ofrecen datos SAR y ASAR HR (de Alta Tasa).

Las imágenes utilizadas para llevar a cabo el proyecto forman parte de una Campaña de Observación de la Tierra, y fueron adquiridas por el investigador principal, José Antonio Domínguez, mediante una propuesta para la adquisición de datos de categoría 1, que fue registrada en el portal EOPI (*Earth Observation Principal Investigation Portal*) de la ESA con el nombre C1P.5123. Su aceptación permitió el acceso al siguiente conjunto de datos a través de las contraseñas pertinentes:

Conjuntos de datos	Dirección de los servidores
Datos ASAR recientes	http://oa-es.eo.esa.int http://oa-ks.eo.esa.int http://oa-ip.eo.esa.int
ASA_GM1_1P	http://oa-es.eo.esa.int http://oa-ks.eo.esa.int
ASA_WVS_1P	ftp://oa-es.eo.esa.int ftp://oa-ks.eo.esa.int
ASA_WVS_1P (archivo completo)	eftp.ifremer.fre
ASA_WVW_2P	http://oa-ks.eo.esa.int
ASA_WVW_2P (archivo completo)	eftp.ifremer.fre
PROBA.CHRIS.1A	http://oa-es.eo.esa.int/ra

Tabla 10. Datos a los que se tuvo acceso a través de la propuesta de adquisición C1P.5123

4.2.. Softwares utilizados

4.2.1. Eoli-sa 5.3.1.

La localización de las imágenes disponibles se llevó a cabo a través del software Eoli-sa (*Earthnet OnLine Interactive Stand Alone*), un buscador web estándar que permite acceder al catálogo de la Agencia Espacial Europea y localizar, visualizar y solicitar productos de observación de la Tierra de distintas misiones (ENVISAT, ERS, Proba, ALOS, IRS, JERS, KOMPSAT, Landsat, Nimbus, NOAA, SCISAT/ACE, SeaStar, SPOT, Image 2006 y MODIS Terra/Aqua).

Para realizar una búsqueda debe seleccionarse una de las colecciones disponibles que aparecen a la izquierda de la pantalla, un área de interés y un rango de fechas.

The screenshot shows the Eoli-sa web interface. On the left, the 'Collections' sidebar is expanded to 'ENVISAT ASAR', with sub-options like 'ASAR Global Monitoring' and 'ASAR Wave Mode'. Below this, the 'Query Mode' is set to 'Standard'. The 'Date' section shows a range from '03-Nov-2007' to '29-Feb-2008'. The 'Area' section shows a rectangular selection with 'Center Lat/Lon (dd:mm:ss)' at '-62:30:00 -60:30:00' and 'Height/Width (Km)' at '100.00 100.00'. The main map displays Livingston Island with a red rectangular search area. Below the map is a table of search results:

Display	Mosaic	Id	Mission	Sensor	Product	Status	Star
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-03 03:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-03 12:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-06 12:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-07 09:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-09 04:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-09 12:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-12 12:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-15 12:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-16 11:...
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10	Envisat	ASAR/WS	AS_A_WS	Archived	2007-11-18 12:...

Figura 31. Búsqueda de imágenes de la isla de Livingston a través del catálogo on-line Eoli-sa.

La búsqueda de imágenes mediante el software Eoli-sa permitió elaborar un calendario con el listado de productos de distintos sensores para la época del deshielo (de noviembre a febrero) de los dos últimos años. En caso de que fuese necesario, podrían ser usadas para contrastar los resultados a partir de las imágenes ASAR WSM con otro tipo de imágenes o como información complementaria para estudios posteriores más exhaustivos.

Imágenes *ASAR Wide Swath* encontradas y posibles aplicaciones

La mayor parte de las imágenes encontradas son *ASAR Wide Swath*, que aumentarían la consistencia de los datos y la validez de los resultados del análisis, y permitirían abarcar todo el periodo que dura el deshielo.

Dentro del contexto del Proyecto Limnopolar, también sería interesante usar estas imágenes para predecir la escorrentía total por cuantificación de la acumulación de nieve o medir su humedad relativa. , y construir modelos a través de y.

Por otro lado, la recopilación de datos mensuales, estacionales y anuales sobre la extensión de las cabeceras y concentración del hielo, que constituye un indicador del cambio climático, permitiría crear bases de datos climatológicas y modelos para predecir futuras tendencias.

Imágenes de otros sensores y posibles aplicaciones

Además del *ASAR Wide Swath*, a través de Eoli-sa se encontraron imágenes de otros modos de ASAR y de otros sensores durante el periodo de deshielo que comprende el actual estudio. A continuación se detalla una breve descripción de los sensores de los que se encontraron imágenes con su posible utilidad dentro del marco del proyecto Limnopolar:

- Modo Imagen de ASAR: modo de operación que usa una de las 7 bandas predeterminadas de ASAR, con ángulos de incidencia de 15° a 45°, en polarización HH o VV, para crear imágenes de alta resolución espacial (30 m).

Sus características permiten obtener información más detallada, elegir los ángulos de incidencia más adecuados (las bandas IS3 e IS7 son las óptimas para discriminar entre agua y hielo) y realizar un análisis multi-angular. Puede estudiarse además el movimiento del hielo por rastreo de rasgos y la morfología de su superficie (líneas de flujo, grietas, hendiduras, etc.). El problema es que ninguna de las imágenes disponibles en esas fechas cubre la isla de Livingston entera.

- Modo Olas de ASAR: detecta cambios en la dispersión de la superficie del mar debido a la acción de las olas, por lo que sus imágenes no tienen mucha relevancia para el objetivo de estudio.

- Modo Monitorización Global de ASAR: usa la misma técnica y franjas que el modo Banda Ancha para obtener productos de gran cobertura (hasta una órbita entera) a cambio de una baja resolución espacial (1 km).

Dada la escala de trabajo sus productos no resultan demasiado útiles

- Modo Polarización Alternante: crea productos de alta resolución (30m salvo para la banda 1) con polarización dual (HH/VV) o cruzada (HH/HV o VV/VH) entre una sub-apertura y otra del radar.

El uso de diferentes polarizaciones facilitaría la clasificación de los distintos tipos de hielo, pero el catálogo sólo ofrece una imagen durante el periodo considerado, que además no incluye la Península de Byers.

- AATSR: Radiómetro Avanzado de Exploración Longitudinal que mide la Temperatura de la Superficie del Mar (SST). Ofrece una cobertura diaria de la línea de costa antártica y cobertura total de la región cada 3 días.

Los canales del térmico y el visible pueden usarse para estudios de la criosfera (monitorización de la cubierta de nieve, variaciones anuales, localización de los límites y otros elementos de la plataforma antártica y cartografía del hielo y de la corteza por altimetría radar). El análisis de los procesos de circulación térmica y de materia entre el océano, el hielo y la atmósfera permitiría por otro lado comprender el funcionamiento de los ecosistemas lacustres y sus procesos de intercambio con el entorno. Su resolución (1 km) sin embargo no resulta adecuada para la escala de estudio.

- MERIS: espectrómetro de imágenes con 15 bandas espectrales programables en anchura y posición. Este sensor óptico multiespectral suele usarse para inferir la distribución espacial y variación estacional de la actividad biológica y biomasa fitoplanctónica en las capas superiores de las masas de agua, que juegan un importante papel en la fijación de CO₂.

Existe un número considerable de productos MERIS, pero su resolución espacial (300 m) no es suficiente para detectar los cuerpos de agua de la Península de Byers y, al descartar aquellas imágenes en las que la cubierta nubosa impide visualizar la superficie terrestre, sólo resultan útiles unas 2 mensuales que, sin embargo, permitirían analizar de forma complementaria otros aspectos de la superficie imperceptibles desde la región microondas.

- Altímetro Radar: proporciona medidas sobre la distancia del satélite a la superficie de la tierra para determinar el nivel del mar y la topografía terrestre.

El número y distribución de sus imágenes (de 2 a 4 por mes) ofrecen la posibilidad de crear un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta precisión a través de la topografía inferida que aporte información adicional sobre la superficie y permita analizar la dinámica y extensión temporal, y calcular el balance de masa y el grosor de la cubierta de hielo.

- MWR: radiómetro microondas que mide la humedad atmosférica para corregir la señal del altímetro radar en su recorrido por la troposfera. Los dos polos son los únicos lugares donde el MWR puede usarse para cartografiar propiedades radiométricas (emisividad de la superficie, humedad del suelo y balance energético), debido a la sequedad de la atmósfera. Además pueden estudiarse las características de su cubierta y la evolución de su crecimiento y deshielo.

Hay unos 20 productos por periodo de deshielo, algunos de los cuales corresponden a la misma fecha, pero no es posible su visualización previa, ya que el área cubierta por cada una es una línea que atraviesa la isla.

- MIPAS: el Interferómetro Michelson para el Sondeo Atmosférico Pasivo es un espectrómetro transformado de Fourier que mide el espectro de emisión de los componentes de la atmósfera media y alta mediante 16 barridos secuenciales a diferentes alturas tangenciales, por lo que la información que pudieran proporcionar sus imágenes escapa de los objetivos del proyecto.

- SCHIAMACHY: consta de 8 canales de alta resolución espectral y amplio rango de longitudes de onda con los que mide la radiación transmitida, dispersada o reflejada por gases traza en la troposfera y estratosfera.

Sus imágenes tampoco son útiles por la misma razón que el sensor anterior.

· **CHRIS PROBA**: Espectrómetro Compacto de Imágenes de Alta Resolución (hasta 20 m) que consta de 19 bandas espectrales programables. Cada imagen está constituida por 5 barridos consecutivos con diferentes ángulos de visión.

La gran resolución espacial y espectral confiere a sus imágenes un gran valor, pero sólo hay una disponible, que además cubre el área de estudio de forma parcial.

· **ALOS PALSAR**: Radar de Apertura Sintética en Banda L con Selección de Fase capaz de realizar interferometría de pasadas repetidas. Tiene 3 modos de observación: Alta Resolución (entre 7 m y 88 m, en función de la polarización), Modo Scan SAR (que cubre un área de 250 km a 350 km), y Modo Polarimétrico (varias opciones de polarización dual y cruzada).

Al tratarse de un sensor radar sus aplicaciones son las mismas que las de ASAR, pero su mayor resolución permitiría obtener información más detallada. El problema es que sólo se dispone de dos imágenes de una misma fecha que, unidas en un mosaico, completarían el área de la isla.

4.2.2. BEAM 4.1

El software BEAM 4.1, (*Basic ENVISAT toolbox for AATSR and MERIS*) es un conjunto de herramientas ejecutables y APIs (Interfaces para la Programación de Aplicaciones) diseñados para la utilización, visualización y procesamiento de productos ENVISAT MERIS, AATSR y ASAR, así como ERS ATSR y MODIS. El interés de este software reside en su libre acceso, en contraste con la mayoría de los programas de teledetección; sus aplicaciones sin embargo son bastante básicas y están especializadas en productos MERIS y AATSR, por lo que su utilidad es más bien la introducción al procesamiento de imágenes.

Sus principales componentes son:

- VISAT: aplicación para la visualización, análisis y procesamiento de productos de observación de la tierra.
- Un conjunto de procesadores científicos de datos ejecutables en línea de comandos o invocados desde VISAT.
- Una herramienta de conversión de productos que permite transformar los datos en bruto al formato BEAM-DIMAP estándar, a Geo-TIFF, HDF-5 o imágenes RGB.
- Un API Java que proporciona componentes para el desarrollo de aplicaciones relacionadas con la teledetección y permite la descarga de nuevos módulos de extensión BEAM.

Formato de los productos BEAM-DIMAP

Para poder visualizar y tratar productos ENVISAT ASAR éstos deben ser previamente importados al formato BEAM-DIMAP. Los productos generados por este software están formados por un conjunto de datos dispuestos en una composición de bandas raster que representan una o varias escenas de observación.

Su estructura es la siguiente:

- **Metadatos:** contienen información sobre el producto abierto y se almacenan como grupos anidados de elementos de metadatos, muchos de los cuales son necesarios para procesamientos posteriores.

Los metadatos de los productos ENVISAT están estructurados en los siguientes elementos:

- **MPH** (Cabecera Principal del Producto): información en formato ASCII y tamaño fijo común a todos los sensores de ENVISAT que identifica el producto y describe sus principales características:

- Identificación del producto: nombre del archivo (que describe el instrumento, modo y nivel de procesamiento), nivel de consolidación y número ID asociado al producto.

- Adquisición y procesamiento de los datos: cuándo y dónde fue adquirido, cuándo y con qué hardware/software fue procesado.

- Tiempo de los datos: UTC (Tiempo Universal Corregido) de inicio y fin de la toma de datos.

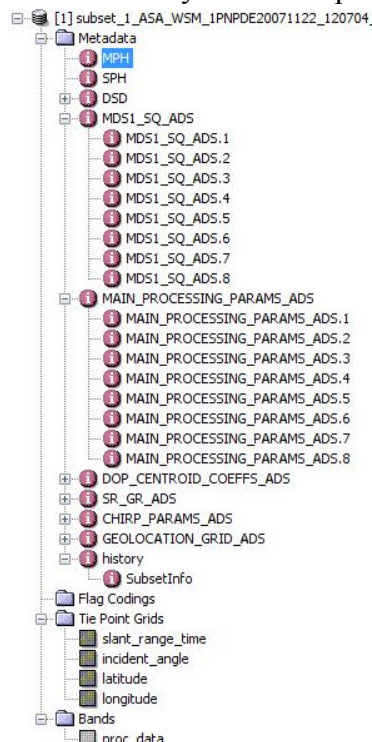
- Órbita de ENVISAT: posición exacta del satélite en el momento de la toma de datos.

- Conversión de SBT a UTC: conversión precisa de SBT (Hora Binaria del Satélite), sistema utilizado por el Paquete Fuente de los Instrumentos, al sistema convencional de tiempo UTC.

- Confianza de los datos del producto: calidad global (enumeración de los errores ocurridos durante el procesamiento). Su descripción detallada se localiza en la cabecera específica o en los PCD (Datos Confidenciales de los Productos).

- Tamaño del producto: tamaño preciso de varias estructuras del producto.

- **SPH** (Cabecera Específica del Producto): contiene información que describe al producto específico como un todo, pero también puede incluir información PCD o parámetros del procesamiento relevantes que se aplican a todo el producto. Como mínimo incluye un descriptor y al menos un DSD.



- **DSD** (Descriptores del Conjunto de Datos): describen y señalan los distintos conjuntos de datos adjuntos o las referencias externas relevantes para el producto (datos auxiliares usados en el procesamiento). Están formados por MDS (Conjuntos de Datos de Medida), ADS (Conjuntos de Datos de Anotación) o GADS (Conjuntos de Datos de Anotación Global).

- **DS** (Conjunto de Datos): uno o varios conjuntos expresados en formato binario mixto e integrados por uno o varios Registros del Conjunto de Datos (DSR). Su tamaño y número varía según el producto. Hay dos tipos:

- MDS (Conjunto de Datos de Medida): registros que contienen datos del instrumento o procesados.

- ADS (Conjunto de Datos de Anotación): registros con datos auxiliares.

Figura 32. Estructura de los productos BEAM DIMAP y de los metadatos asociados a los productos de ENVISAT visualizados desde la ventana “Product View” del software BEAM.

- **Codificaciones *flag***: son un tipo especial de metadatos que describen las etiquetas cualitativas o de clasificación almacenadas en este tipo de bandas. Las bandas *flag* permiten la exclusión de valores geofísicos en las estadísticas o la superposición de máscaras de bits creadas a partir de los valores de estas bandas.

- **Malla de puntos**: almacenan internamente datos auxiliares en una sub-malla regular.

- **Banda**: proporcionan valores de muestra, valores de los parámetros geofísicos o etiquetas cualitativas como funciones de la posición del píxel.

Todas las funciones de creación de imágenes, procesamiento y análisis son aplicables a la malla de puntos y a las bandas, ya que derivan del mismo tipo base de nodos de datos raster.

4.2.3. ENVI 4.2

La segunda y principal parte del estudio se centró en el tratamiento de las imágenes mediante el software ENVI 4.2, que permite extraer información precisa a partir de imágenes geoespaciales.

ENVI es un software comercial desarrollado por la empresa *ITT Visual Information Solutions*, que ofrece software integrados para el tratamiento de datos complejos.

Descripción de las herramientas del menú radar

ENVI tiene un módulo específico de RADAR con herramientas generales para imágenes de datos captados en estas frecuencias (productos ERS-1, JERS-1, RADARSAT, X-SAR, etc.), además de herramientas avanzadas para el análisis de sistemas de polarimetría completa (AIRSAR y SIR-C).

A continuación se describen los comandos disponibles desde este módulo y sus posibles aplicaciones a las imágenes ASAR.

- “*Open/Prepare Radar File*”: permite abrir archivos con formatos radar generales o específicos (de la misma forma que a través de “*File / Open External File / Radar*”). En el caso de las imágenes ASAR simplemente extrae la información de la cabecera y coloca el archivo en la “*Available Bands List*”.

- “*Radar Calibration*”: calibra radiométricamente los archivos de datos de ERS o RADARSAT a valores de brillo radar (β^0) en decibelios o, calculando el ángulo de incidencia a partir de un DEM, a valores de coeficiente de dispersión (σ^0).

En el caso de las imágenes ASAR habría que recurrir a fórmulas que permitiesen calibrar los valores digitales y buscar los parámetros necesarios en los archivos auxiliares correspondientes a esas imágenes.

- “*Antenna Pattern Correction*”: las variaciones en la ganancia de la antena se producen en la dirección del rango debido al patrón de rendimiento del instrumento. ENVI calcula y representa valores medios en el azimut para poder observar la variación media en la dirección del rango.

- “*Slant to Ground Range*”: remuestreo de imágenes generadas en rango de inclinación (debido a la observación lateral del radar), con una distorsión geométrica sistemática en la dirección del rango, a píxeles en el rango de la tierra, asumiendo un terreno llano. ENVI contiene herramientas de corrección específicas para SIR-C, AIRSAR y RADARSAT además de una genérica de radar, que abre el diálogo “*Slant to*

Ground Range Parameters” en el que deben introducirse los valores de los parámetros necesarios para el remuestreo (altitud del sensor, distancia del rango cercano desde el nadir y su posición en la imagen, y tamaño de píxel en el rango de inclinación).

Los modos Banda Ancha y Monitorización Global de ASAR ya han sido remuestreados durante su procesamiento, de forma que son adquiridos en rangos de la tierra y no requieren el uso de este comando. Sin embargo, esta herramienta también puede usarse para remuestrear las imágenes WSM a la geometría del rango de inclinación, lo que permitiría una corrección a rangos de la tierra más precisa mediante el uso de un DEM.

- *“Incidence Angle Image”*: crea una imagen de ángulos de incidencia calculados a partir de los datos de ángulos de rango cercano y lejano de imágenes AIRSAR, RADARSAT, SIR-C y datos radar genéricos, y asumiendo topografía llana.

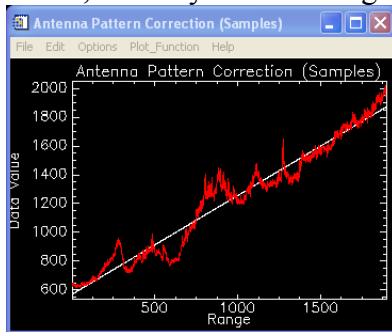


Figura 33a. Valores digitales medios a lo largo del rango (en rojo) y modelo utilizado para la corrección del patrón de la antena (en blanco).

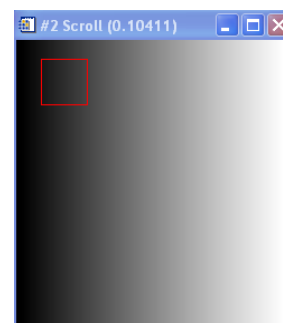


Figura 33b. Imagen de ángulos de incidencia creada a partir del producto ASAR completo correspondiente al 25.11.07.

Si se dispone de los datos necesarios, restando esta imagen a la original con *“Basic Tools / Band Math”* la corrección del patrón de la antena puede ser más precisa.

- *“Adaptive Filters”*: suprimen el ruido sin eliminar el contraste y detalle de la imagen calculando nuevos valores a partir de la desviación estándar del kernel de los píxeles que satisfacen determinados criterios.

Pueden agruparse en filtros de reducción de manchas de la imagen (Lee, Lee Mejorado, Frost, Frost Mejorado, Gamma, Kuan y Sigma Local) y filtros de eliminación de píxeles malos (Errores Bit).

- *“Texture Filters”*: permiten extraer información sobre la textura (variación espacial del tono de la imagen como una función de la escala) de imágenes radar basándose en medidas de ocurrencia (datos de rango, media, varianza, entropía y oblicuidad) o coocurrencia (media, varianza, homogeneidad, contraste, desemejanza, entropía, segundo momento y correlación).

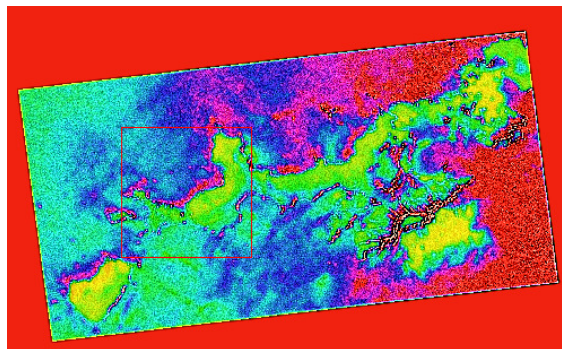


Figura 34. Imagen de color sintético creada a partir de los valores de matiz, saturación y tono de la imagen ASAR del 22.11.07.

- “*Synthetic Color Image*”: transformación de los datos de matiz, saturación y tono (HSV) al espacio RGB para producir una imagen de color con la que visualizar elementos sutiles a gran escala conservando el detalle.
- “*Polarimetric Tools*”: herramientas específicas para el análisis polarimétrico de datos AIRSAR, TOPSAR y SIR-C de la NASA/JPL)
- “*TOPSAR Tools*”: para leer datos TOPSAR y convertirlos en unidades físicas.

Formato de los productos ENVI

Los productos ENVI están formados por dos ficheros: un archivo simple binario cuyos datos se almacenan en formato raster genérico y una cabecera asociada en formato ASCII. Esto permite abrir casi cualquier formato de imagen sin tener que convertirlas a otro específico (MSS, TM, SPOT, ERS-1, AVHRR, AVIRIS, GERIS, GEOSCAN, TIMS, fotografías aéreas digitalizadas, datos DEM, AIRSAR, RADARSAT y datos SIR-C en sus formatos nativos).

Los datos raster de la imagen son guardados como filas binarias de bytes en orden de almacenamiento BSQ (Formato Secuencial de Bandas), BIL (Formato de Bandas Intercaladas por Píxel) o BIP (Formato de Bandas Intercaladas por Líneas).

La información de la cabecera se incluye en un archivo de texto separado con extensión hdr que se crea la primera vez que ENVI accede a un archivo de datos. Contiene información sobre las características básicas de la imagen (dimensiones de la imagen, tipo de datos, cabeceras incrustadas si existen) y cualquier información adicional sobre el archivo (datos de georreferenciación, tipo de sensor, etc.).

4.3. Información auxiliar

4.3.1. Mapa topográfico

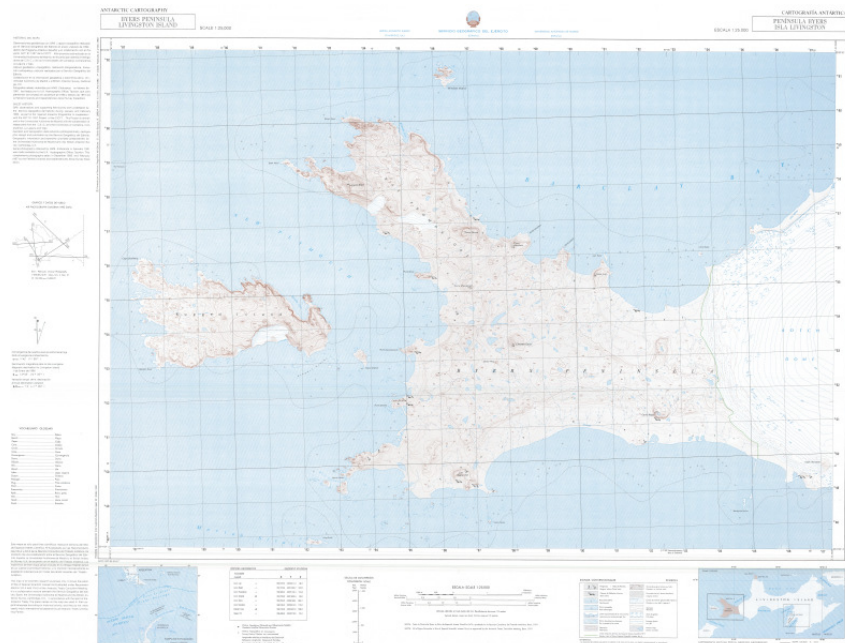


Figura 35. Mapa Topográfico de la Península de Byers, escala 1:25.000 (Servicio Geográfico del Ejército, 1992).

5. Metodología

5.1. Tratamientos previos

Antes de proceder al análisis de la información contenida en las imágenes éstas deben abrirse para comprobar que cubren la totalidad del área de estudio y que no presentan ningún tipo de defecto. Los dos softwares utilizados requieren la exportación de los productos ASAR a los formatos específicos en los que operan.

Por otro lado, cualquier análisis geoespacial implica la georreferenciación previa de las imágenes con las que se va a trabajar además de la calibración inherente al sensor desde el cual han sido captadas o cualquier otro tipo de corrección.

En el caso de los datos auxiliares utilizada, los tratamientos previos consistieron en la digitalización de los mapas disponibles en papel para poder aplicar la información que contienen sobre las imágenes ASAR.

5.1.1. Análisis visual de las imágenes

Software BEAM 4.1.

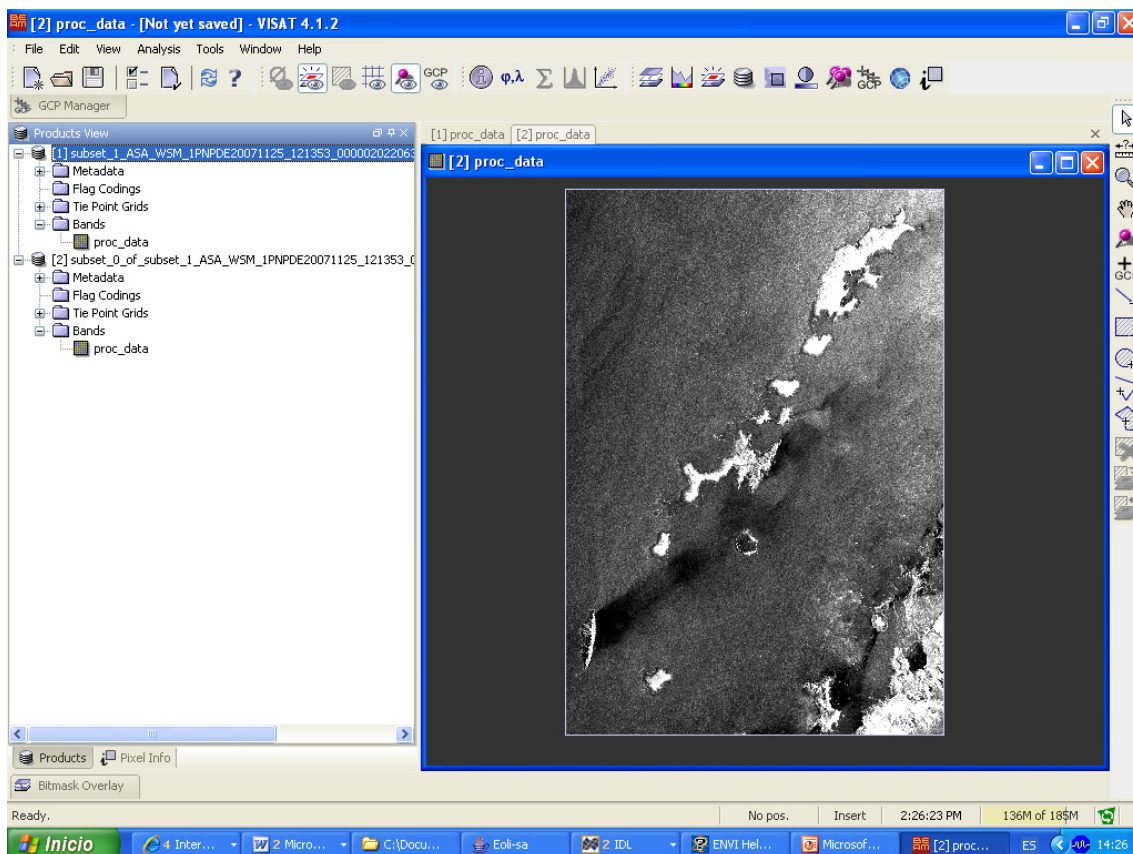


Figura 37. Entorno del software BEAM. Visualización de un subconjunto de un producto ASAR que abarca las Islas Shetland del Sur.

Las imágenes originales se abren a través del comando “*File / Import / Import ENVISAT Product (or Subset)*”. El botón “*Subset*” permite crear un subconjunto

definido en términos espaciales, a través de la malla de puntos o a través de los metadatos.

El gran tamaño de los productos ASAR dificulta su manejo y aumenta el tiempo de procesamiento, por lo que el trabajo se llevó a cabo utilizando un subconjunto de la imagen original que incluye el área completa de la isla de Livingston seleccionado visualmente a través de la ventana “Specify Product Subset”.

Para visualizar el subconjunto definido basta con hacer doble click sobre la banda llamada “proc_data” que aparece en la ventana “Products View”, a la izquierda de la pantalla.

Software ENVI 4.3.

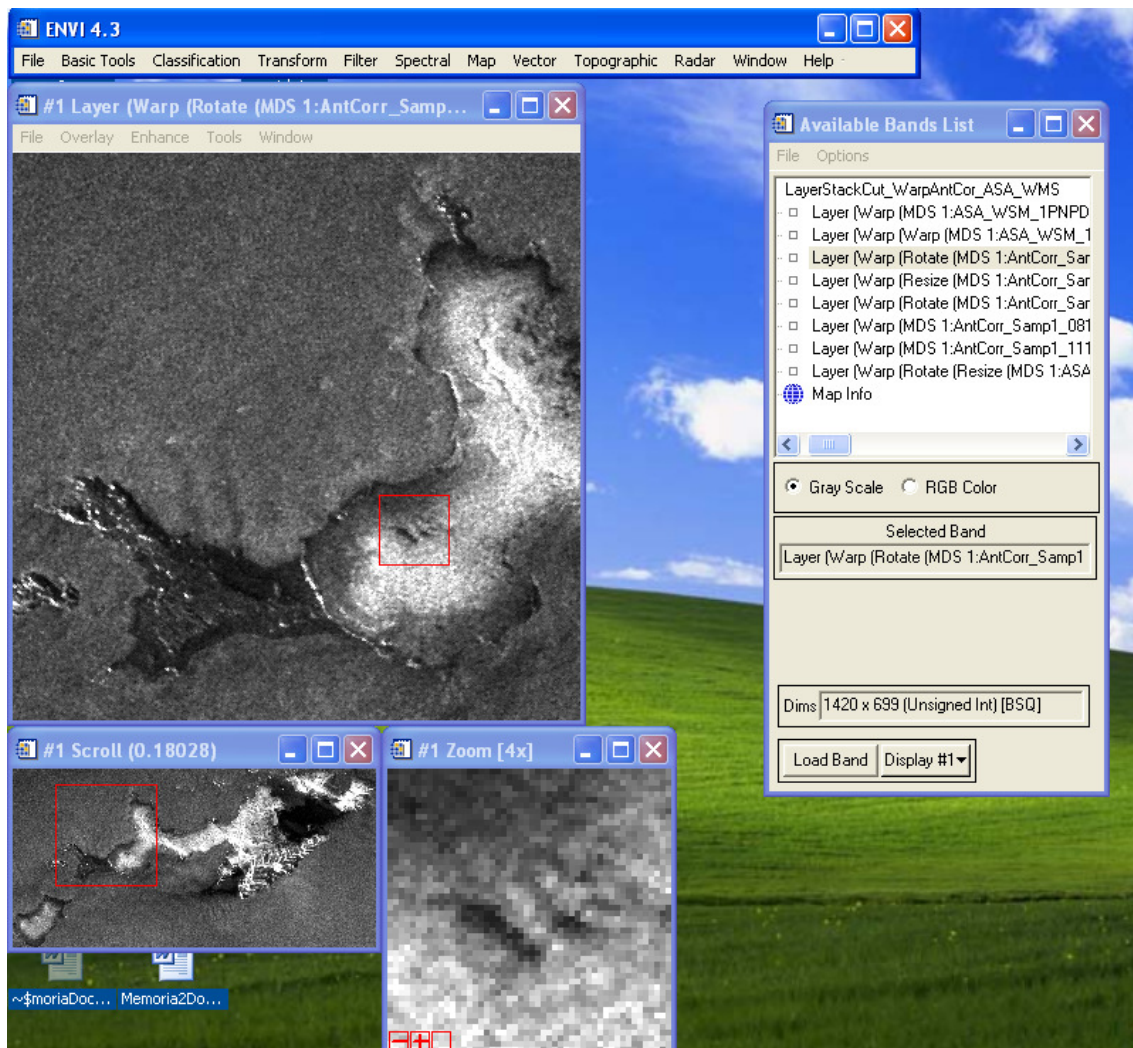


Figura 38. Visualización de imágenes con ENVI. Grupo de visualización y “Available Band List”.

Las imágenes originales se pueden abrir desde 3 rutas distintas:

- “File/ Open Image File” (vía genérica)
- “File/ Open External File/ ENVISAT/ ASAR”
- “File/ Open/Prepare Radar File/ ENVISAT-ASAR”

El área de interés del presente estudio fue seleccionada a través de la imagen que aparece en el diálogo “Input File”, la cual permite definir un subconjunto espacial o una máscara asociada para no tener que trabajar con la imagen completa.

Los productos ASAR abiertos de esta manera se cargan en una ventana llamada “*Available Band List*”, a través de la cual pueden visualizarse las imágenes a escala de grises o, en su caso, como composiciones de color haciendo click en el botón “*Load Band*”. Las imágenes aparecen en un conjunto de ventanas llamado grupo de visualización (“*Display Group*”), que consta de los siguientes elementos:

- “*Image Window*”: muestra la imagen a resolución completa. Si la imagen es grande sólo aparece el área seleccionada a través del cuadrado rojo que aparece en la esquina superior izquierda de la ventana “*Scroll*”, el cual puede colocarse en cualquier área de la imagen.
- “*Zoom Window*”: muestra la subsección de la imagen definida por el cuadro de zoom de la ventana “*Image*” con un factor de aumento definido por el usuario y basado en replicación o interpolación de píxeles.
- “*Scroll Window*”: muestra la imagen completa en una resolución submuestreada cuando el tamaño de la imagen es mayor que el de la ventana “*Image*”.

Una vez importadas las imágenes cualquier operación que dé lugar a una imagen de datos puede ser guardada en formato ENVI (seleccionando “*Output to File*” y escribiendo un nombre para el nuevo archivo a través del diálogo abierto durante la operación o por el menú “*File / Save Image File As*”).

5.1.2. Corrección del patrón de iluminación de la antena

Las imágenes obtenidas a través de sistemas radar muestran una variación de la iluminación en la dirección del rango (perpendicular a la trayectoria del vuelo) como consecuencia del patrón de la antena. ENVI dispone de un comando específico para corregir este efecto (“*Radar / Antenna Correction Pattern*”) que debe aplicarse antes de cualquier otro tratamiento, ya que la rotación que sufren las imágenes como consecuencia de la georreferenciación impediría eliminarlo de forma correcta.

Salvo las imágenes del 22 y 25 de noviembre el resto presentan este efecto, por lo que se usó este comando para eliminar las variaciones en la iluminación. Los parámetros usados para la corrección fueron un polinomio de primer orden, que minimiza la eliminación de variaciones locales en la señal, aplicado en la dirección de las filas (dirección horizontal, que se corresponde con la dirección del rango) mediante el método de corrección multiplicativo, que es el que mejores resultados da para antenas radar.

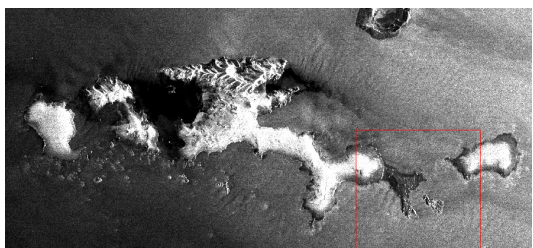


Figura 39a. Imagen del 29.11.07 abierta con ENVI sin ningún tipo de tratamiento previo.

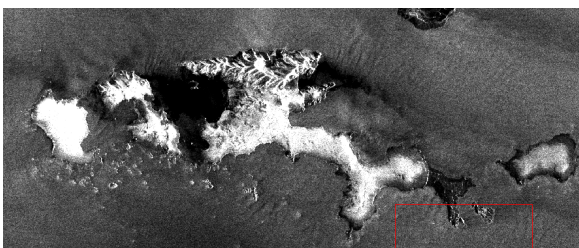


Figura 39b. Imagen del 29.11.07 no georreferenciada y con el patrón de la antena corregido.

5.1.3. Corrección geométrica

Software BEAM 4.1.

La georreferenciación asociada a los productos se basa en bandas de latitud y longitud creadas a partir de la información del satélite, y con las cuales pueden transponerse a uno de los sistemas de proyección disponibles mediante la herramienta “*Tools / Map Projection*”. Los parámetros de proyección usados fueron el huso 20 del sistema internacional UTM basado en el geoide WGS-84.

Una vez georreferenciadas, mediante la herramienta “*Tools / Attach Pixel Geo-coding*” las imágenes pueden proyectarse a partir de las coordenadas de latitud y longitud del satélite, de la misma forma que al seleccionar “*Tools / Dettach Pixel Geo-coding*” se restablece el sistema de proyección original.

La georreferenciación también puede basarse en la posición de los píxeles. En este caso habría que seleccionar varios Puntos de Control de la Tierra (GPC) a través de la herramienta “*GPC Manager*”, elegir el método de remuestreo (polinómico lineal, cuadrático o cúbico) a partir del cual las coordenadas serán transformadas en posición del píxel, y hacer click en el botón “*Attach*”.

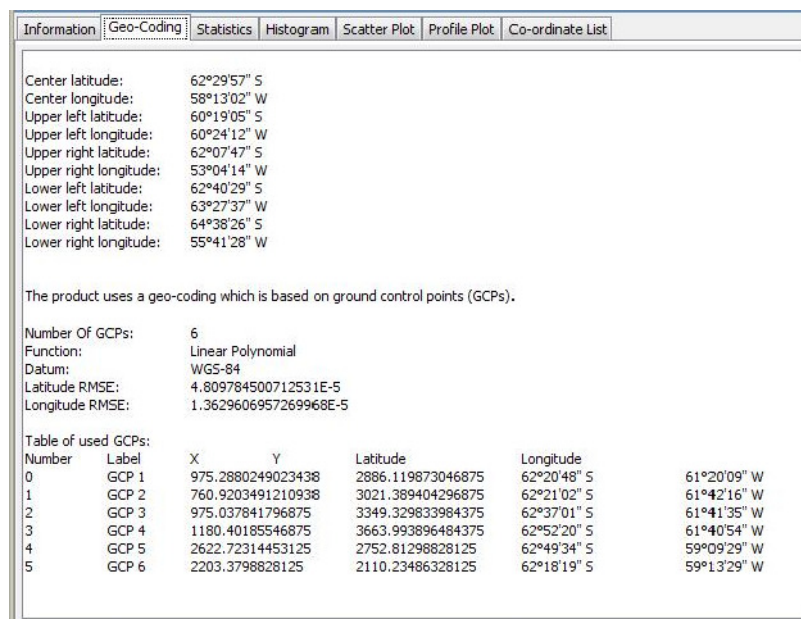


Figura 40. Información de georreferenciación del producto visualizado con BEAM.

Software ENVI 4.3.

Hay un comando específico para georreferenciar imágenes ASAR (“*Map/ Georeference ENVISAT/ Georeference ASAR*”), pero no puede usarse con las imágenes ya procesadas porque se guardan como formato ENVI. La georreferenciación de la imagen de la primera fecha, que no había sido tratada, se llevó a cabo a través de este comando. La proyección elegida fue el sistema UTM sobre el geoide WGS-84, concretamente la zona sur del huso 20, que es el que cubre el área de estudio, usando un

tamaño de píxel de 150 m de acuerdo a la resolución espacial de las imágenes, y el método de deformación RST¹³.

El resto de imágenes fueron georreferenciadas usando la primera como base a través de la herramienta “*Map / Registration / Select GPC: Image to Image*”. Este segundo método consiste en determinar las coordenadas de la imagen que se desea proyectar a partir de los puntos de control (GPC) definidos sobre una imagen previamente georreferenciada. Una vez establecida la correspondencia entre ambas imágenes con un error inferior a 0,2 píxeles, la segunda imagen se ajustó al sistema de referencia de la imagen base utilizando por defecto las dimensiones de píxel de ésta a través del comando “*Options / Warp Displayed Band*” de la ventana “*Ground Control Points Selection*”.

Al georreferenciar todas las imágenes directamente a través de la herramienta “*Georeference ASAR*”, para poder analizarlas de forma conjunta habría que modificar las dimensiones de cada una a un tamaño de píxel base (mediante “*Basic Tools / Resize Data (Spatial / Spectral) / Set Output Dims by Pixel Size*” o introduciendo directamente los valores deseados en las opciones “*X e Y Pixel Size*” de la ventana “*Registration Parameters*”).

5.1.4. Digitalización de los mapas

La información auxiliar a la que pudo tenerse acceso eran dos mapas de la Península de Byers impresos en papel. Para poder contrastar los datos que contienen con los resultados del análisis de las imágenes ASAR es necesario digitalizarlos.

El mapa fue escaneado por fragmentos a una resolución de escaneo de 300 ppp (Puntos Por Pulgada) guardando las imágenes resultantes en formato TIFF. Para poder unir los distintos fragmentos que conforman el mapa completo a través del programa Adobe PhotoShop CS3 (“*Archivo / Automatizar / Photomerge...*”), se dejó un solapamiento de aproximadamente un 20% entre ellos, que es lo que requiere este software Adobe PhotoShop CS3 para poder establecer los puntos de unión.

El mosaico resultante, en formato TIFF, fue abierto con ENVI y proyectado a coordenadas UTM estableciendo puntos de control a partir de los datos de la malla geográfica del mapa (“*Map / Registration / Select GPC: Image to Map*”) con un error de 0,186.

Para elegir el tamaño de píxel del mapa digitalizado y georreferenciado debe tenerse en cuenta el **límite de percepción visual** del ojo humano, que es la separación mínima que debe existir entre dos puntos para que no sean confundidos en uno solo (convencionalmente establecido en 0,2 mm¹⁴). Este valor determina el **límite de apreciación gráfica**, que se encuentra relacionado por medio de la escala a una distancia real en el terreno. En el caso de los mapas disponibles, de escala 1:25.000, el límite de apreciación gráfica viene dado por la siguiente expresión:

$$25000 \cdot 0,2 \text{ mm} = 5000 \text{ mm} = 5 \text{ m}$$

¹³ **RST (Rotación, escala y traslación)**: el algoritmo de deformación de éste método usa una transformación afín (que mantiene la colinearidad):

$$x = a1 + a2X + a3Y$$

$$y = b1 + b2X + b3Y$$

Es el método más simple y rápido; para aplicarlo se necesitan al menos 3 GPC.

¹⁴ Valor sacado de <http://www.proyectosfindecarrera.com/definicion/topografia.htm>.

Por lo tanto, el tamaño mínimo que deben tener los píxeles de los mapas digitalizados, de acuerdo al límite de apreciación gráfica es de 5 m de lado.

5.2. Procesamiento y análisis de la información geoespacial

5.2.1. Filtros

El objetivo del filtrado de una imagen es mejorar la calidad de las imágenes eliminando determinadas frecuencias espaciales, que expresan la variación en el brillo o en el valor digital de los píxeles con la distancia.

Software BEAM 4.1.

BEAM dispone de varios filtros de convolución y no lineales agrupados en función de sus características:

- Detección de líneas: bordes horizontales, verticales, diagonales izquierdos y derechos, detector de bordes acompasados y diagonales acompasados, y cruces Roberts Noreste y Noroeste
- Detección de gradientes: Sobel N, S, E, O y NE
- Atenuación y nitidez: media aritmética con tamaño de kernel de 3x3, 4x4 y 5x5, y filtros de paso bajo 3x3 y 5x5
- Contraste: paso alto 3x3 #1 y #2 y 5x5
- Realce de discontinuidades: Laplace 3x3 y 5x5
- Filtros no lineales: mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar y raíz cuadrada media con tamaños de 3x3 y 5x5

El objetivo final del filtrado de las imágenes con este software era crear una máscara de bits que incluyese únicamente las zonas emergidas. Para ello en primer lugar se aplicaron todos los filtros disponibles desde “*Tools / Create Filtered Band*” sobre una misma imagen para estudiar sus efectos y elegir el que mejor ensalzase las diferencias entre el mar y las zonas emergidas.

Una vez comparadas todas las opciones de filtrado el siguiente paso fue trazar un transecto a lo largo de la primera imagen para poder analizar la variación espacial de los valores de píxel y determinar el umbral que separa las dos cubiertas. Los valores superiores a dicho umbral se incluirían en una máscara de bits, creada a través del icono “*Bit Mask Overlay*”, para cubrir únicamente los píxeles correspondientes a la cubierta helada.

Las pruebas realizadas sobre la imagen original y sobre algunos filtros seleccionados se describen a continuación:

- Proc_data: en la máscara creada para valores del producto inicial superiores a 600 Niveles Digitales (ND), en consonancia con lo que refleja el gráfico de perfil, los contornos quedan muy bien definidos, pero incluye bastantes píxeles pertenecientes a la superficie del mar debido a la reflectividad de las olas.

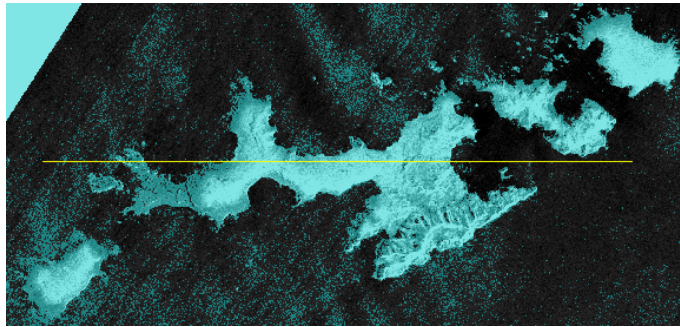


Figura 41. Máscara de bits creada sobre la imagen original.

- Detección de Bordes Acompasados: este filtro refleja muy bien los contornos de las diferentes superficies, que en el diagrama de perfil aparecen como grandes saltos en los valores de píxel.

Aunque a priori parece una buena elección, los valores del interior de las diferentes superficies son parecidos, y la máscara de bits definida para valores superiores a 900 ND sólo cubre algunos límites y las zonas donde hay variaciones de altura.

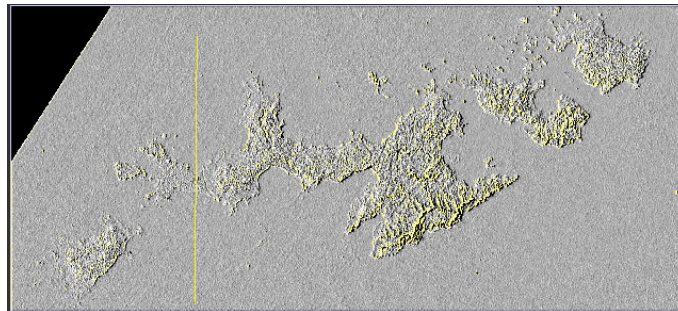


Figura 42. Máscara de bits creada sobre la imagen filtrada con el detector de bordes acompasados.

- Desviación Estándar 3x3: el diagrama de perfil longitudinal demuestra que la mayor parte de los píxeles correspondientes al océano tienen un valor menor de 80 ND.

La máscara de bits creada para valores superiores a este umbral define la superficie de la isla de forma correcta, aunque también cubre algunos puntos en el océano.

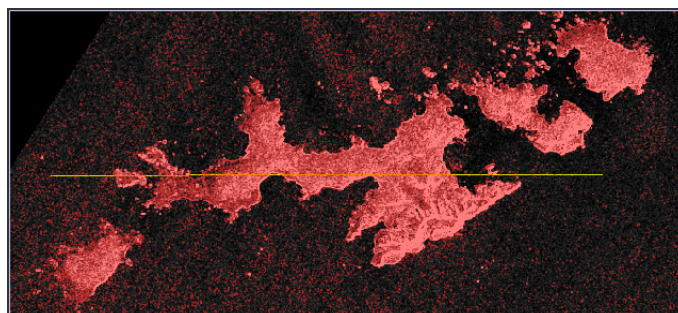


Figura 43. Máscara de bits creada sobre la imagen filtrada con el filtro de desviación estándar.

- Máximo 3x3: con este filtro se observan bien las diferencias entre superficies, hecho confirmado también por el gráfico de perfil.

La máscara definida para píxeles con un valor superior a 800 ND encaja en las superficies emergidas, y sobre la superficie del mar aparecen menos puntos coloreados por ella. Sin embargo, la máscara cubre también algunos límites de

costa debido a que el mayor tamaño de píxel dificulta la definición de contornos exactos.

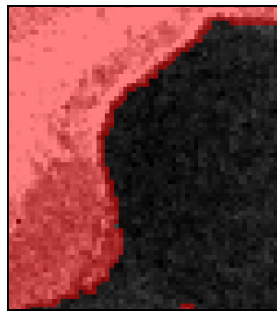


Figura 44. Detalle de los límites costeros de la máscara de bits creada sobre la imagen filtrada con el filtro de máximos.

- Mediana 5x5: el gráfico de perfil de indica que todas las superficies emergidas tienen un valor superior a 600 ND, por lo que se definió una máscara de bits para píxeles con valores superiores a este umbral y se comprobó que los bordes encajaban mejor que con el resto de filtros.

Las pruebas realizadas demostraron que el **filtro de mediana de tamaño 5x5** es el que mejor encaja en los límites entre estas dos superficies. Estos filtros reemplazan el valor del píxel central por la mediana de los valores de los píxeles vecinos. De esta forma suavizan la imagen conservando los bordes de dimensiones mayores a las del kernel, lo que permite reducir el efecto de sal y pimienta, ruido o manchas.

Por ello la imagen filtrada a través de este filtro fue la elegida para construir una máscara de bits para valores superiores a 600 ND, que resalta de forma precisa las zonas emergidas.

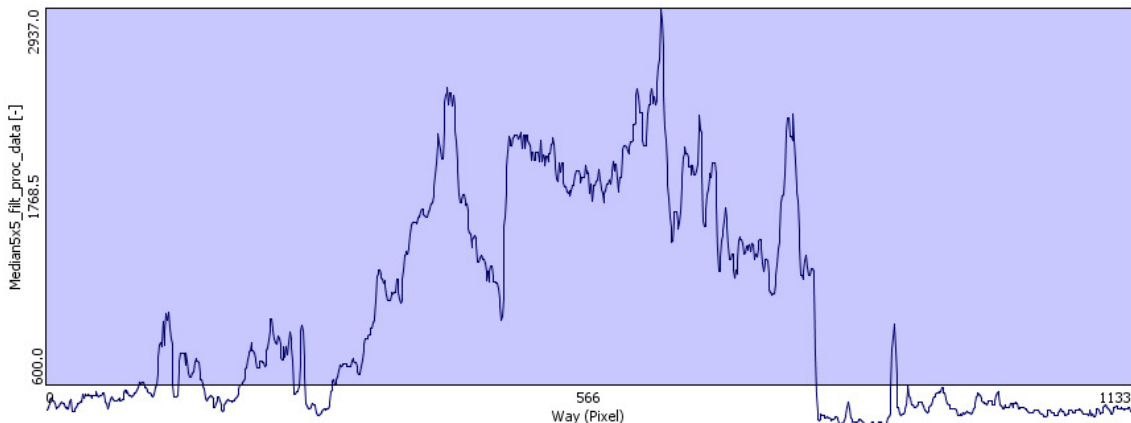


Figura 45. Diagrama de dispersión del transecto trazado sobre la imagen del día 22.11.07 tratada con un filtro de mediana 5x5. Los puntos por debajo del eje X representan píxeles con valores inferiores a 600 ND.

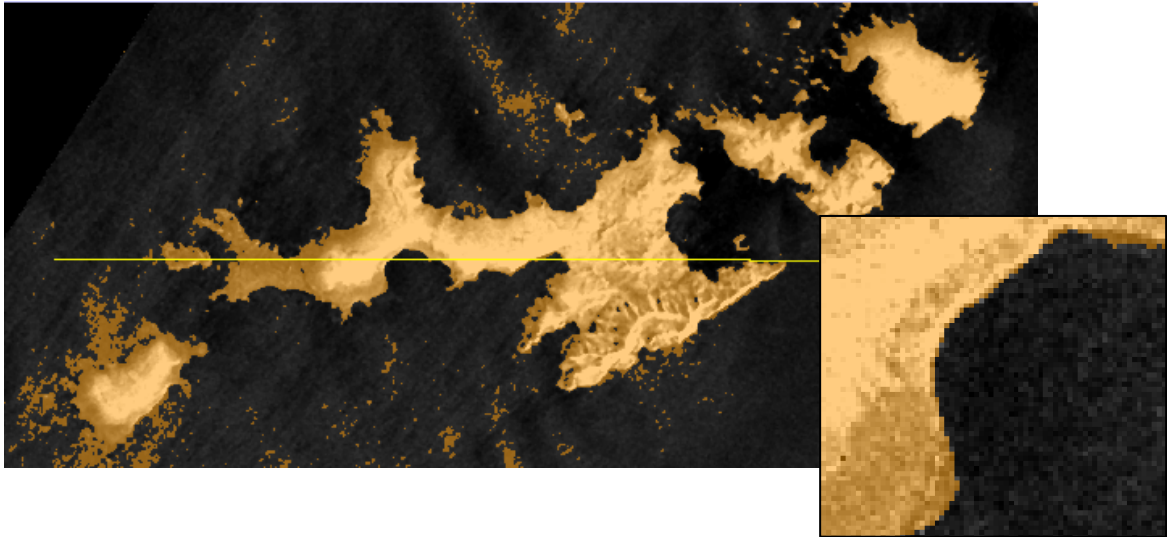


Figura 46. Imagen de la isla de Livingston correspondiente al diagrama de perfil anterior con una máscara de bits naranja que cubre las zonas emergidas.

Software ENVI 4.3.

Este programa dispone de un menú de filtros que permite la aplicación de distintos tipos de filtrados:

- Filtros de Convolución (filtrado espacial): los valores de píxel de la imagen filtrada son una función de algún tipo de media ponderada del valor de los píxeles vecinos.
Los filtros de convolución disponibles en ENVI son: Paso Alto, Paso Bajo, Laplacianos, Direccionales, Gausianos, Sobel y Roberts, aunque el tamaño de kernel o matriz y el valor que toman sus elementos pueden ser definidos por el usuario.
- Filtros morfológicos: procesamiento no lineal de imágenes en base a la forma. Su principal objetivo es la cuantificación de estructuras geométricas. Las opciones en este caso son: Apertura, Cierre, Dilatación y Erosión.
- Filtros FFT (filtrado de frecuencias): transformación de los datos de una imagen en números complejos que representan varios componentes espaciales de frecuencia.
- Permite diseñar un filtro hacia adelante que elimine ciertos componentes de frecuencia y vuelva a transformar los datos al espacio original de la imagen mediante la aplicación de un filtro inverso.

Además de estas opciones, ENVI contiene un menú de filtros específicos para imágenes radar, que son los que se aplicaron a la imagen del 01.12.07 para determinar si alguno de ellos resultaba útil en el análisis de las cubiertas. A continuación se describen brevemente los mecanismos de operación de los filtros utilizados y los resultados de las imágenes filtradas:

- **Filtros de Adaptativos** (“*Radar / AdaptiveFilters*”)
 - Lee: suaviza los datos eliminando las manchas o ruido cuya intensidad está relacionada con la escena de la imagen y que tienen un componente aditivo o multiplicativo.

El filtro de Lee fue aplicado con los parámetros por defecto (tamaño 3x3; modelo de ruido multiplicativo con una media de 1 y varianza de 0,25). La imagen filtrada parece más clara, pero a simple vista tampoco se aprecia demasiado la diferencia.

- Lee Mejorado: reduce las manchas de las imágenes radar conservando de forma simultánea información textural. Es una adaptación que también usa las estadísticas locales (coeficiente de variación) para filtrar píxeles en ventanas individuales. Cada ventana se incluye en una de las tres posibles clases (homogénea, heterogénea o punto objetivo), que aplican distintos tratamientos al valor del píxel central (sustitución del valor del píxel central por la media, la media ponderada o el valor no se modifica).

Este filtro fue aplicado usando un tamaño de 5x5 y factor de amortiguación¹⁵ de 3. Los coeficientes de los límites de variación C_u y C_{max} ¹⁶ usados son los que aparecen por defecto (0,5230 y 1,7320, respectivamente). La imagen filtrada aparece más clara y más borrosa, por lo que este filtro no resulta demasiado útil. Disminuyendo el tamaño de filtro y el factor de amortiguación estos efectos se suavizan, pero entonces el resultado no dista mucho de la imagen original.

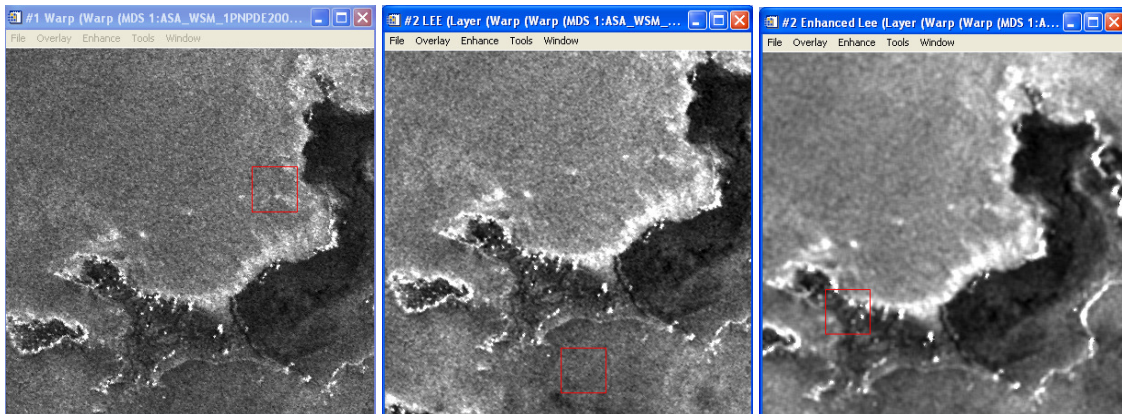


Figura 47. Fragmento de la imagen del 01.12.07 sin tratar. Figura 48. Filtro de Lee. Figura 49. Filtro de Lee mejorado.

- Frost: reduce el ruido conservando los bordes mediante un filtro de simetría circular y amortiguación exponencial. Los nuevos valores se calculan a partir de las estadísticas de los píxeles locales en función de su distancia al centro del filtro, el factor de amortiguación y la varianza local.

El resultado del filtro aplicado con un tamaño de 5x5 y factor de amortiguación de 3 se parece al del filtro anterior, y aunque el tamaño de filtro y factor de amortiguación sean relativamente grandes y provoquen distorsiones valores más pequeños no tendrían efectos visibles sobre las imágenes.

- Frost Mejorado: reduce las manchas conservando la información textural. Los píxeles se incluyen en una de las tres posibles clases (homogénea,

¹⁵ **Factor de amortiguación**: define inversamente la extensión de la amortiguación en la ponderación de la media para la clase heterogénea. Un factor elevado produce una menor ponderación.

¹⁶ C_u y C_{max} definen los límites de las clases homogénea (coeficiente de variación $\leq C_u$), heterogénea ($C_u < \text{coeficiente de variación} < C_{max}$) y punto objetivo (coeficiente de variación $\geq C_{max}$).

Los valores del coeficiente de variación pueden estimarse a partir del número de vistazos (L) de la imagen radar:

$$C_u \equiv \frac{0.523}{\sqrt{L}} \quad \text{y} \quad C_{max} \equiv \sqrt{1 + \frac{2}{L}}$$

heterogénea o punto objetivo), que determina el tratamiento del píxel (valor medio, convolución kernel del *impulso de respuesta* o no se cambia).

La imagen filtrada (tamaño de filtro de 5x5 y factor de amortiguación de 3) es más clara y borrosa, y los puntos con mayor valor de respuesta aparecen todavía más brillantes. Esto hace que la imagen adquiera cierta impresión de relieve.

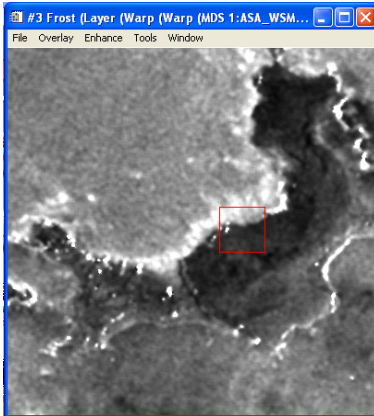


Figura 50. Fragmento de la imagen del 01.12.07 sin tratar.

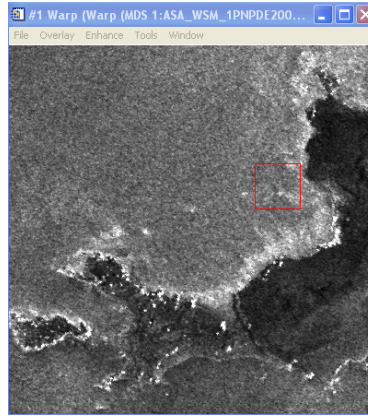


Figura 51. Filtro de Frost.

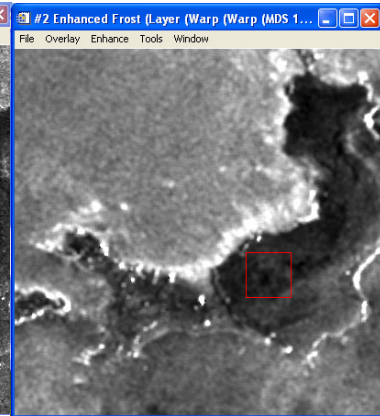


Figura 52. Filtro Frost mejorado.

- Kuan: reduce las manchas transformando el modelo de ruido multiplicativo en uno aditivo que permite conservar los bordes. Este filtro es similar al de Lee pero usa una función distinta para sopesar las medias.

La imagen filtrada usando un tamaño de 5x5 y 3 vistazos¹⁷ es más clara y más borrosa que la de los otros filtros. Parece como si los puntos más brillantes tuvieran relieve.

- Gamma: similar al filtro Kuan pero asume que los datos tienen una distribución gamma.

La imagen filtrada usando un tamaño de 5x5 y 3 vistazos es más clara y más borrosa y su aspecto no se diferencia mucho de las anteriores. La aplicación de un filtro más pequeño o de un menor número de vistazos aumentaría la nitidez, pero la imagen sería parecida a la original.

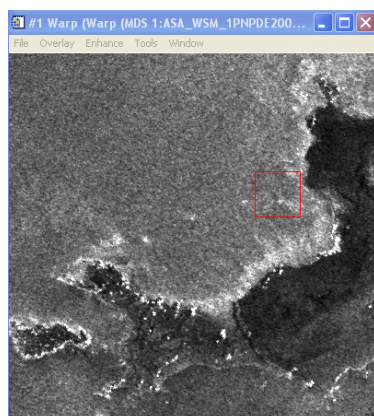


Figura 53. Fragmento de la imagen del 01.12.07 sin tratar.

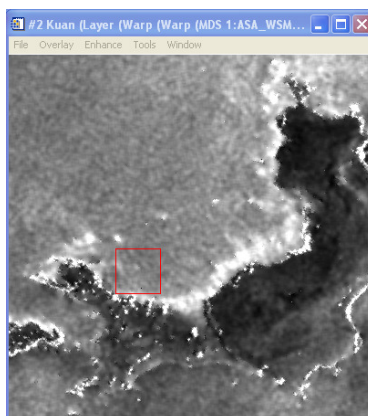


Figura 54. Filtro de Kuan.

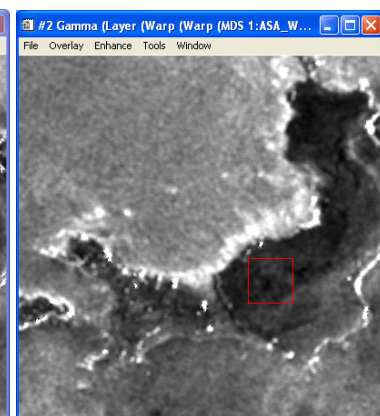


Figura 55. Filtro Gamma.

¹⁷ **Número de vistazos**: se usa para calcular la varianza del ruido, que se considera igual a la inversa de este parámetro.

- **Sigma Local**: usa la desviación estándar para determinar los píxeles de la ventana válidos con los que calcular la media que reemplazará al píxel filtrado. Conservan detalles finos incluso en áreas de poco contraste y reducen las manchas de forma significativa.

Esta imagen, filtrada con un tamaño de 5x5 con factor sigma¹⁸ igual a 3, es la más clara de todas las imágenes filtradas, pero ha perdido nitidez, por lo que no resulta útil.

- **Errores Bit**: eliminan el ruido de errores bit, que suelen ser el resultado de picos de valores extremos aislados no relacionados con la escena de la imagen y que dan lugar a la típica apariencia de sal y pimienta. Este filtro usa un algoritmo adaptativo usando la desviación estándar para definir el umbral de los píxeles válidos con los que calcular la media que reemplazará al píxel central.

A simple vista no se aprecia demasiado la diferencia entre la imagen filtrada con un kernel de 5x5, factor sigma 3 y tolerancia¹⁹ 10, y la imagen original, salvo que la imagen procesada se ha aclarado ligeramente. A diferencia de los otros filtros adaptativos éste conserva la nitidez, por lo que es el que más útil podría resultar al objeto de nuestro estudio.

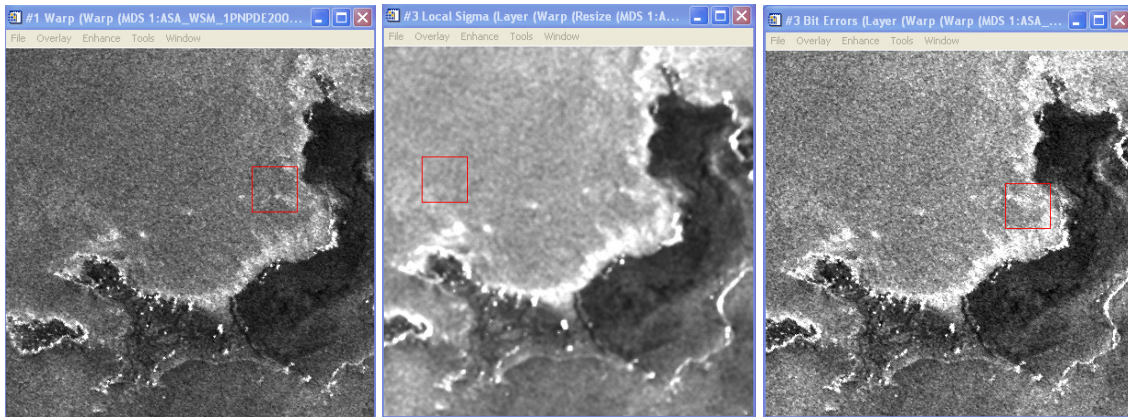


Figura 56. Fragmento de la imagen del 01.12.07 sin tratar.

Figura 57. Filtro Sigma Local.

Figura 58. Filtro de Errores Bit.

- **Filtros de Textura** (“*Radar / Texture Filters*”)

- **Ocurrencia**: existen 5 tipos de filtros (rango, media, varianza, entropía y oblicuidad) que miden las ocurrencias de cada nivel de gris para el cálculo de texturas.

- **Coocurrencia**: 8 filtros (media, varianza, entropía, homogeneidad, contraste, desemejanza, segundo momento y correlación) en los que los valores de textura se calculan en función de la matriz de coocurrencia, que muestra la dependencia espacial de los distintos tonos de gris.

La reducción de los tonos de gris utilizados para representar la imagen se puede llevar a cabo modificando los niveles de cuantización de la escala de gris (lo que también reduce el tiempo de procesamiento).

¹⁸ **Factor Sigma**: es el número de desviaciones estándar usado para calcular el valor máximo y mínimo del rango de píxeles válidos.

¹⁹ **Tolerancia**: es el valor mínimo a partir del cual los píxeles con valores superiores son considerados malos si satisfacen los criterios del factor sigma.

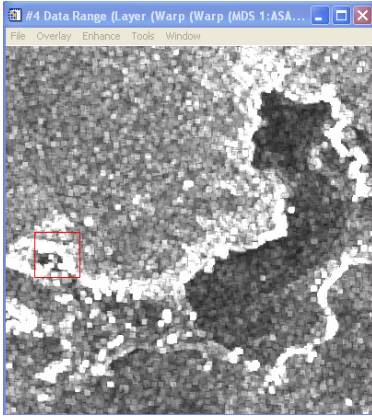


Figura 59. Filtro de Ocurrencia de Rango

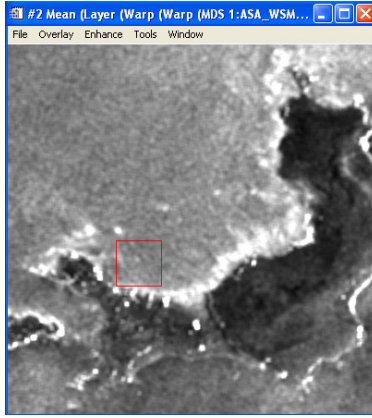


Figura 60. Filtro de Ocurrencia de Media

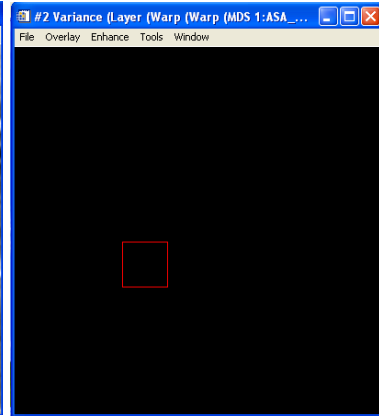


Figura 61. Filtro de Ocurrencia de Varianza



Figura 62. Filtro de Ocurrencia de Entropía

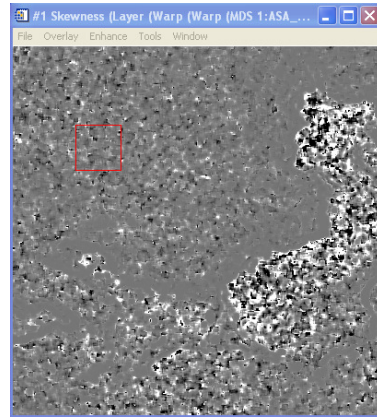


Figura 63. Filtro de Ocurrencia de Oblicuidad

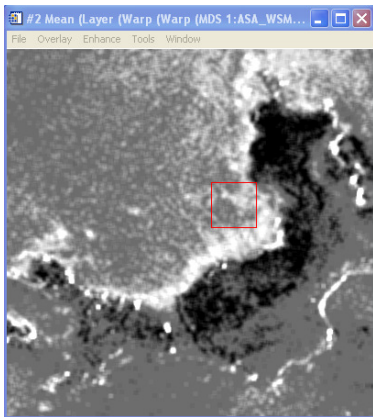


Figura 64. Filtro de de Coocurrencia Media

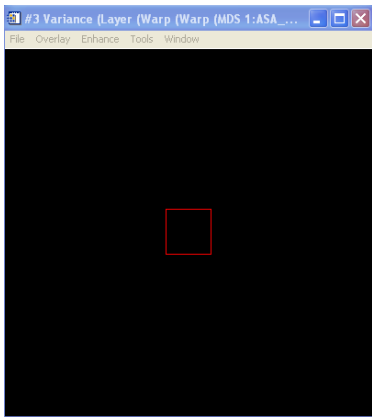


Figura 65. Filtro de de Coocurrencia Varianza

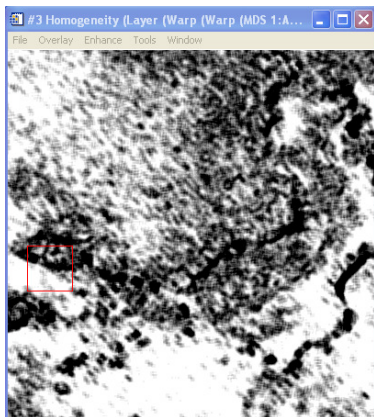


Figura 66. Filtro de Coocurrencia de Homogeneidad

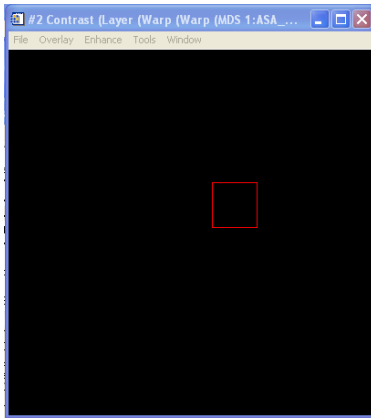


Figura 67. Filtro de Coocurrencia de Contraste

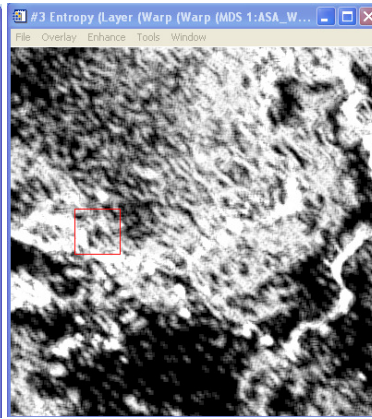


Figura 68. Filtro Coocurrencia de Entropía

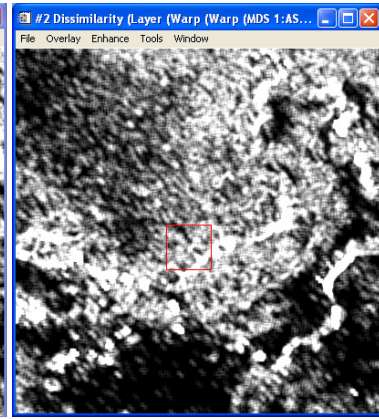


Figura 69. Filtro de Coocurrencia de Desemejanza

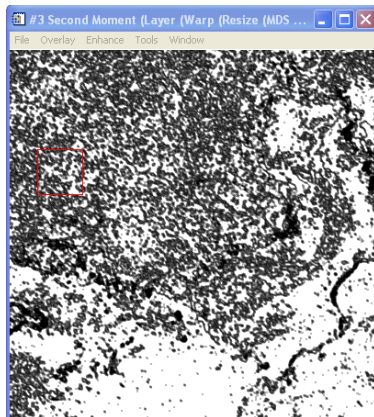


Figura 70. Filtro de Coocurrencia de Momento

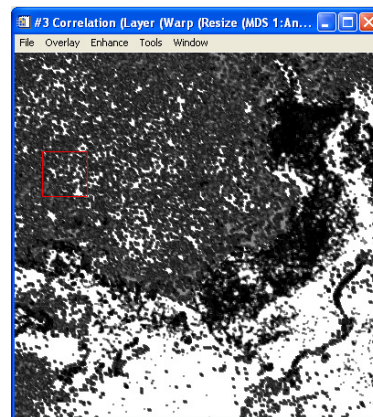


Figura 71. Filtro de Coocurrencia Segundo de Correlación

Los filtros de ocurrencia y coocurrencia no resultan útiles, ya que las imágenes de trabajo no presentan ninguna textura específica que pueda ser analizada mediante este tipo de tratamientos.

5.2.2. Clasificación no supervisada

Este tipo de clasificación agrupa los píxeles de un conjunto de datos basándose únicamente en las estadísticas, sin ninguna clase de entrenamiento definida por el usuario. En concreto calcula las medias de las clases distribuidas uniformemente en el espacio para posteriormente agrupar el resto de píxeles usando técnicas de mínima distancia. Cada iteración vuelve a calcular las medias hasta que el número de píxeles de cada clase cambia menos que el umbral de clase seleccionado o se alcanza el máximo número de iteraciones.

Todos los píxeles son clasificados en la clase más cercana salvo que se especifique un umbral de desviación estándar o distancia.

Los dos métodos disponibles desde ENVI son:

- *“K-Means”*: asume que el número de agrupaciones es conocido a priori. Por esta razón es muy sensible a los valores iniciales, que modifican enormemente los resultados de la clasificación, aunque las diferencias en el Error Cuadrático Medio sean bastante pequeñas.

- “Isodata”: usa el mismo criterio de clasificación que el método anterior pero permite la fusión, separación o eliminación de agrupaciones. Las clases se unen si el número de píxeles o la distancia entre sus centros no sobrepasa un determinado umbral, y se dividen si la desviación estándar excede de un valor predefinido y el número de píxeles es el doble que el umbral mínimo.

Selección del método de clasificación

La primera parte del análisis consistió en comparar los dos métodos disponibles aplicándolos a las mismas imágenes y con los mismos parámetros para elegir el más óptimo a efectos del presente estudio.

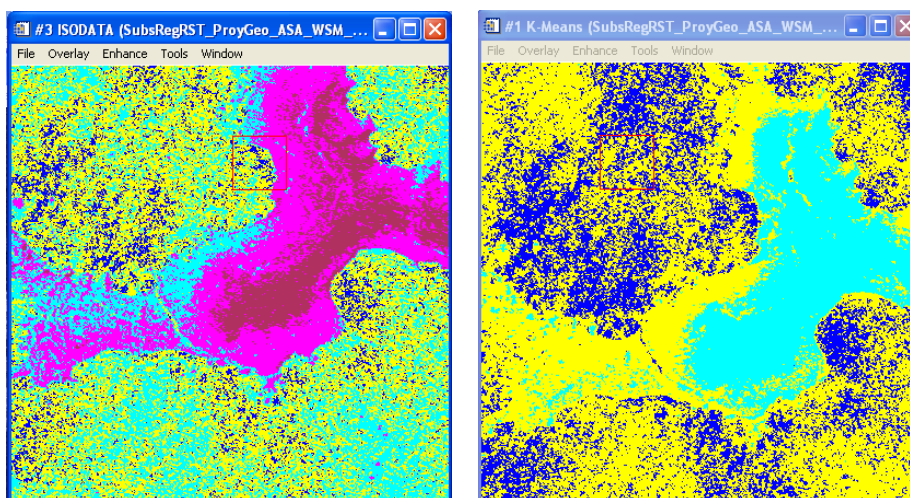


Figura 72. Resultados de la clasificaciones Isodata y K-Means con 3 iteraciones y umbral de cambio del 30% sobre la imagen del 22.11.07.

En ambas imágenes el mar se incluye en varias clases a pesar de que sus características son bastante distintas a las del resto de cubiertas, debido a la rugosidad que confiere el oleaje. Por otro lado, la Península de Byers, que constituye el objetivo principal de estudio, ha quedado clasificada de forma muy gruesa tanto en la clasificación Isodata, donde las clases parecen representar distintos ángulos de incidencia, como en la clasificación K-Means, en la que la mayor parte de la superficie ha sido incluida en una única clase.

A pesar de ello la clasificación de **Isodata** sigue siendo más precisa para clasificar las imágenes disponibles, y en ella se distinguen mejor los distintos tipos de hielo.

Selección de los parámetros de clasificación

Para elegir los parámetros de clasificación se compararon los resultados dando a cada uno de ellos distintos valores.

- Número de iteraciones: representa las veces que las medias vuelven a ser calculadas y los píxeles reclasificados respecto a las nuevas medias. Para decidir el número óptimo de iteraciones se probó con valores de 1 a 5. En los resultados el mar queda mejor clasificado con una iteración, pero las distintas zonas del glaciar se aprecian mejor con más iteraciones, posiblemente porque aparecen más clases. No hay mucha diferencia entre 3 y 4 iteraciones.

- **Umbral de cambio:** determina la duración del proceso de clasificación al fijar el máximo porcentaje de cambio de las clases.
Con una iteración el resultado es el mismo independientemente del valor umbral. Los ensayos con 3 iteraciones y umbrales del 5, 15, 30, 45, 60, 75 y 90 % muestran que a partir del 15 % las imágenes clasificadas son las mismas que usando 2 iteraciones y un umbral del 5 %, ya que la clasificación acaba cuando el número de píxeles de cada clase cambia menos que el umbral de clase seleccionado o se alcanza el máximo número de iteraciones.
- **Número máximo y mínimo de clases:** al seleccionar este parámetro puede optarse por fijar un único número de forma que todas las clasificaciones tengan la misma cantidad de clases o dejar un rango para que la clasificación se ajuste a las peculiaridades de cada imagen y pueda reflejar la aparición de nuevas clases a lo largo de las distintas fechas.
Usando los valores mínimo y máximo que aparecen por defecto, 5 y 10 respectivamente, el número de clases del resultado aumenta progresivamente de 7 clases para una iteración a 10 para 5 iteraciones.
Al aumentar el número de clases, las clases nuevas aparecen en los bordes de los glaciares, ya que en estas zonas se concentra la mayor variabilidad en los valores de píxel.

Nº de iteraciones	Clases									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1,44	18,14	52,52	8,37	2,91	2,50	14,12			
2	1,35	23,67	43,96	11,16	3,21	6,44	10,21			
3	1,35	26,09	39,60	12,77	3,56	2,75	1,87	3,15	8,93	
4	1,35	26,79	37,72	13,68	3,67	2,62	3,96	2,45	7,76	
5	1,35	26,79	36,68	14,52	3,71	3,11	4,58	3,00	5,65	0,62

Tabla 11. Porcentaje de superficie cubierta por las distintas clases en función del número de iteraciones para una clasificación Isodata de la imagen del 22.11.07.

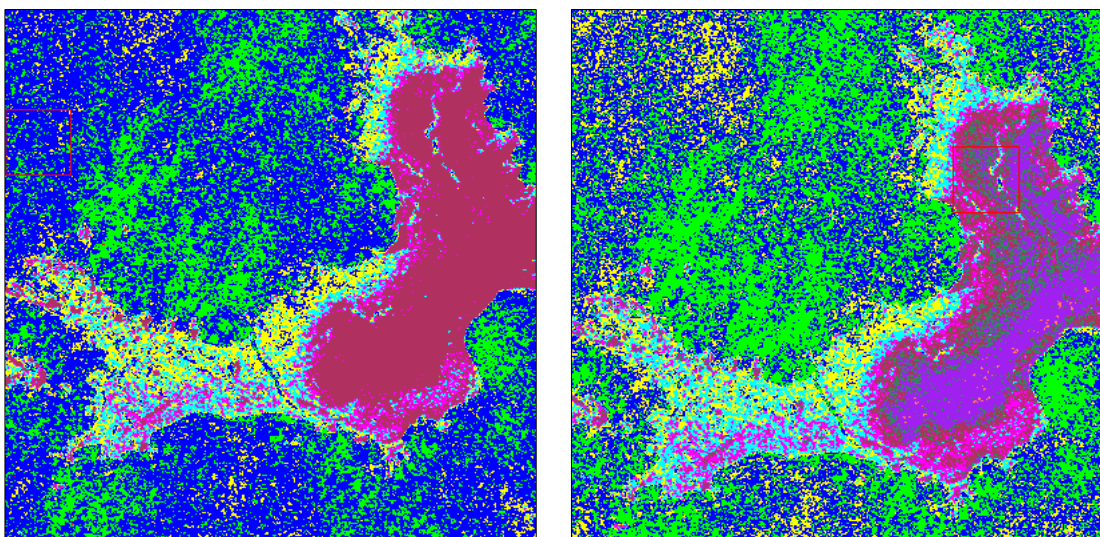


Figura 73. Comparación de los resultados de la clasificación Isodata usando 1 y 5 iteraciones.

De las pruebas realizadas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Para un mismo intervalo de clases, el número de clases del resultado es mayor y la clasificación se ajusta mejor con el mayor número de iteraciones, ya que las medias vuelven a ser calculadas con cada iteración.
- En cuanto al umbral de cambio, cuanto menor sea su valor más tarde se alcanzará, maximizando el número de iteraciones.
- Cuanto mayor sea el número de clases mayor será el detalle de información que ofrece la clasificación, aunque por otro lado, la finalidad de esta técnica precisamente es agrupar la gran diversidad de valores presentes en la imagen. El número óptimo de clases viene dado en consecuencia por el equilibrio entre un número suficiente que permita representar las distintas cubiertas, pero que a la vez permita comparar clases iguales en las distintas imágenes.

Por esta razón la opción final es usar un número elevado de clases, que serán posteriormente agrupadas salvo que correspondan a nuevos tipos de cubiertas. En concreto, los parámetros de la clasificación Isodata quedan fijados a **9 clases**, **5 iteraciones** y un **umbral de cambio del 5%**. Durante el proceso de post-clasificación se agruparán las clases que corresponden a la misma cubierta y se modificarán sus colores para que abarquen las mismas cubiertas en las distintas fechas.

Resultados de la clasificación

· **22.11.07**: el glaciar se incluye principalmente en dos clases, la verde oscuro y la morada, que parecen reflejar distintos ángulos de incidencia locales. Hacia los bordes aparecen las clases magenta y morada, pero ocupan una pequeña extensión, que podría corresponder a afloramientos rocosos. En el norte del frente glaciar también aparece la clase cyan. La Península de Byers, incluida principalmente en la clase magenta, parece estar dividida en dos regiones a lo largo de una línea ecuatorial: al norte la clase magenta se mezcla con la cyan, mientras que al sur se combina con la granate y con la verde oscuro, que se extiende sobre la línea de escarpes.

El mar está dominado por la clase azul, pero aparecen franjas de píxeles de color cyan o verde claro que parecen indicar la presencia de oleaje. La clase verde claro también se concentra en una región al este de la isla, reflejando una mancha oscura que aparece en esa zona del mar.

· **25.11.07**: la figura 75 tiene un aspecto bastante parecido a la anterior, aunque hacia los bordes del glaciar ha aparecido la clase azul del mar, empujando al resto de clases hacia el interior del hielo, y haciendo que los límites entre el mar y las zonas emergidas queden peor definidos.

La Península de Byers se incluye en la clase verde claro, que aparece en el norte y en el extremo oriental de la isla, y se extiende también sobre el límite del glaciar y algunas regiones de sus bordes occidentales y en las dos grandes manchas que aparecen en el mar. Hacia el sur de la Península la clase dominante es la azul del mar, mientras que las zonas de mayor relieve del Promontorio Ray han quedado de color granate.

El mar es una mezcla heterogénea de las clases azul y cyan.

· **29.11.07**: el aspecto de la isla en la figura 76 es más heterogéneo. Las clases verde oscuro y morado vuelven a ser las dominantes del glaciar, pero ésta última ha disminuido en el frente norte, donde la clase azul que aparecía en la imagen anterior ha crecido y se ha extendido también hacia el norte.

Gran parte de la superficie de Byers es de color verde, aunque hacia el norte aparece una gran franja de color rojo, clase que también se da en algunos puntos del suroeste. Estas dos clases son las que representan las manchas del mar, aunque en esta imagen el rojo domina sobre el verde.

El resto del mar es de color azul y cyan, aunque en la costa del norte y hacia el sureste aparecen píxeles magenta indicando una mayor señal de respuesta debida al oleaje.

· **01.12.07:** el aspecto del glaciar en la figura 77 ha variado bastante. Ahora aparece representado en verde oscuro y manchas granates hacia el noreste que se difuminan hacia el oeste. La mitad sur aparece en azul y cyan y se confunde con el mar, que aparece en los mismos colores. Sobre el mar aparece una gran mancha granate al sur de la región montañosa y franjas magenta próximas a la costa norte de las islas y hacia el noreste. Este color también aparece en los puntos más altos de la cordillera, indicando que se trata de zonas de elevada dispersión.

Byers es de color verde oscuro, al igual que el glaciar, con pequeños grupos de píxeles en azul y cyan.

· **05.12.07:** el aspecto de la figura 78 es más heterogéneo. Los límites de la isla no se aprecian demasiado bien, ni tampoco los de Byers y el glaciar, ya que pertenecen a las mismas clases que el mar. El glaciar y Byers aparecen representados además por la clase magenta, que se mezcla en algunos puntos con la clase verde claro, a la que cambian a partir de un determinado punto debido a la presencia de una línea que marca una discontinuidad en la imagen. Las clases verde oscuro y granate aparecen juntas en la región montañosa, el centro del domo glaciar, y algunos límites costeros, indicando zonas de gran reflectividad.

La clase roja también aparece en la isla Snow y mezclada con el verde claro a partir de la discontinuidad.

· **08.12.07:** Esta imagen también es bastante heterogénea. Los valores de respuesta de la mayor parte de la isla se parecen bastante a los del mar, y la mayor parte de la superficie aparece de color azul. Sólo las regiones más internas del glaciar, con mayor profundidad de la capa de hielo, aparecen de color verde oscuro rodeado por una delgada línea granate, color presente también en bastantes puntos de la costa y presenta una discontinuidad observable principalmente en el mar y a partir de la cual aparece, al sur de la isla, la clase cyan. El color magenta se presenta en el mar a ambos extremos de la imagen, y el verde claro aparece en una pequeña región de la parte norte del frente de la isla y hacia la mitad este, donde se mezcla con el rojo.

· **11.12.07:** en la figura 80, al azul y cyan que representan el mar se les une el color magenta, especialmente en la mitad sur de la imagen.

Las zonas de mayor espesor del glaciar concentran la mayor variabilidad de la imagen, ya que están representadas por varias clases. El verde oscuro es el que cubre la mayor superficie, mezclado con píxeles morados, y alrededor suyo aparece una línea delgada granate y magenta. A estas clases le sigue la clase azul. La mitad norte del glaciar está dominada por el verde claro, que también es la clase mayoritaria de Byers junto con el azul, y que aparece mezclado con la clase roja, la cual se concentra especialmente en la mancha del mar que aparece al sureste de la isla.

· **15.12.07:** en la figura 81 la mayor variabilidad de valores aparece en el mar, que concentra casi todas las clases. Por esta razón casi toda la superficie de la isla aparece de color rojo. En las zonas más internas del glaciar también aparece todo el conjunto de clases del mar, aunque el color dominante es el morado, especialmente en la región

montañosa. El color verde claro aparece en los bordes de la isla y en el límite entre la zona central del glaciar y la clase roja, y ocupa una parte importante hacia el este de Byers.

Las clasificaciones presentan una gran variabilidad entre ellas, y las mismas cubiertas son agrupadas en distintas clases dependiendo de la fecha. En la mayor parte de las imágenes la respuesta del mar es muy variable y condiciona en gran medida los resultados, disminuyendo la precisión de las clasificaciones (reduce el número de clases disponibles para agrupar los diferentes valores de la cubierta de hielo). Por ello sería conveniente crear algún tipo de máscara para clasificar únicamente la superficie de las zonas emergidas.

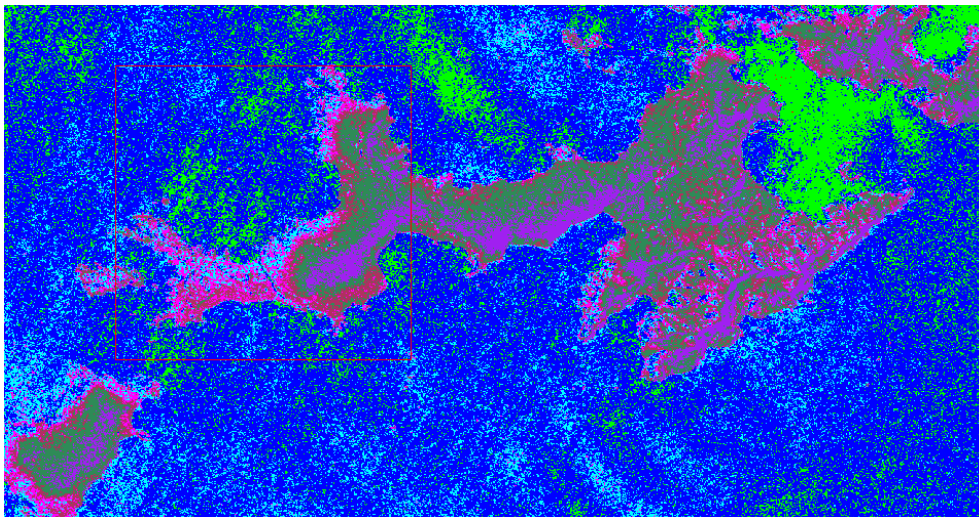


Figura 74. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 22.11.07.

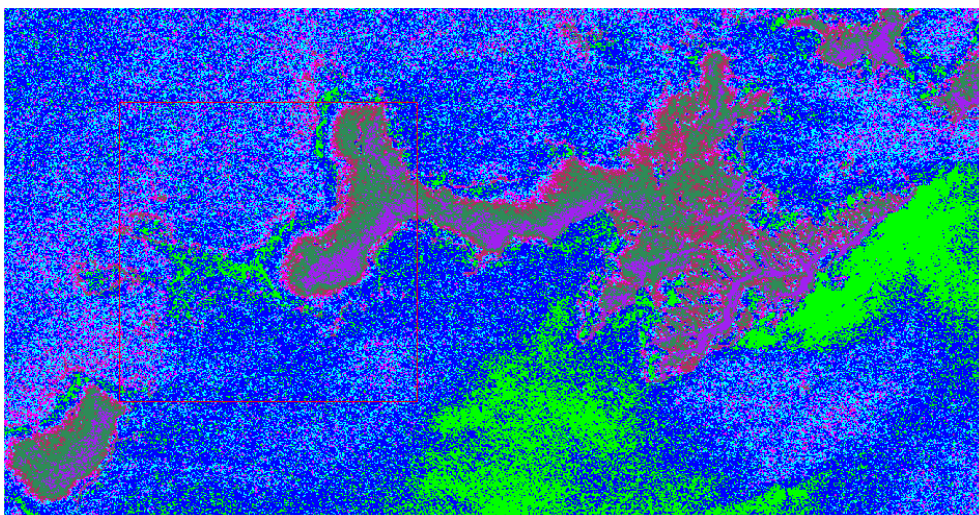


Figura 75. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 25.11.07.

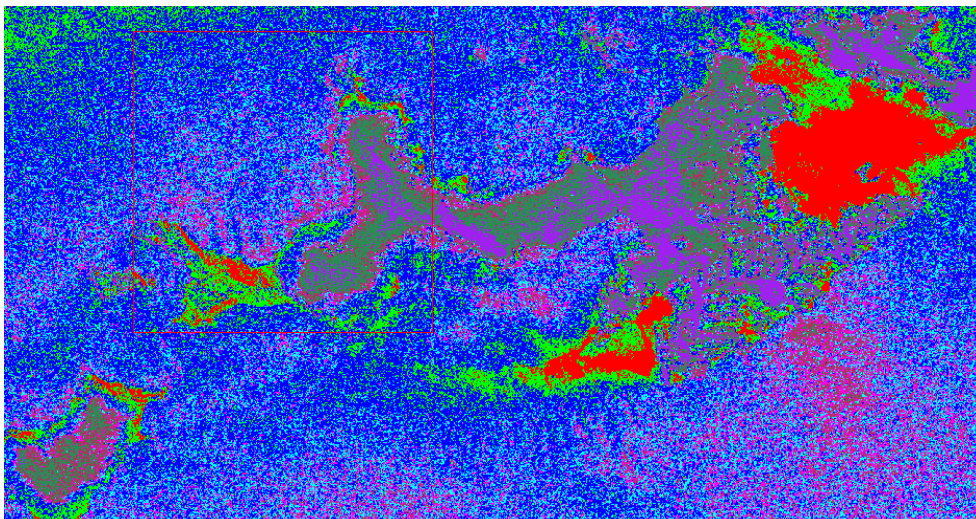


Figura 76. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 29.11.07.

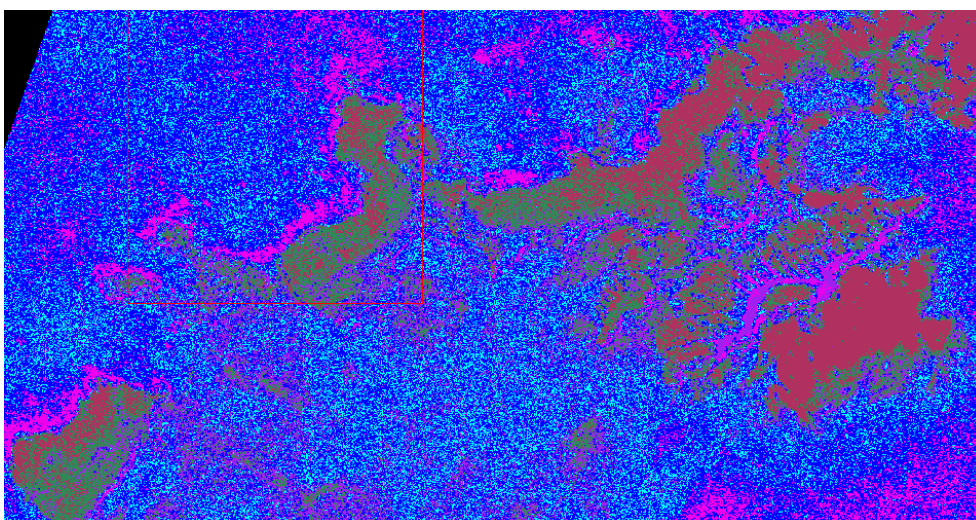


Figura 77. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 01.12.07.

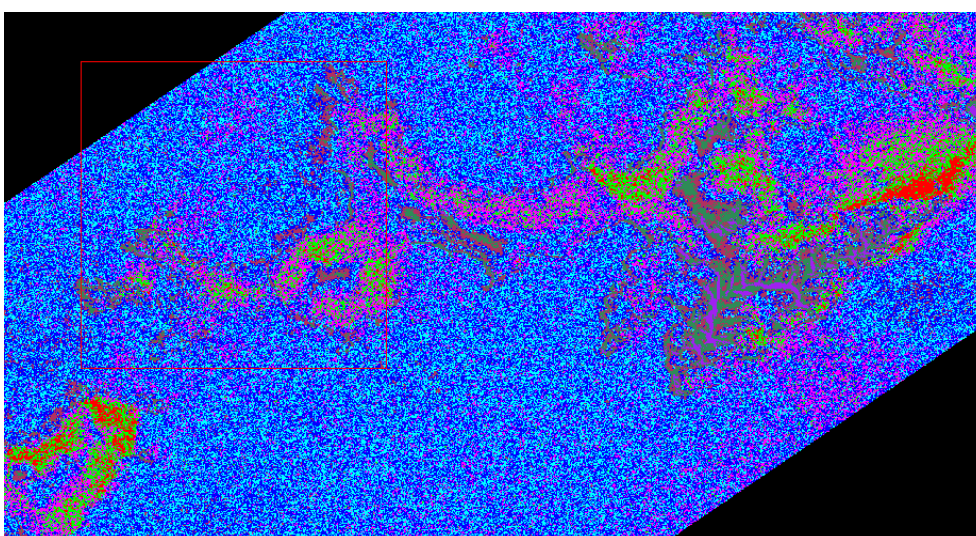


Figura 78. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 05.12.07.

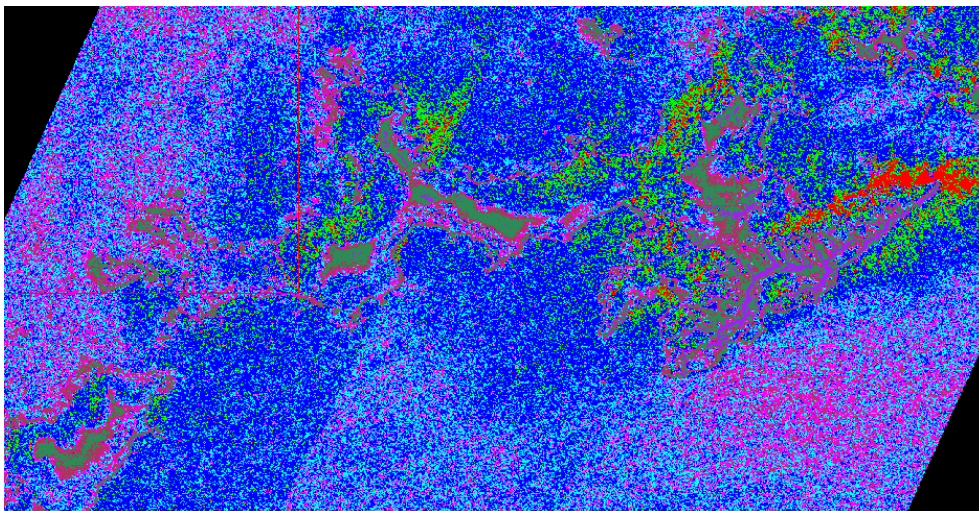


Figura 79. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 08.12.07.

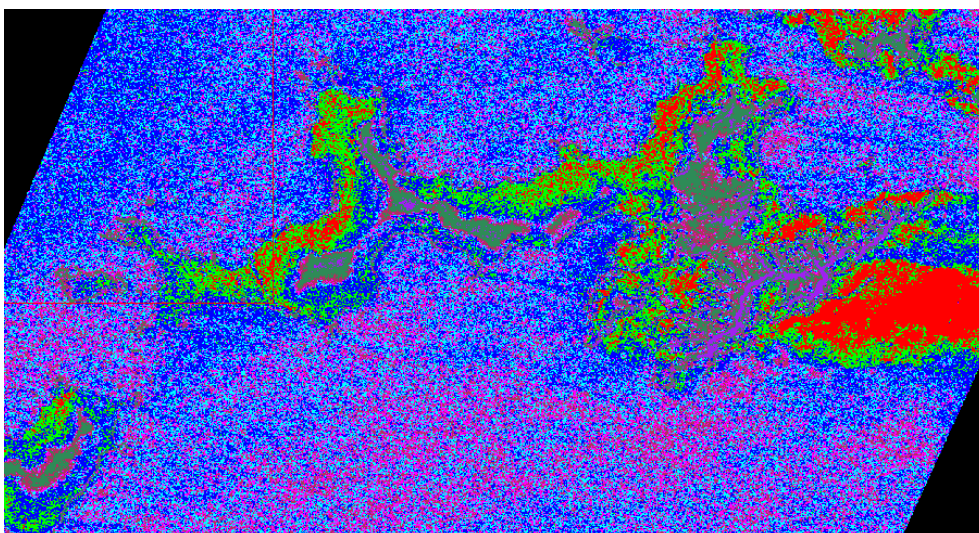


Figura 80. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 11.12.07.

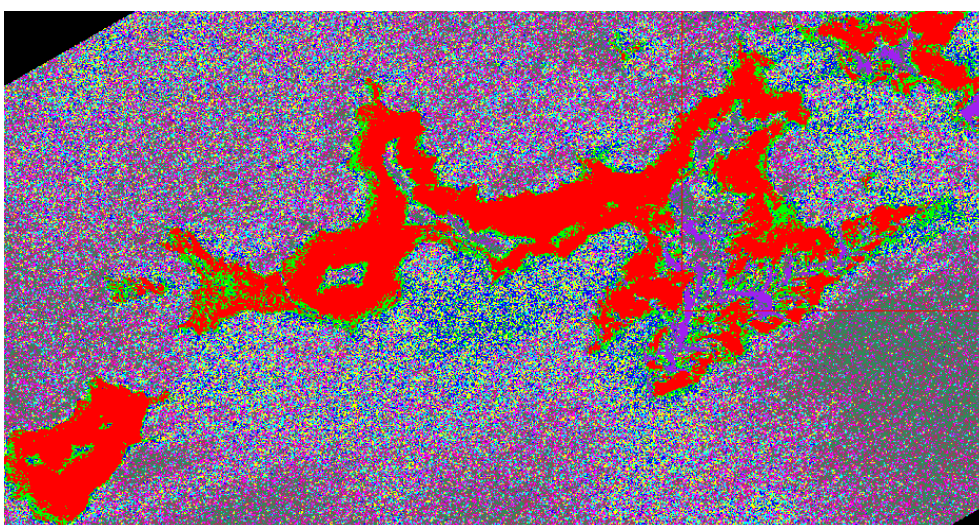


Figura 81. Resultado de la clasificación isodata para la imagen del 15.12.07.

5.2.3. Clasificación supervisada

Este método consiste en la agrupación de los píxeles del conjunto de datos basándose en clases de entrenamiento definidas por el usuario a través de ROI²⁰ (Regiones de Interés) homogéneas, o patrones espectrales (*endmembers*) individuales considerados representativos de los materiales que se quieren cartografiar.

Definición de Regiones de Interés

El primer paso consistió en definir las ROIs (*“Basic Tools / Regions Of Interest / ROI Tool”*) que serían usadas como clases de entrenamiento para clasificar el conjunto de imágenes a través de todos los métodos disponibles y usando las opciones que aparecen por defecto.

Una vez elegidas 7 ROIs en regiones de la Península de Byers aparentemente diferenciables entre sí, se calculó la separabilidad²¹ entre ellas (*“Options / Compute ROI Separability”* desde el menú de la ventana *“ROI Tool”*) y las estadísticas de cada una (con el botón *“Stats”* de la misma ventana) para comprobar que en efecto correspondían a regiones homogéneas y distintas entre sí.

De acuerdo con el informe de separabilidad las zonas que más se superponen son las clases *“mar”* y *“zona intermareal”* (1,51), lo que es bastante lógico dado que ambas representan cubiertas de agua líquida de distinto espesor. Le siguen *“taludes”* con *“playas de Robbery”* (1,81), las cuales también tienen un valor de separabilidad inferior al óptimo respecto a *“playas occidentales”* (1,88), también situada en la costa. El resto de ROIs muestran un valor de separabilidad adecuado.

En cuanto a las estadísticas, salvo la región *“Crestas”*, el resto presenta valores más o menos homogéneos, con distancias relativamente pequeñas entre los valores máximo y mínimo de cada fecha.

Selección del método de clasificación

En segundo lugar debe elegirse el método más adecuado para clasificar el material de estudio. Dado que la mayor parte de las opciones necesitan más de una banda para poder agrupar los píxeles todas las imágenes fueron superpuestas como distintas bandas de un archivo (*“Basic Tools / Layer Stacking”*).

A continuación se describen los distintos métodos de clasificación supervisada que ofrece ENVI y los resultados obtenidos. Las figuras muestran únicamente una parte de la imagen clasificada correspondiente a la Península de Byers, que es el lugar donde se centra el estudio y la única región de la isla donde se definieron ROIs:

²⁰ **ROI**: son porciones de imágenes compuestas por una combinación de polígonos, puntos o vectores seleccionadas gráficamente en cualquiera de las ventanas de visualización o definidas a partir de umbrales. Normalmente se usan para extraer estadísticas para clasificación, creación de máscaras y otras operaciones.

²¹ Las medidas de **separabilidad de Jeffries-Matusita** y de **Divergencia Transformada** calculan a través de las estadísticas la separabilidad espectral entre pares de ROIs seleccionadas para un determinado archivo. Sus valores oscilan entre 0 y 2. Valores mayores de 1’9 indican que las ROIs se separan bien; si son inferiores a 1 indican que sería conveniente combinar las dos regiones en una única ROI; y si su valor se encuentra entre 0 y 1 la separabilidad debe tratar de mejorarse editando la ROI o seleccionando nuevas regiones.

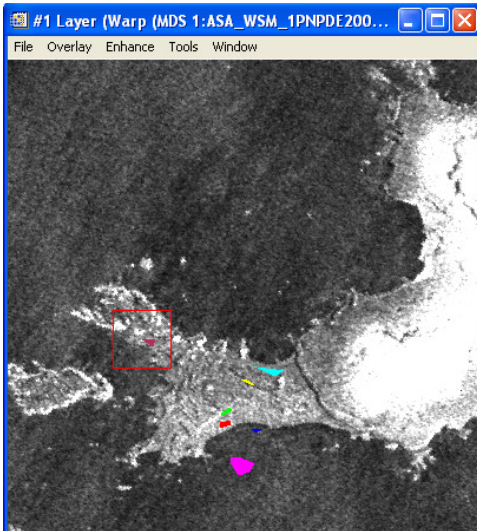


Figura 82. Polígonos correspondientes a las ROIs para seleccionar el método de clasificación supervisada.

Regiones de Interés	Color	
Mar	Magenta	
Zona Intermareal	Azul	
Playas Robberry	Cyan	
Playas del Sur	Rojo	
Playas Occidentales	Granate	
Taludes	Amarillo	
Crestas	Verde	

Tabla 12. Nombre y color de las ROIs definidas.

- **Paralelepípeda:** cada clase de entrenamiento forma un paralelepípedo de n dimensiones cuyos límites están definidos en base a un umbral de desviación estándar de la media de la clase. Las áreas que no coinciden con ninguna de las clases se designan como no clasificadas.
La zona intermareal apenas se distingue y han desaparecido algunos picos y crestas. Gran parte de la imagen no ha sido clasificada, especialmente la zona intermareal al norte y oeste de la isla, y gran parte de la superficie del glaciar, sobre la que, por otra parte, no ha sido definida ninguna clase.
- **Mínima Distancia:** calcula los vectores medios de cada región de interés y la distancia euclidiana de los píxeles respecto al vector medio de cada clase. Todos los píxeles son clasificados en la clase más cercana salvo que se especifique un umbral de desviación estándar o de distancia, en cuyo caso aquellos que no encajan con los criterios definidos quedan sin clasificar.
Todos los píxeles están clasificados. La zona intermareal sigue sin quedar muy definida pero se ve mejor. Las clases “talud” y “playa del norte” cubren más área del que deberían y la clase “crestas” no se distingue demasiado bien. El límite del glaciar pertenece a la clase “playas occidentales”.
- **Máxima Probabilidad:** asume que las estadísticas para cada clase tienen una distribución normal en todas las bandas y calcula la probabilidad de que un píxel dado pertenezca a una clase específica. Todos los píxeles son clasificados en la clase más probable, salvo que se seleccione un umbral de probabilidad.
Las playas del norte también aparecen clasificadas como “playas occidentales”, el área de “crestas” ha aumentado enormemente, la zona intermareal casi no se aprecia, y ha disminuido bastante el área de “taludes” a favor de “playas del norte”. El límite glaciar aparece como mar.
- **Distancia de Mahalanobis:** clasificador de distancia sensible a la dirección y similar al de máxima probabilidad pero asume que las covarianzas de todas las clases son iguales (reduce el tiempo de procesamiento). Todos los píxeles son

clasificados en la clase más próxima a no ser que se especifique un umbral de distancia.

Se parece al resultado de la clasificación de mínima distancia pero las clases están menos definidas. Ha disminuido la clase “playas del norte” (aunque aparecen nuevos píxeles) y la clase “taludes” se distingue peor porque ha crecido.

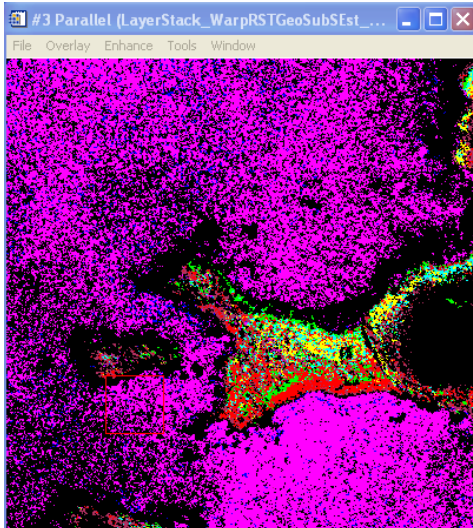


Figura 83. Clasificación Paralepípeda.

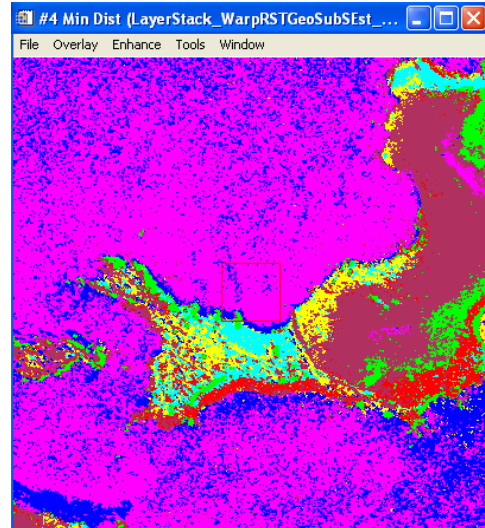


Figura 84. Clasificación de Mínima Distancia.

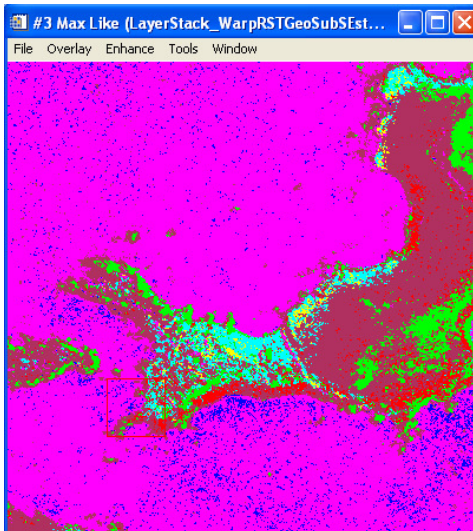


Figura 85. Clasificación de Máxima Probabilidad.

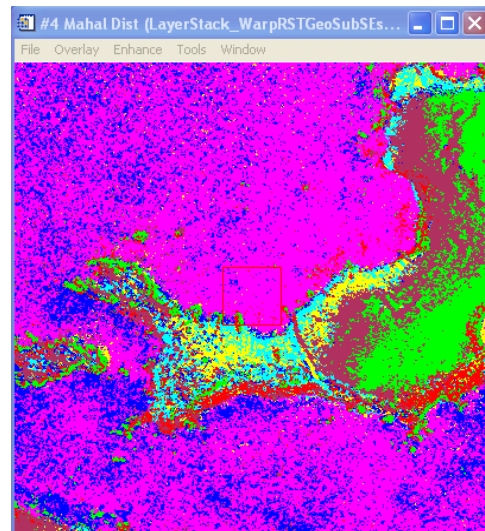


Figura 86. Clasificación de Distancia de Mahalanobis.

- Codificación Binaria: codifica los datos y patrones espectrales en 0 y 1 basándose en si una banda está por debajo o por encima de la media espectral, respectivamente. Una función booleana “OR” compara cada espectro de referencia codificado con los datos espectrales codificados y produce una imagen de clasificación. Los píxeles son clasificados en el espectro de referencia con el que coinciden en mayor número de bandas, salvo que se especifique un umbral mínimo de coincidencia.

Clasificación muy gruesa. Lo que más resalta son las crestas. Las playas del sur no están mal delimitadas.

- **Red Neuronal:** usa la propagación hacia atrás en una red neural con capas retroalimentada positivamente para el aprendizaje supervisado. Se puede seleccionar el número de capas escondidas a usar y entre una función de activación logística o hiperbólica. El aprendizaje ocurre ajustando pesos en el nodo para minimizar la diferencia entre el nodo de activación final y el resultado. El error se propaga hacia atrás a través de la red y el ajuste de peso se hace usando un método recursivo. Permite llevar a cabo una clasificación no lineal.

Las playas del sur aparecen muy difuminadas y se incluyen parcialmente en la clase “crestas”, que ocupan una gran extensión. Sin embargo, otras zonas bajas de la península aparecen en rojo. La península está clasificada principalmente en “playas de Robbery” y “crestas”, y la clase “taludes” ha desaparecido. Gran parte del mar aparece clasificado como “Zona Intermareal”, mientras que esta zona, sin embargo, ha sido clasificada como “Playas Robbery”.

A la vista de los resultados puede concluirse que los clasificadores que mejor separan las distintas cubiertas son los de Mínima Distancia y Distancia de Mahalanobis, aunque sus resultados tampoco son muy precisos.

El enfoque de la clasificación es comparar los resultados de las distintas fechas y detectar así los cambios que se han producido a lo largo del tiempo. Para clasificar imágenes individuales únicamente pueden usarse las clasificaciones Paralelepípeda y de Mínima Distancia, ya que el resto solo es aplicable a archivos de varias bandas. Por ello la opción finalmente elegida es el **clasificador de Mínima Distancia**, ya que el otro método no da muy buenos resultados y deja píxeles sin clasificar.

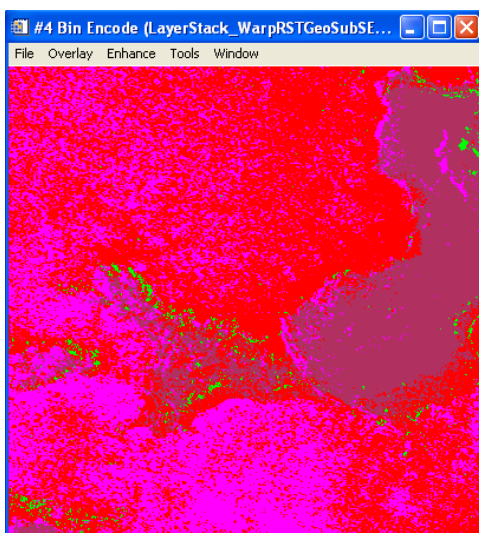


Figura 87. Clasificación de Codificación Binaria.

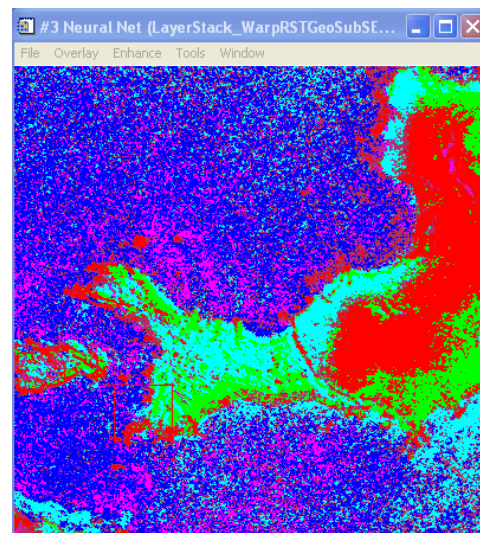


Figura 88. Clasificación de Red Neuronal.

Primera clasificación supervisada

En primer lugar se llevó a cabo una clasificación independiente de cada fecha creando ROIs específicas para cada una pero intentando que correspondiesen a las mismas cubiertas para poder comparar posteriormente los resultados. El número de clases de entrenamiento depende de las distintas cubiertas de la imagen. El criterio para su elección es que el resultado refleje el mar en tonos azules oscuros; las distintas clases de hielo glaciar en blanco y azules claros; las playas y zonas costeras en naranja; las plataformas elevadas en marrón; las regiones de mayor escarpe en amarillo; y las zonas de oleaje, si aparece, en tonos verdosos. A las imágenes originales en las que la distribución de las clases era relativamente heterogénea se les aplicó un filtro de paso bajo 3x3, que suaviza los componentes de alta frecuencia, y se reclasificó la imagen filtrada.

A continuación se presentan las imágenes de las ROIs usadas en cada fecha y los resultados de la clasificación.

- **22.11.07**: los límites entre mar y tierra están muy bien definidos, pero algunas áreas de la península han sido incluidas en la clase de nieve menos permanente y algunas zonas del glaciar han sido incluidas como tierra. No es necesario filtrar la imagen porque no tiene tanto ruido como las otras.

- **25.11.07**: como la imagen tenía bastante ruido fue previamente filtrada para homogeneizar las distintas zonas. Parte de las manchas que aparecen en el mar han quedado clasificadas como tierra y buena parte del glaciar ha quedado incluida en la clase de escarpes. Esta clase es la que sigue a la clase del glaciar con mayor elevación y profundidad, y su grosor es mayor en la mitad norte. Los escarpes de la península, en cambio, no han quedado muy bien reflejados. En las regiones más externas del glaciar aparecen clases de tierra, mientras que las ROIs definidas sobre estas superficies han sido desplazadas al mar.

- **29.11.07**: en la clasificación de la imagen filtrada aparecen 3 franjas con distintos colores a lo largo del mar, gran parte del cual ha quedado clasificado como nieve, y como tierra en el noreste. Lo que sí se distingue es la zona más clara que aparece en la imagen al norte de la isla, la cual posiblemente se deba al oleaje. En cuanto a la península, aunque sus límites se distinguen claramente, el interior ha quedado clasificado como mar o como nieve, y la clase siena, que corresponde a la meseta, casi no está presente.

- **01.12.07**: las clases de la imagen filtrada están más definidas, pero su distribución no refleja bien las cubiertas para las que habían sido definidas. Gran parte de Byers ha quedado incluida en alguna de las clases de hielo glaciar, y sus zonas costeras, que no aparecen clasificadas como tal, se han desplazado a algunas regiones del mar al oeste de la isla. Algunas regiones del glaciar han quedado clasificadas como las plataformas de la Península y como mar, y la clase definida para los escarpes sólo aparece en la región montañosa del sureste de la isla. Lo que sí ha quedado reflejado son las zonas de elevada señal de respuesta que aparecen en las aguas de la costa norte y en algunas regiones marinas sobre la mitad este de la isla.

La clase blanca, definida sobre las zonas más oscuras de la isla de Snow, al suroeste de Livingston, no aparecen sin embargo en esta isla.

- **05.12.07**: La distribución de clases en la imagen filtrada continúa siendo bastante heterogénea. El mar está representado principalmente por dos clases, la que corresponde, que aparece hacia el oeste, y una de las clases de hielo glaciar, que se extiende hacia el otro extremo cubriendo más de la mitad de la imagen.

Los límites de Byers son un poco difusos, y su superficie ha quedado cubierta por varias clases de hielo definidas sobre el glaciar y por la clase de la plataforma, que también se extiende por algunas regiones del glaciar. La clase definida para representar las playas ha quedado restringida a grupos de píxeles dispersos en el mar.

Los distintos tipos de hielo del glaciar han quedado representados en amarillo, clase que también cubre una parte importante de la región montañosa de Livingston, y por franjas blancas y del azul creado para el mar.

• **08.12.07**: los resultados de la clasificación no son muy buenos porque en la imagen original aparece una línea a partir de la cual se oscurecen los tonos de gris, aunque los resultados de la imagen filtrada son un poco más homogéneos.

El mar aparece en varios tonos de azul que cambian a partir de la línea mencionada anteriormente, aunque uno de ellos representa uno de los tipos de hielo del glaciar. También aparece la clase definida para las plataformas en una franja que atraviesa la península. En Byers esta clase ha quedado restringida a una pequeña región rodeada por las otras clases que también aparecen en el mar, y la clase naranja que representa las playas, no ha aparecido en la clasificación. Por estas razones los límites de Byers no están muy bien definidos.

La distribución de las clases sobre el glaciar se parece ligeramente a la de la imagen anterior.

• **11.12.07**: Los valores de esta imagen son bastante homogéneos, por lo que no es necesario filtrarla antes de hacer la clasificación.

La mayor parte del mar ha quedado de color azul, color que también aparece al sur de Byers, y en bastantes regiones del glaciar, especialmente hacia la mitad sur. El resultado refleja la mancha oscura que aparece en el mar al sureste de Livingston, para la que se creó una clase específica. En la parte inferior derecha de la imagen también aparece una región verde que corresponde a la clase creada para los tonos más claros del mar.

En cuanto a la Península de Byers, las clases dominantes son la que representa la playa y algunas clases de hielo del glaciar.

La distribución de las clases de hielo del glaciar, su distribución es similar a la de las dos fechas anteriores, con la clase blanca en las zonas de mayor elevación del glaciar, rodeada por una delgada franja de la clase amarilla, a la que le siguen la clase del mar y posteriormente una mezcla heterogénea de clases.

• **15.12.07**: en la clasificación de la imagen filtrada se pierde bastante información, por lo que se optó por clasificar la imagen sin filtrar.

La mayor parte del mar aparece clasificado en color azul, aunque una de las clases que aparece en la mitad derecha de la imagen corresponde a un tipo de hielo del glaciar. En la esquina superior izquierda, donde la imagen se oscurece, el mar también está representado por el naranja y siena creados en regiones de la península. Estas dos clases también aparecen en Byers mezcladas con clases de hielo glaciar y una clase verde creada sobre el mar. Aunque la distribución de estas clases es bastante aleatoria la Península se distingue claramente del mar.

Las zonas del glaciar con mayores valores de respuesta y mayor elevación aparecen clasificadas como mar, mientras que en sus límites están representados por clases de tierra.

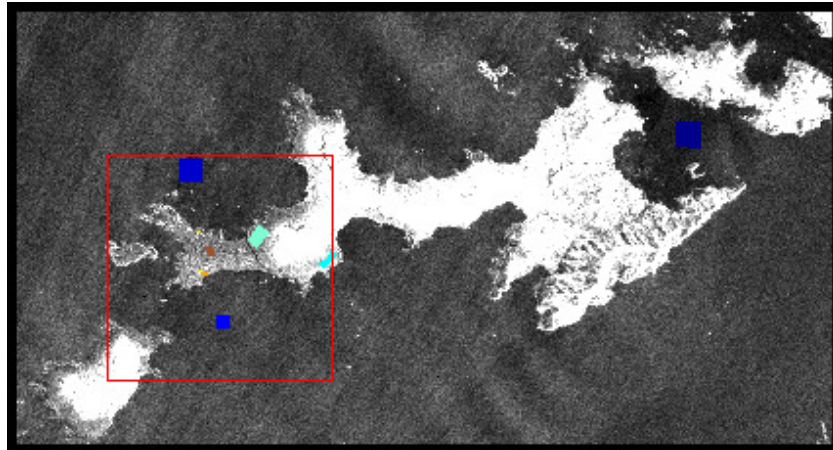


Figura 89a. ROIs definidas para la imagen del 22.11.07 sobre la isla de Livingston.

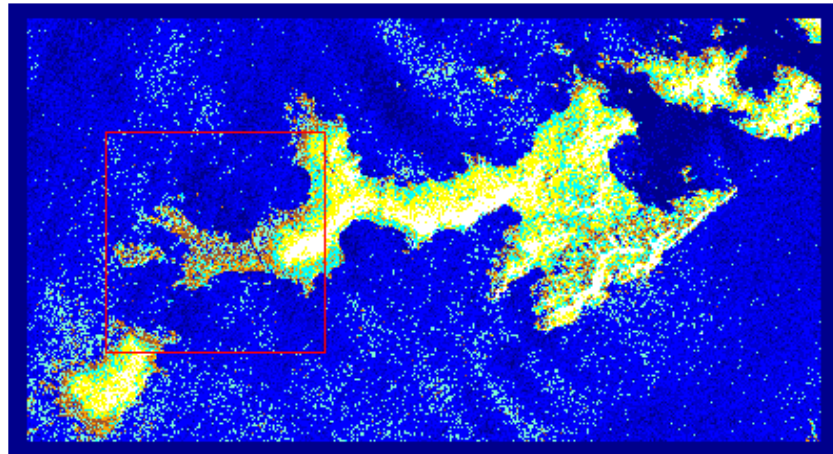


Figura 89b. Primera clasificación supervisada de la isla de Livingston a partir de la imagen del 22.11.07.

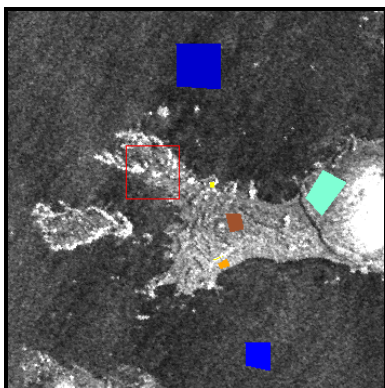


Figura 89c. Detalle de la Península de Byers con las ROIs definidas para la imagen del 22.11.07.

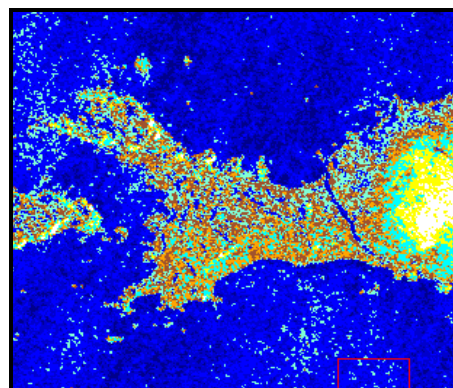


Figura 89d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada de la isla de Livingston a partir de la imagen del 22.11.07.

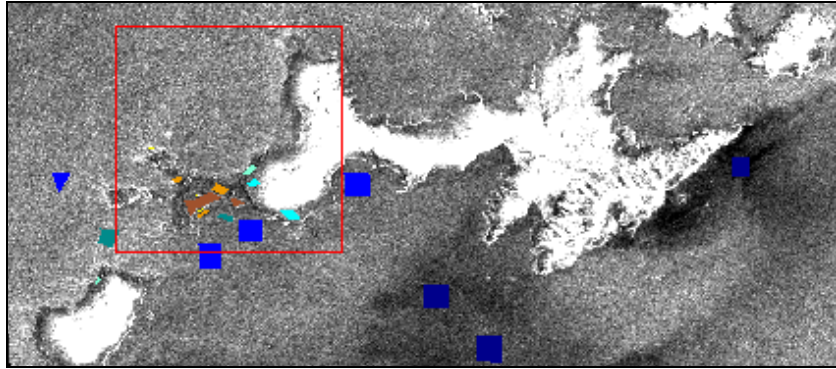


Figura 90a. ROIs definidas para la imagen del 25.11.07 sobre la isla de Livingston.

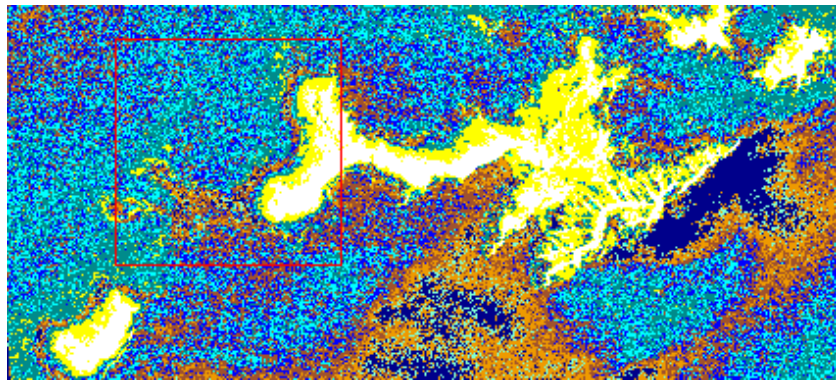


Figura 90b. Primera clasificación supervisada de la isla de Livingston a partir de la imagen del 25.11.07.

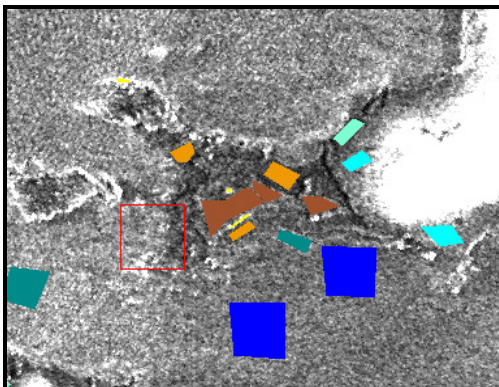


Figura 90c. Detalle de la Península de Byers con las ROIs definidas para la imagen del 25.11.07.

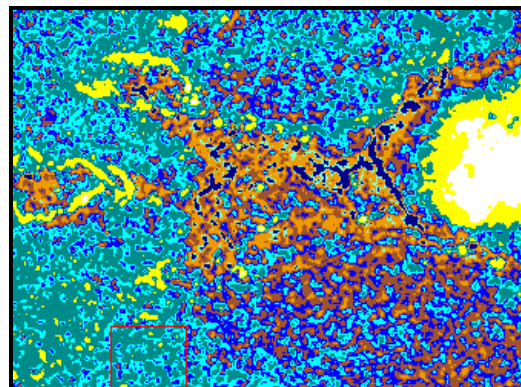


Figura 90d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada de la isla de Livingston a partir de la imagen del 25.11.07.

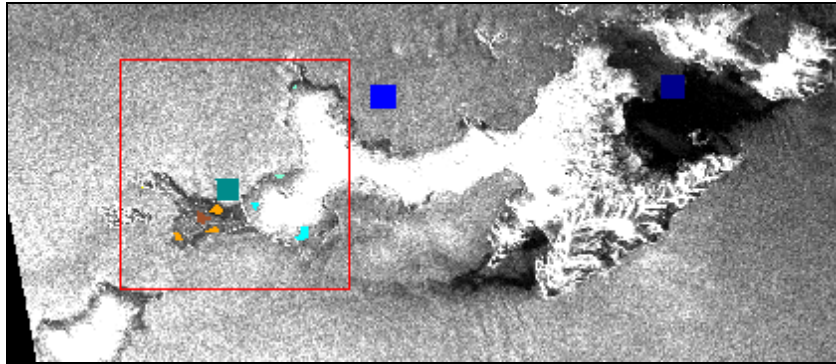


Figura 91a. ROI's definidas para la imagen del 29.11.07 sobre la isla de Livingston²².

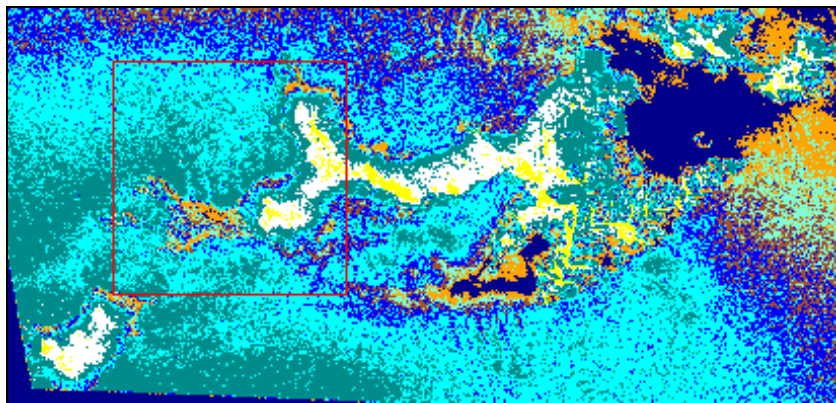


Figura 91b. Primera clasificación supervisada de la isla de Livingston para el 29.11.07.

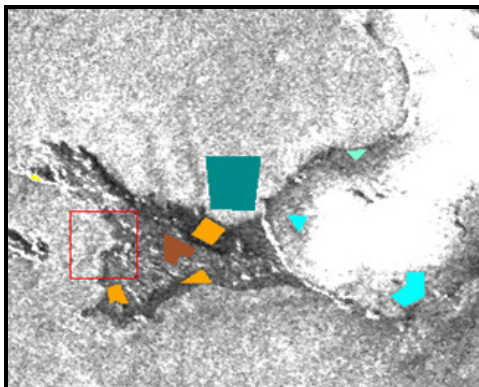


Figura 91c. Detalle de la Península de Byers con las ROI's definidas para el 29.11.07.

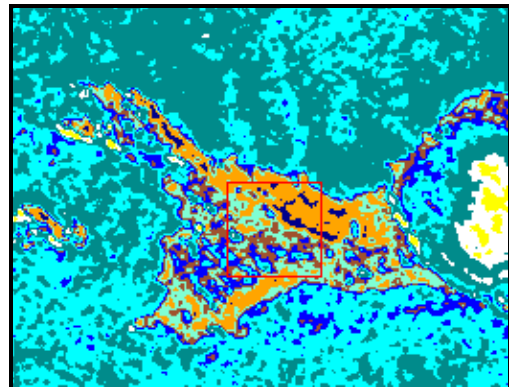


Figura 91d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada de la isla de Livingston para el 29.11.07.

²² Los bordes o áreas sin información que aparecen en algunas de las imágenes se deben a que las imágenes fueron cortadas antes de ser georreferenciadas.

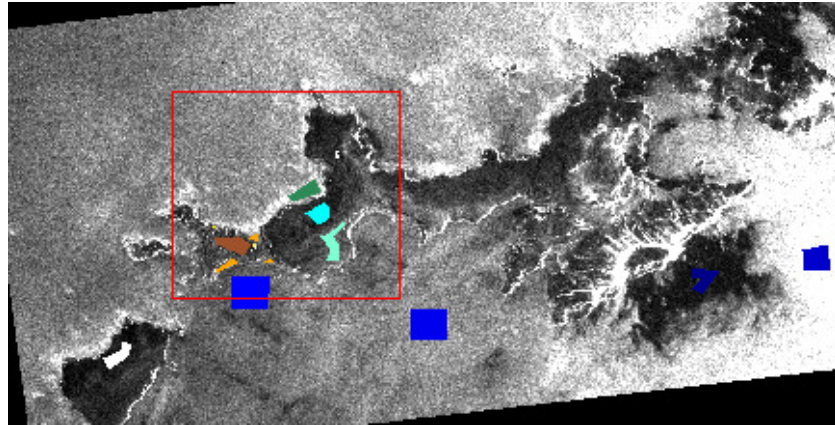


Figura 92a. ROIs definidas para la imagen del 01.12.07.

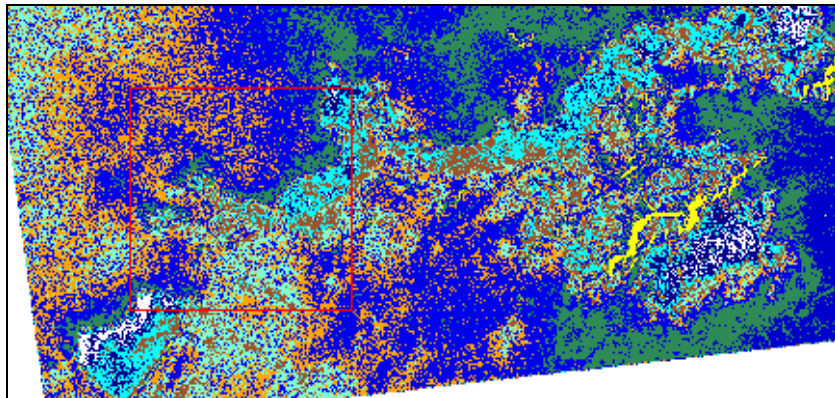


Figura 92b. Clasificación preliminar supervisada de la isla completa para el 01.12.07.

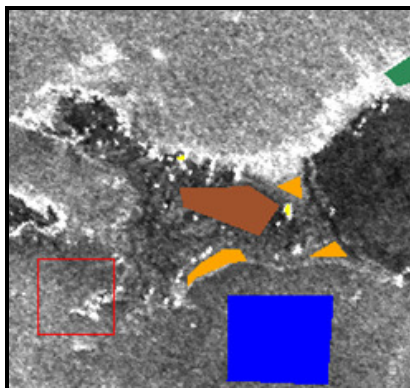


Figura 92c. Detalle de la Península de Byers con las ROIs definidas para el 01.12.07.

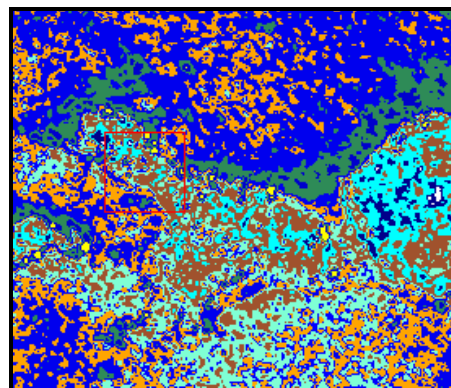


Figura 92d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada de la isla de Livingston para el 01.12.07.

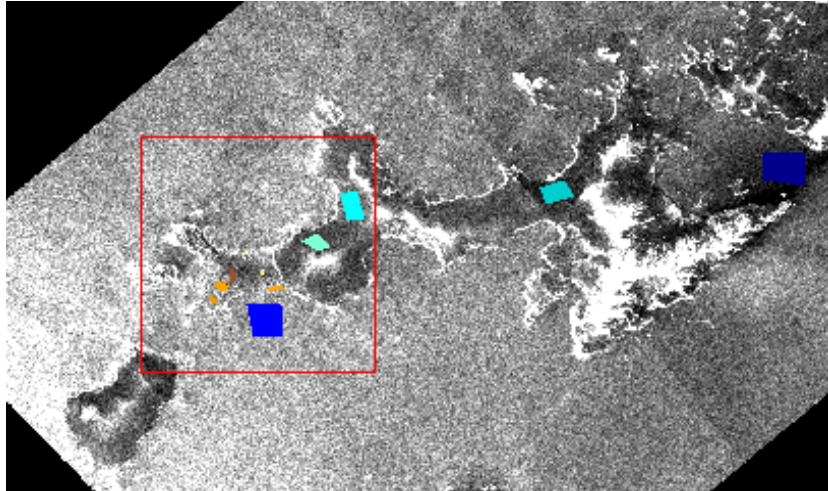


Figura 93a. ROIs definidas para la imagen del 05.12.07.

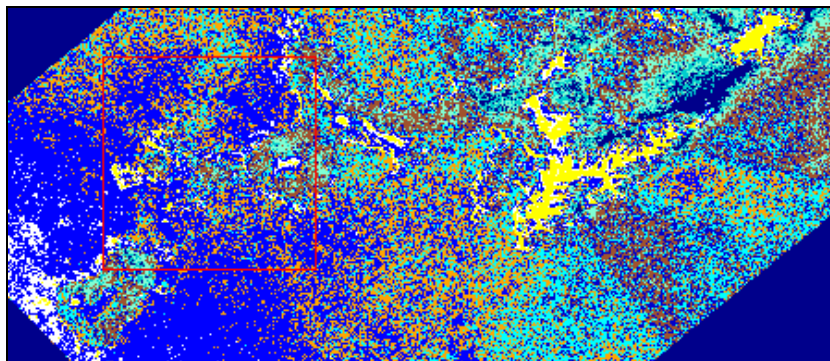


Figura 93b. Clasificación preliminar supervisada de la isla de Livingston para el 05.12.07.

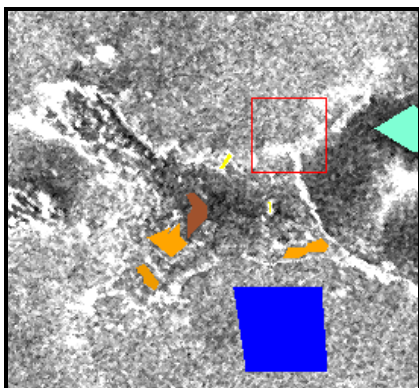


Figura 93c. Detalle de la Península de Byers con las ROIs definidas para el 05.12.07.

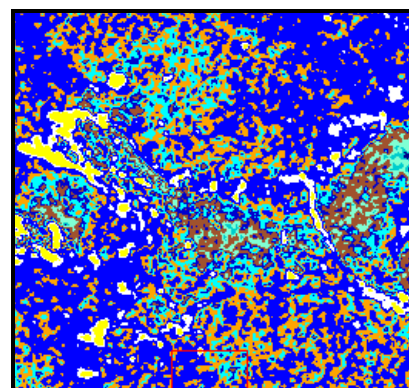


Figura 93d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada de la isla de Livingston para el 05.12.07.

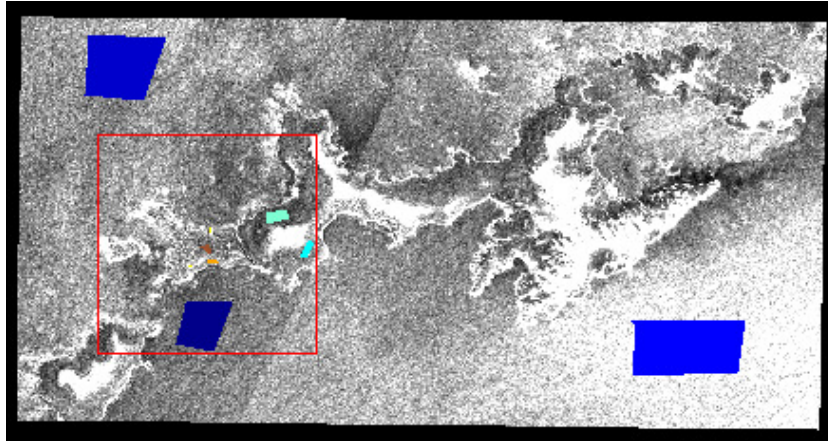


Figura 94a. ROIs para la imagen del 08.12.07 definidas sobre la isla completa.

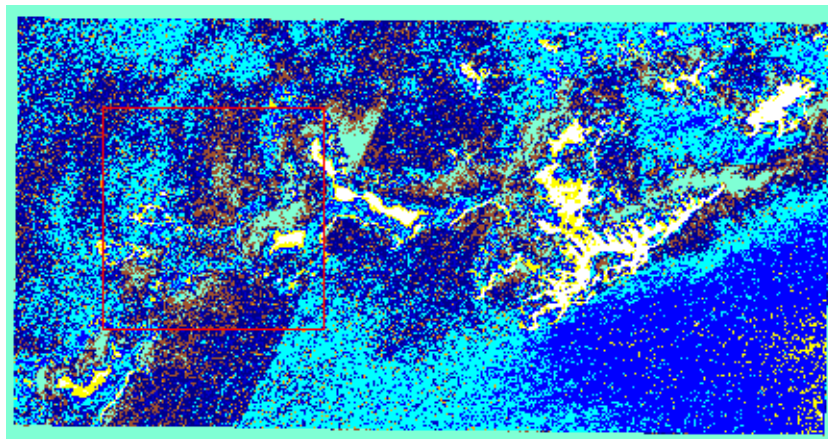


Figura 94b. Primera clasificación supervisada de la isla de Livingston del día 08.12.07.

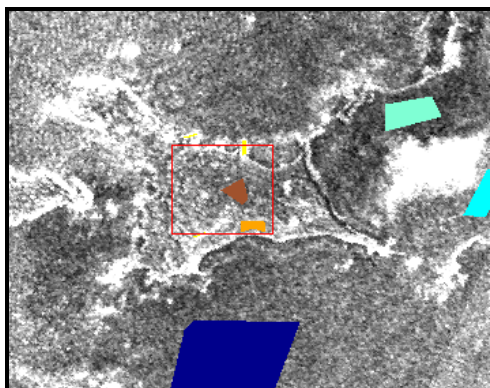


Figura 94c. Detalles de la isla de Livingston con las ROIs definidas para el 08.12.07.

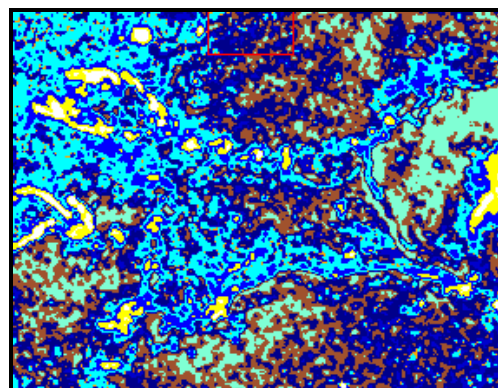


Figura 94d. Detalles de la isla de Livingston con la primera clasificación supervisada del 08.12.07.

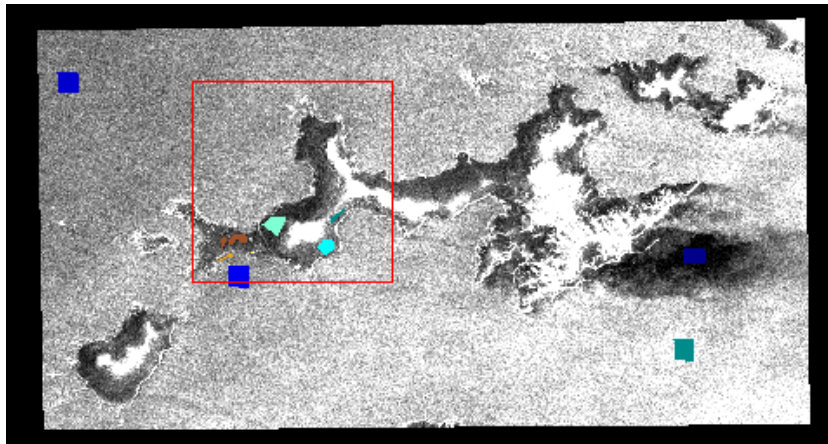


Figura 95a. ROIs definidas para la imagen del 11.12.07

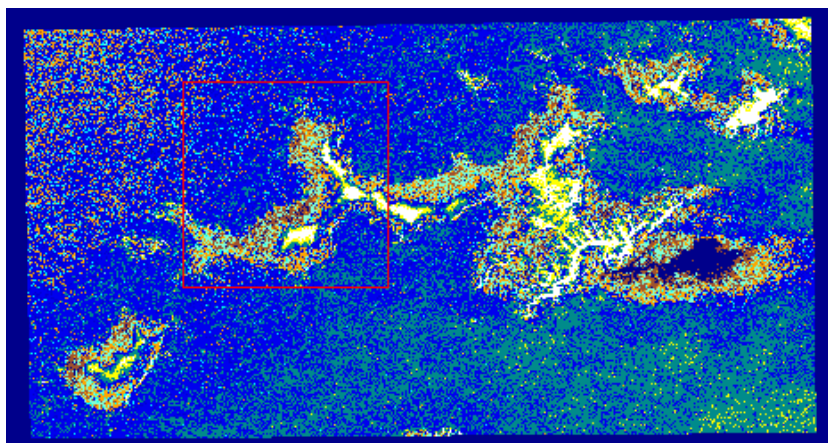


Figura 95b. Primera clasificación supervisada de la isla de Livingston del día 11.12.07.

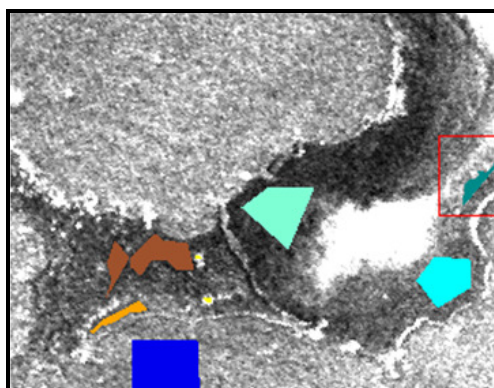


Figura 95c. Detalle de la Península de Byers con las ROIs definidas para el 11.12.07.

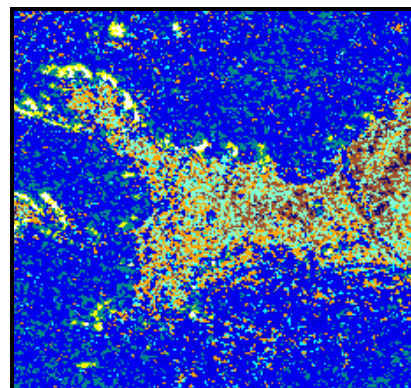


Figura 95d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada del 11.12.07.

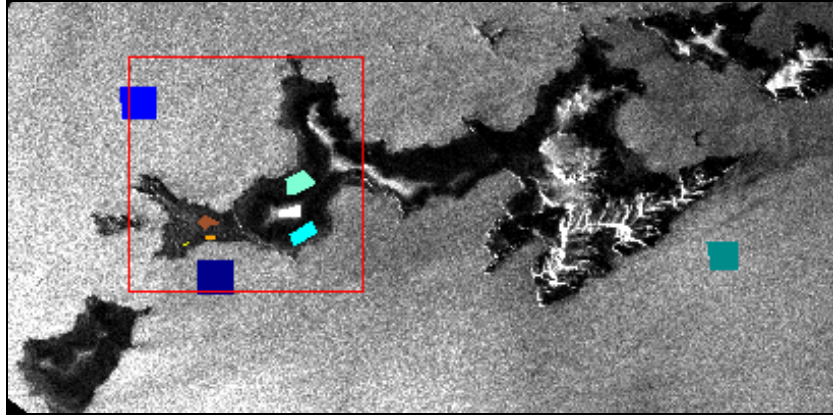


Figura 96a. ROIs definidas para la imagen del 15.12.07.

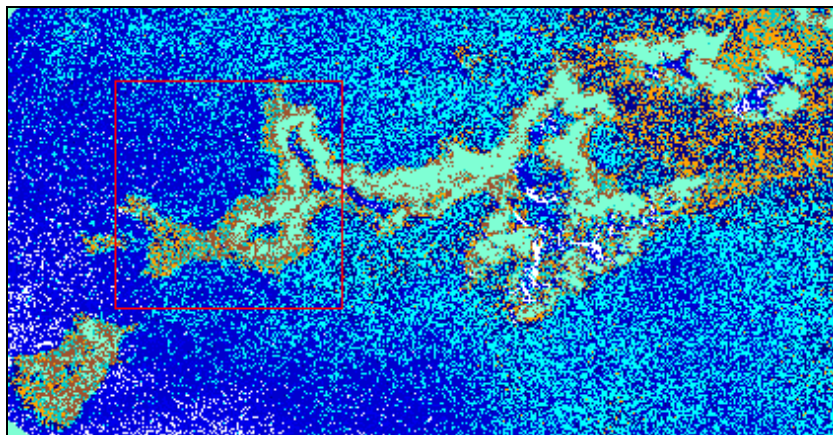


Figura 96b. Primera clasificación supervisada de la isla de Livingston del día 15.12.07.

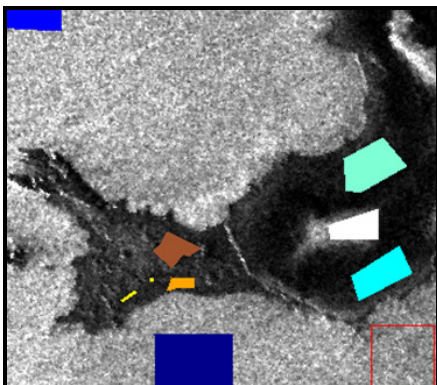


Figura 96c. Detalle de la Península de Byers con las ROIs definidas para el 15.12.07.

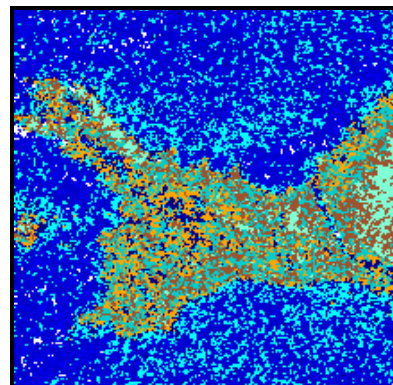


Figura 96d. Detalle de la Península de Byers con la primera clasificación supervisada del 15.12.07.

Segunda clasificación supervisada

Dada la gran variabilidad en los resultados de las clasificaciones anteriores se optó por utilizar otro enfoque a la hora de crear las clases de entrenamiento. En este caso el criterio utilizado es elegir unas ROIs básicas entre las distintas cubiertas de la primera imagen, para ir superponiéndolas y adaptándolas al resto de imágenes en función de los cambios que hayan tenido lugar. La base de partida fueron las 9 regiones definidas para la primera clasificación supervisada de la imagen del 22.11.07:

Regiones de Interés	Color	
Mar 1	Azul 1	
Mar 2	Azul 2	
Mar 3	Azul 3	
Hielo 1	Blanco	
Hielo 2	Cyan	
Hielo 3	Aguamarina	
Playas	Naranja	
Plataforma	Siena	
Crestas	Amarillo	

Tabla 13. Color de las ROIS definidas para la segunda clasificación.

Una vez definidas las clases de entrenamiento básicas se calculó su separabilidad para contrastar su validez. De acuerdo con los datos del informe la mayoría de regiones no presentan solapamiento, aunque algunas muestran valores bastante bajos de separabilidad (de hasta 1,353). En concreto, las clases con problemas de superposición son las distintas clases de tierra con el hielo menos compacto, dos clases de mar (pero eso tiene menos importancia, ya que la finalidad de crear varias clases en esta región es que toda la superficie marina quede azul), y las dos clases de hielo más reciente. El hecho de que algunas clases de tierra y nieve se confundan (al igual que en los resultados de las anteriores clasificaciones) posiblemente se deba a que por un lado, las zonas rocosas de la península están cubiertas por nieve en esas fechas y por otro, el glaciar está limitado por afloramientos rocosos.

Las imágenes de las clasificaciones resultantes se presentan a continuación:

· **22.11.07:** la clasificación de esta fecha es la misma que la de la primera clasificación supervisada.

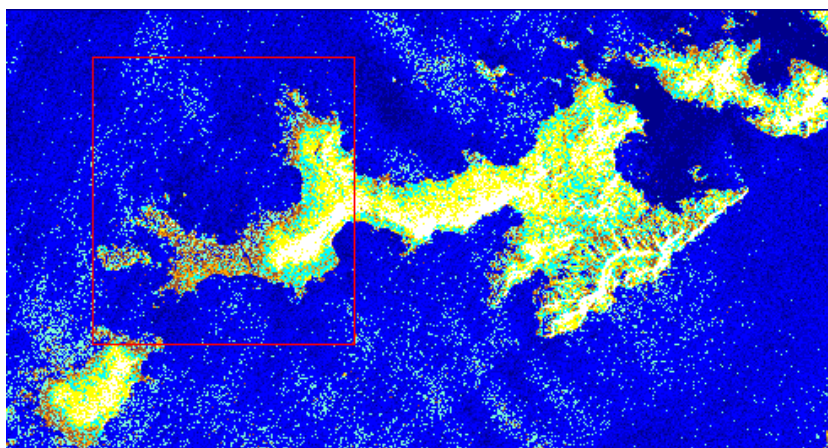


Figura 97a. Segunda clasificación supervisada de la imagen del 22.11.07 con la isla de Livingston completa.

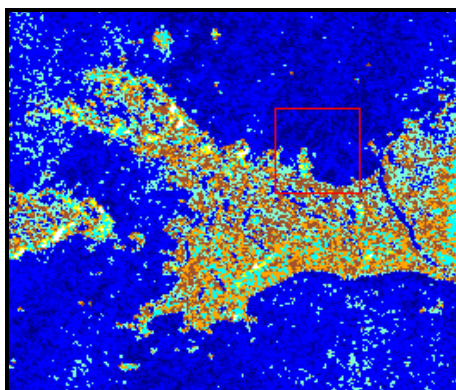


Figura 97b. Detalle de la Península de Byers con la segunda clasificación supervisada del día 22.11.07.

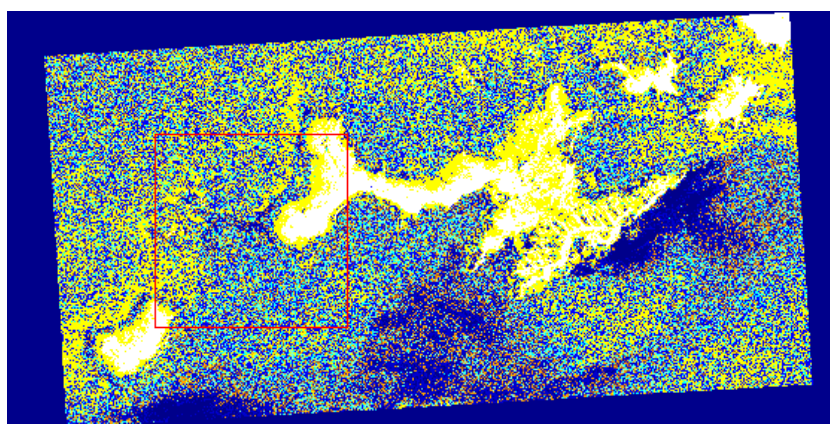


Figura 98a. Segunda clasificación supervisada del 25.11.07 con la isla de Livingston completa.

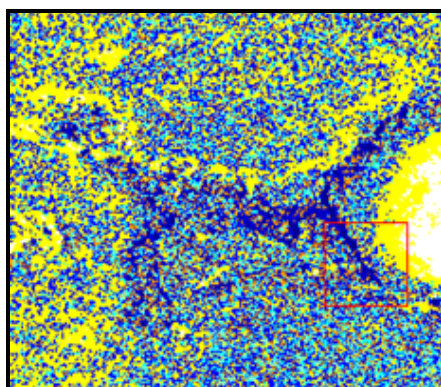


Figura 98b. Detalle de la Península de Byers con la segunda clasificación supervisada del día 25.11.07.

• **25.11.07:** para clasificar esta imagen se modificó una de las clases de azul para que coincidiese con la mancha oscura que aparece en el mar. Gracias a ello casi todo el mar aparece en azul, al igual que algunas zonas de la península de Byers. En el mar también aparecen regiones amarillas posiblemente debido a la mayor señal de respuesta causada por el oleaje. El glaciar está representado principalmente por dos clases, la blanca en el centro y la amarilla alrededor de ésta, aunque en los límites costeros aparecen diversas clases.

La distribución de las clases es bastante heterogénea, pero no compensa filtrar la imagen porque se pierde información.

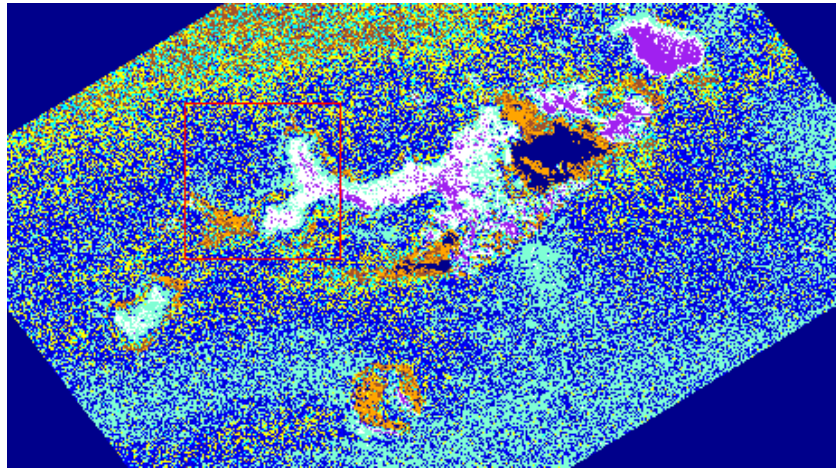


Figura 99a. Segunda clasificación supervisada de la imagen del 29.11.07 con la isla de Livingston completa.

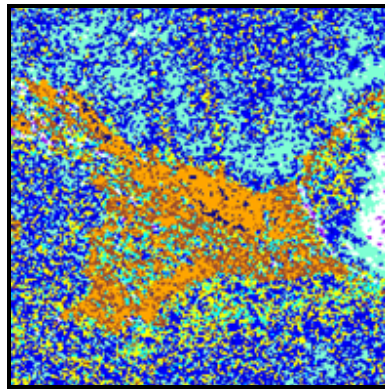


Figura 99b. Detalle de la Península de Byers con la segunda clasificación supervisada del día 29.11.07.

• **29.11.07:** la clasificación de la Península de Byers refleja las 2 clases de suelo definidas sobre su superficie, que aparecen mezcladas con píxeles dispersos correspondientes a clases de hielo glaciar y de mar. El mar ha sido incluido en la clase que le corresponde, aunque por el norte aparece una mezcla heterogénea de clases, principalmente la amarilla y la marrón, y por el sur ha sido clasificada como un tipo de hielo glaciar. La mancha que aparece al oeste de la isla ha quedado incluida en la clase azul oscuro definida sobre esa zona, aunque hacia los bordes cambia a la clase naranja de las playas.

Para poder reflejar la gran variedad de valores que aparecen en la zona del glaciar se creó una nueva clase de color morado en las zonas internas del glaciar. En el resultado aparece en pequeñas agrupaciones sobre las partes más elevadas del glaciar y en franjas más densas en algunas regiones. Esta clase está rodeada por la clase blanca, a la que sigue una pequeña franja de la clase aguamarina, seguida de la azul del mar, y de un conjunto heterogéneo de clases hacia los bordes.

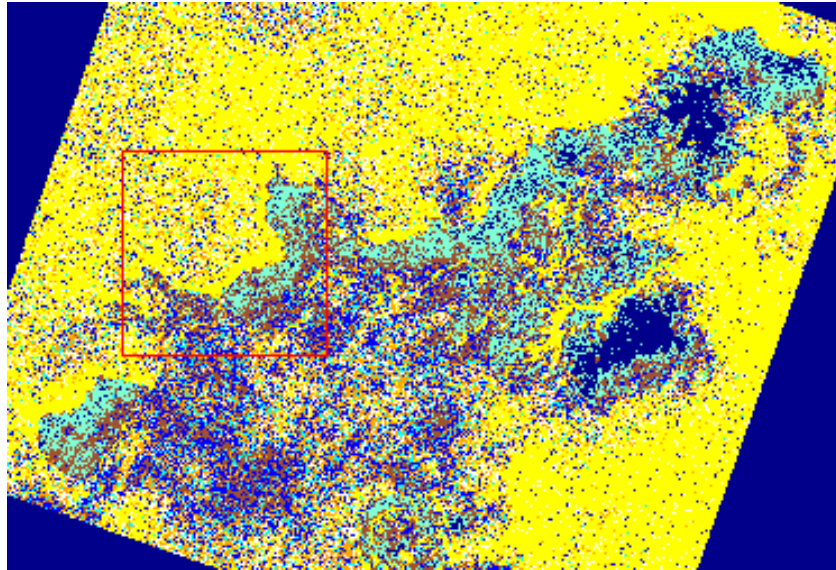


Figura 100a. Segunda clasificación supervisada de la imagen del 01.12.07 con la isla de Livingston completa.

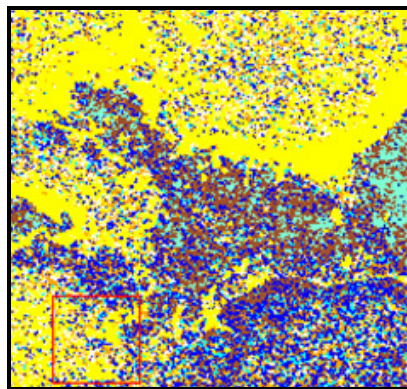


Figura 100a. Detalle de la Península de Byers para la segunda clasificación supervisada del 01.12.07.

• **01.12.07:** los valores de esta imagen son bastante distintos a los del resto de imágenes, por lo que las ROIs básicas fueron modificadas para que las clases reflejasen las mismas cubiertas que en las clasificaciones del resto de imágenes. La clase azul oscuro fue colocada en la mancha del mar, que en esta imagen aparece al suroeste de la isla y otra clase del mar fue colocada en una zona con valores elevados de respuesta. La clase siena fue ajustada a la zona más oscura de Byers y las clases de hielo a los valores que el glaciar presenta en esta imagen, que son bastante bajos.

Aún así el resultado de la clasificación no es muy bueno, ya que casi toda la superficie marina ha quedado de color amarillo y no se distinguen muy bien los límites de la isla, especialmente en la costa sur. La clase blanca del glaciar ha desaparecido y éste ha quedado incluido en la clase aguamarina hacia la mitad norte y en la clase siena hacia la mitad sur.

Respecto a la Península de Byers, la mayor parte ha sido incluida en la clase siena, aunque también aparecen la clase azul del mar y la aguamarina del hielo glaciar; la clase naranja de las playas no está presente y los bordes costeros han quedado de color amarillo.

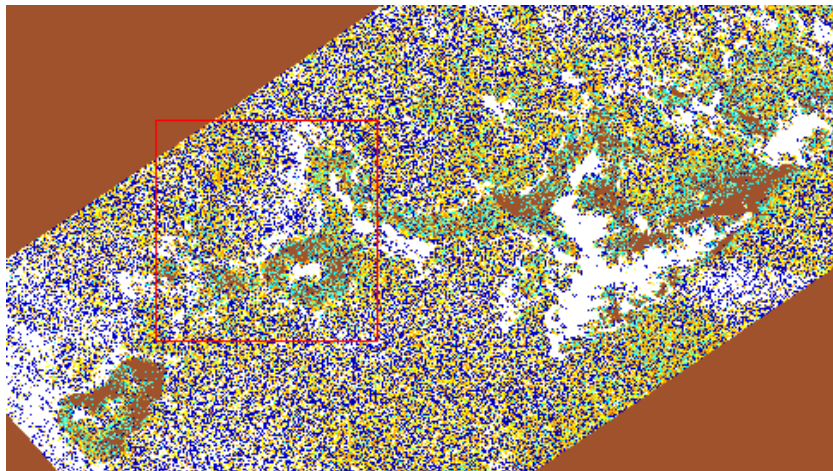


Figura 101a. Segunda clasificación supervisada de la imagen del 05.11.07 con la isla de Livingston completa.

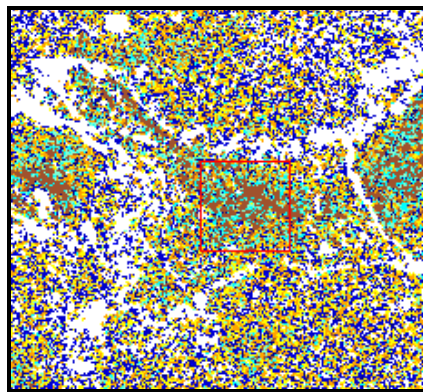


Figura 101b. Detalle de la Península de Byers para la segunda clasificación supervisada del 05.11.07.

· **05.12.07:** los resultados de la clasificación no son muy buenos ya que las clases no se presentan agrupadas y los límites de la isla sólo se distinguen en algunas zonas en las que los bordes, de gran reflectividad, han sido incluidos en la clase blanca. Esta clase también se extiende por la región montañosa formando una gran mancha continua, por las regiones más centrales del glaciar y en el límite de su lengua.

La clasificación de Byers también es bastante heterogénea, aunque puede observarse una alienación de la clase siena que sigue la costa norte del Promontorio Ray y continúa hacia el interior de la Península.

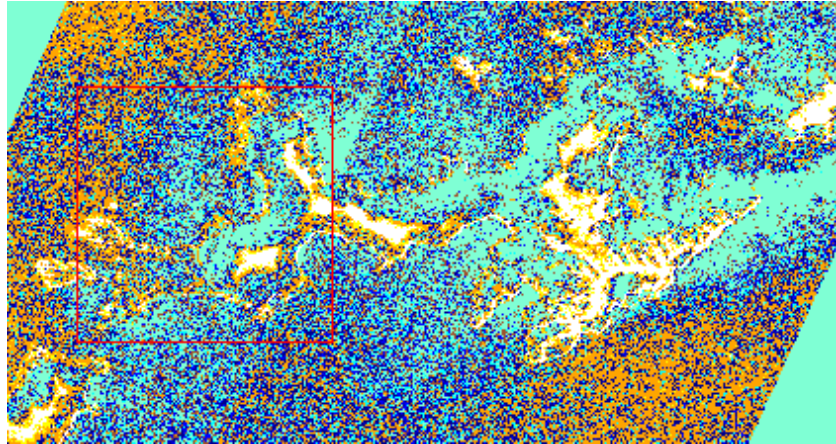


Figura 102a. Segunda clasificación supervisada del 08.12.07 con la isla de Livingston completa.

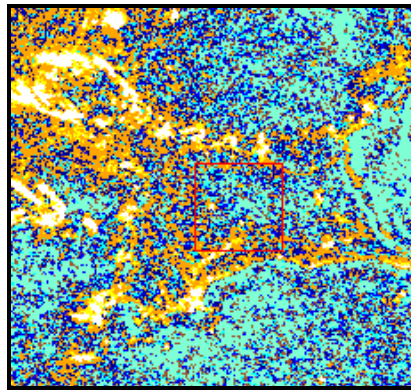


Figura 102b. Detalle de la Península de Byers para la segunda clasificación supervisada del 08.12.07.

· **08.12.07:** en esta clasificación los límites de la isla sólo se distinguen porque las clases amarilla y naranja cubren una línea a lo largo de toda la costa, ya que la mayor parte de la imagen, tanto lo que corresponde al mar como a tierras emergidas, ha sido incluida en la clase aguamarina.

Las zonas con mayores valores de respuesta que aparecen en las zonas centrales del glaciar, en la región montañosa y en las costas más escarpadas de la Península, aparecen en blanco y están rodeadas por línea delgada de las clases amarilla y naranja. El resto del glaciar ha quedado incluido en la clase aguamarina.

En la Península pueden distinguirse la costa y algunas alineaciones de escarpes que aparecen de color naranja y amarillo; el resto de su superficie aparece en azul y aguamarina.

La superficie del mar es bastante heterogénea, aunque en ella pueden distinguirse las regiones de mayor reflectividad presentes al sur de Livingston, las cuales aparecen de color naranja, y las manchas que se extienden hacia el este y que han quedado de color aguamarina en el resultado.

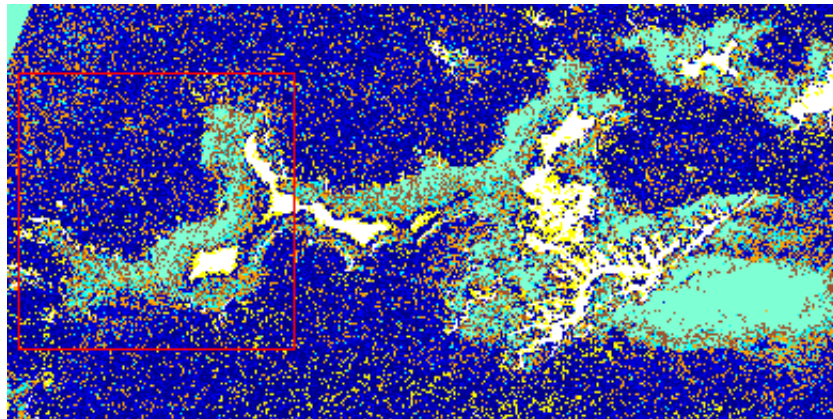


Figura 103a. Segunda clasificación supervisada del 11.12.07 con la isla de Livingston completa.

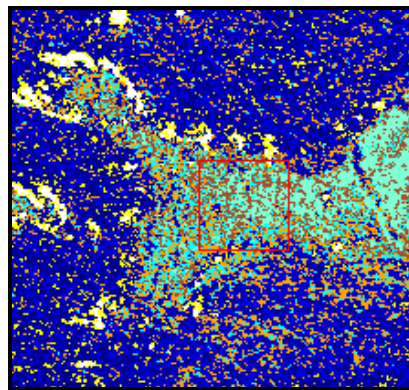


Figura 103b. Detalle de la Península de Byers para la segunda clasificación supervisada del 11.12.07.

• **11.12.07:** la superficie del mar de esta imagen es bastante homogénea, lo que permite distinguir claramente el contorno de la isla. Aunque la mayor parte ha quedado clasificada en azul, aunque aparecen píxeles sueltos de color amarillo, lo que indica la presencia de oleaje. También se refleja en el resultado la mancha que aparece al sureste de la isla, que ha sido incluida en la clase aguamarina.

Respecto a los tipos de hielo del glaciar, las zonas más internas están representadas por la clase blanca rodeada de una delgada línea amarilla, la cual podría corresponder al mismo tipo de cubierta. Después aparece la clase de mar y finalmente la clase aguamarina, que domina casi toda la extensión del glaciar. Esta clase también se extiende por toda la Península de Byers combinada con la clase marrón. Pueden apreciarse los escarpes que delimitan las playas del sur, los cuales aparecen en azul, y los de los cabos y acantilados del norte y noroeste de la isla, que han sido incluidos en la clase blanca y amarilla.

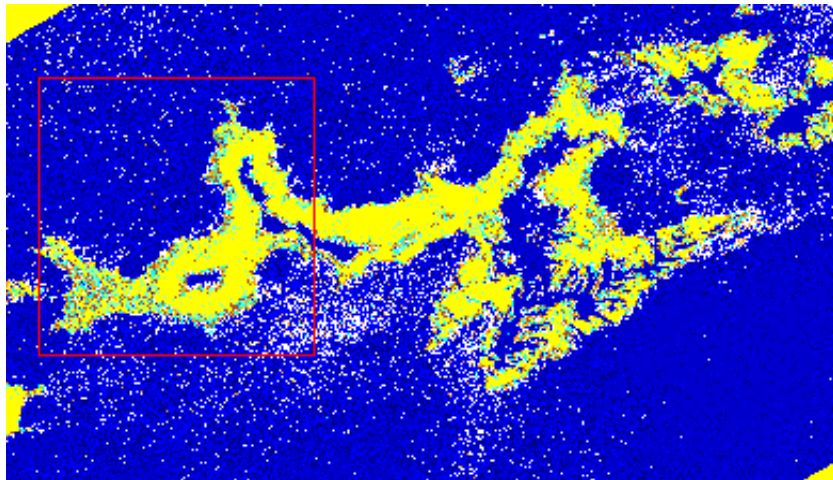


Figura 104a. Segunda clasificación supervisada de la imagen del 15.12.07 con la isla de Livingston completa.

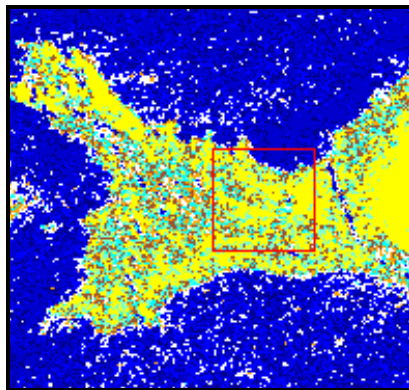


Figura 104b. Detalle de la Península de Byers para la segunda clasificación supervisada del 15.12.07.

• **15.12.07:** aunque la mayor parte del mar ha quedado de color azul (con píxeles dispersos de color blanco), los resultados de esta clasificación no son muy buenos porque el glaciar está únicamente representado por dos clases: la azul del mar, en el centro y zonas más elevadas de la región montañosa, y la amarilla, que la rodea y abarca la mayor parte de la superficie. Hacia los bordes se concentra un grupo heterogéneo de clases, lo que indica que en estas zonas es donde se concentra la mayor variabilidad.

En cuanto a la Península de Byers, puede distinguirse una región central heterogénea en la que dominan las clases aguamarina y Siena, y regiones clasificadas en amarillo en los escarpes y zonas costeras.

Los resultados de esta clasificación presentan, si cabe, una mayor variabilidad entre imágenes y las comparaciones que pudieran hacerse, por lo tanto, no son muy precisas.

5.2.4. Clasificación temporal

La baja resolución espacial de las imágenes hace que la calidad de la información disponible no sea muy buena, lo que quedó demostrado tras los intentos fallidos de estudiar los cambios a través de las imágenes individuales clasificadas. No obstante, esta baja resolución en el dominio espacial puede contrarrestarse aprovechando la gran resolución temporal que ofrece la disponibilidad de imágenes de la misma zona en distintas fechas. Para poder explotar la información temporal adicional que alberga el conjunto de las imágenes se creó un archivo multitemporal a partir del cual se clasificarían las evoluciones temporales de las distintas cubiertas usando herramientas espectrales.

Creación de un archivo multitemporal

El archivo multitemporal fue creado a través de la opción “*Basic Tools / Layer Stacking*” del software ENVI, que permite la superposición de imágenes georreferenciadas como bandas de un único archivo. Los archivos (o subconjuntos espaciales o espectrales) que quieren ser superpuestos se seleccionan a través del botón “*Import File*” del diálogo “*Layer Stacking Parameters*”. La superficie geográfica del archivo final puede incluir la extensión cubierta por todos los archivos originales (eligiendo la opción “*Inclusive*” en el apartado “*Output File Range*”) o únicamente el área en el que todos los archivos se superponen (opción “*Exclusive*”). Las bandas originales son remuestreadas y reproyectadas en una proyección y tamaño de píxel común seleccionadas por el usuario o usando la de uno de los archivos de entrada.

En nuestro caso los archivos de entrada eran todas las imágenes georreferenciadas de las distintas fechas ya cortadas y con el mismo tamaño de píxel y proyección, pero de todas formas se eligió la opción inclusiva y la proyección y dimensiones de la imagen del 22.11.07.

La obtención de un archivo con varias bandas permite la creación de composiciones de color colocando 3 imágenes de distintas fechas en las bandas del rojo, verde y azul, lo que facilita la visualización de las características de la superficie de la isla y los cambios que se producen a lo largo de las fechas elegidas.

Por otro lado, aunque las imágenes ASAR han sido obtenidas a una sola frecuencia, al superponer las distintas fechas en canales de un único archivo, cada píxel contiene información sobre los valores digitales para las distintas imágenes solapadas. Este fichero multitemporal tiene la misma estructura que las imágenes multiespectrales y por ello los algoritmos espectrales, diseñados para productos que contienen varias bandas a distintas frecuencias, pueden operar con los canales del fichero creado, que corresponden a la misma frecuencia pero son de distintas fechas.

Clasificación Angular Temporal

La clasificación se llevó a cabo mediante el clasificador SAM (“*Spectral / Mapping Methods / Spectral Angle Mapper*”), que usa un algoritmo para determinar la semejanza a partir del ángulo entre el patrón espectral de referencia (procedente de archivos ASCII, librerías espectrales o de la media espectral de ROIs) y el espectro de cada píxel,

tratándolos como vectores en un espacio con el mismo número de dimensiones que de bandas.

Como la información disponible en nuestro caso son imágenes de una sola frecuencia colocadas como bandas de un mismo archivo el método utilizado sería una **Clasificación Angular Temporal** (y no espectral) a partir de los patrones temporales de los píxeles; las clases representarían de esta forma dos tipos de información: naturaleza de la cubierta y variación temporal de la misma.

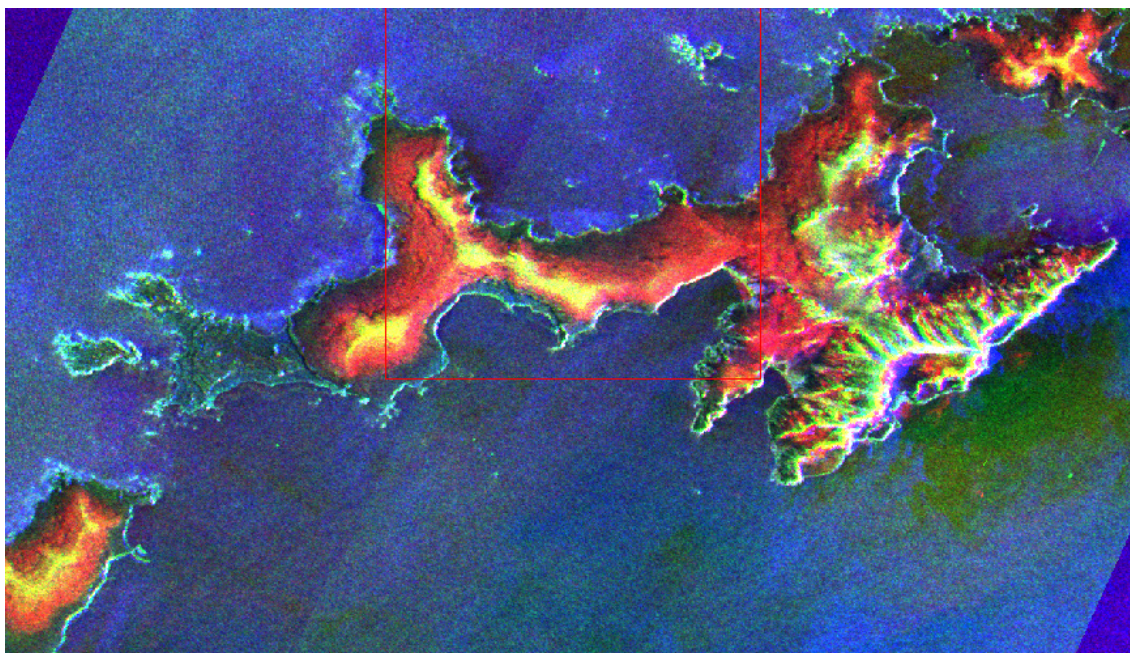


Figura 105. Composición de falso color formada por la banda 2 (25.11.07) en el canal rojo, la banda 4 (01.12.07) en el canal azul y la banda 6 (08.12.07) en el canal verde.

El primer paso consiste en seleccionar patrones temporales (“*endmembers*”) que se consideren representativos de las posibles evoluciones de cada cubierta. Para ello se creó una composición en falso color con 3 bandas del archivo multitemporal (que pueden irse modificando una vez cargadas) y se analizó el espectro de los píxeles a partir del diagrama de perfil Z (“*Tools/ Profiles/ Z Profile (Spectrum)*”). Los *endmembers* considerados representativos se guardaron en una biblioteca espectral²³ (a través de “*File / Save Plot As... / Spectral Library*” desde el menú de la ventana “*Spectral Profile*”) para usarlos como patrones de referencia a partir de los cuales clasificar el conjunto de imágenes en base a los patrones temporales de sus píxeles.

²³ **Biblioteca espectral:** recopilación de medidas de radiometría en bases de datos que almacenan el espectro de distintos materiales.

Las bibliotecas espectrales de ENVI se almacenan en el formato de imagen ENVI, en el que cada fila de la imagen se corresponde con un espectro individual, y cada columna representa una medida individual del espectro a una longitud de onda específica.

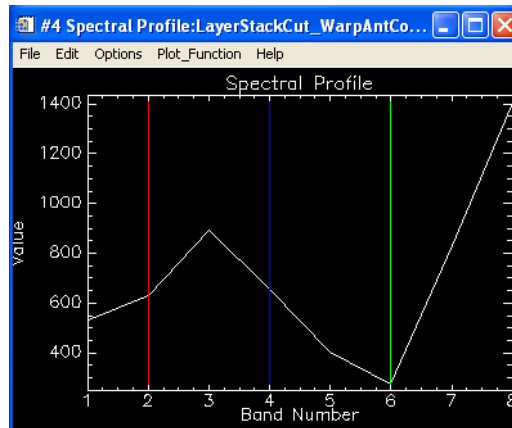


Figura 106. Diagrama de perfil Z que muestra los valores que toman los píxeles seleccionados en las distintas bandas del archivo multitemporal.

En primer lugar se hizo una clasificación con 24 patrones temporales de referencia y los parámetros de clasificación por defecto, pero como la mayor parte de la imagen quedaba sin clasificar, se aumentó el ángulo máximo de 0,1 a 0,2 radianes. Usando la misma biblioteca espectral las diferencias eran bastante notables, por lo que se optó por fijar el ángulo máximo en este valor.

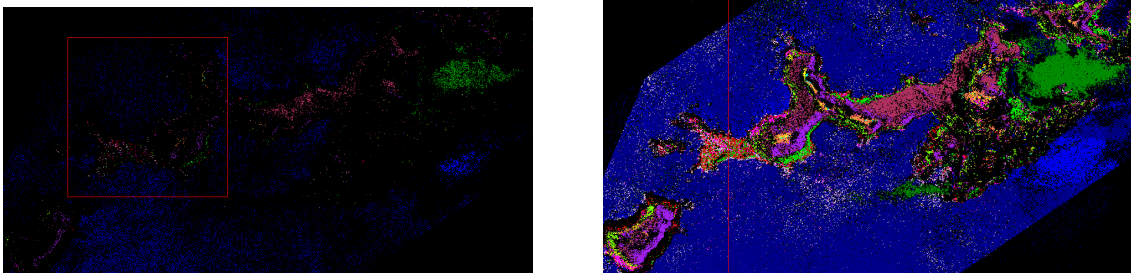


Figura 107. Comparación de los resultados de la clasificación SAM a partir de 24 patrones temporales usando un ángulo máximo de 0,1 y 0,2 radianes respectivamente.

El objetivo es que toda la imagen quede clasificada y como, a pesar de haber aumentado el ángulo máximo el resultado seguía mostrando bastantes regiones en negro, se fueron añadiendo patrones temporales recogidos sobre las regiones sin clasificar, de forma que la mayor parte de los píxeles quedasen incluidos en alguna de las clases.

En la clasificación final las zonas sin clasificar han disminuido considerablemente pero a costa de añadir gran cantidad de patrones. El resultado contiene 74 clases y la clase que mayor superficie abarca es la de los no clasificados (37,15 %), seguida de una de las clases de mar (36,14 %). Después hay 3 clases que cubren entre un 2 % y un 3 % de la imagen (otras 2 clases de mar y un tipo de hielo) y el resto no llega al 1 %.

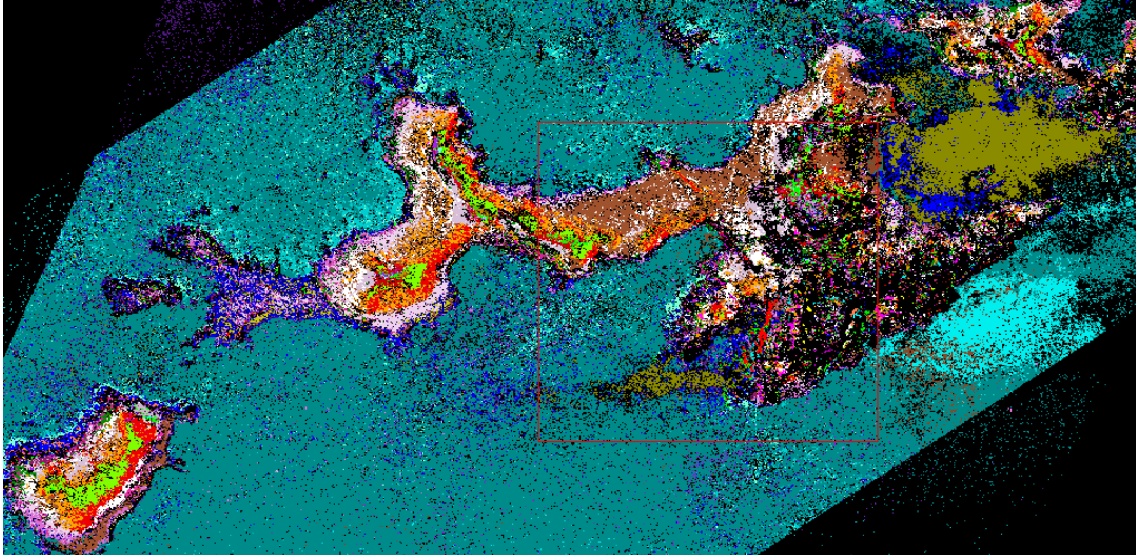


Figura 108. Clasificación Angular Temporal final. El resultado se ha obtenido a partir de 74 patrones temporales y un ángulo máximo de 0,2 radianes.

Post-clasificación

Para tratar de mejorar los resultados y agrupar las clases que representan la misma cobertura durante la post-clasificación se probaron los siguientes tratamientos:

- Análisis de mayoría (“*Classification / Post Classification / Majority Analysis*”): agrupa los píxeles clasificados de forma incorrecta en las clases mayoritarias reemplazando los píxeles con el valor de la clase que tienen la mayoría de los píxeles vecinos.

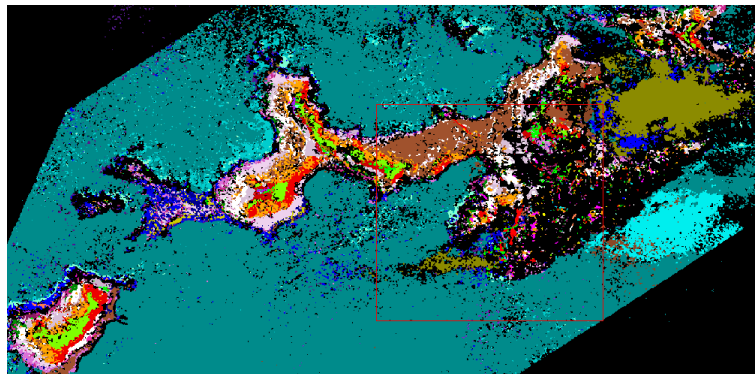


Figura 109. Resultados del análisis de mayoría de la clasificación SAM final.

El análisis de mayoría aumenta el número de píxeles desclasificados (es la clase mayoritaria), incluso aunque esta clase no se considere en el análisis, por lo que no es muy acertado.

- Análisis de minoría (“*Classification / Post Classification / Minority Analysis*”): cambia el valor del píxel central con el valor de clase que tienen la minoría de los píxeles del kernel.

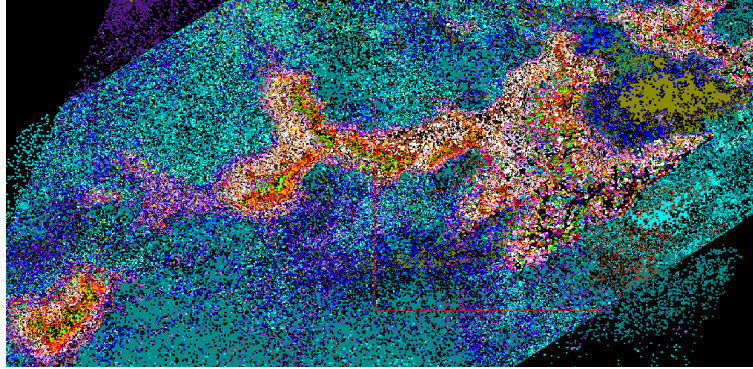


Figura 110. Resultados del análisis de minoría de la clasificación SAM final.

El análisis de minorías crea una imagen más granulada y heterogénea, pero permite observar píxeles mal clasificados.

- Agrupación de clases (“*Classification / Post Classification / Clump Classes*”): une las áreas clasificadas de forma similar mediante operadores morfológicos para aumentar la coherencia espacial de las imágenes de clasificación, que a menudo contienen ruido o huecos, sin contaminar la información con cifras de clases adyacentes (como sucede al usar un filtro de paso bajo). Las clases seleccionadas son agrupadas aplicando una operación de dilatación seguida de una de erosión a la imagen de clasificación.

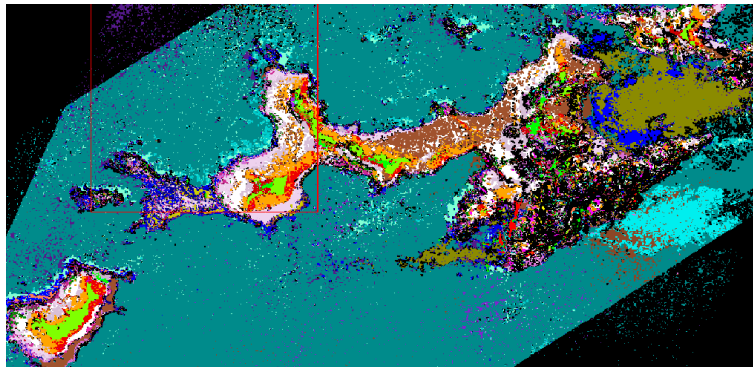


Figura 111. Resultados de la agrupación de clases de la clasificación SAM final.

El resultado se parece un poco al del análisis de mayoría, en el sentido de que las distintas regiones parecen más homogéneas, pero las áreas no clasificadas no aumentan, permanecen igual. El problema vuelve a ser que se pierde información.

- Reclasificación de las clases por colores (“*Tools / Color Mapping / Density Slice*” desde el menú de la ventana de la imagen): finalmente se optó por agrupar las clases en grandes grupos que representen la misma cubierta a partir de esta herramienta, que permite seleccionar rangos de datos o colores para destacar áreas de la imagen. Posteriormente estos grupos se irían subdividiendo en regiones que representen las distintas evoluciones de cada superficie, aunque la gran cantidad de clases complica este proceso, y el carácter atemporal de la información adicional disponible no permite llegar a este nivel de clasificación.

Por ello se optó por dejar la clasificación agrupada en las siguientes grandes regiones: mar, afloramientos rocosos, hielo y píxeles sin clasificar.

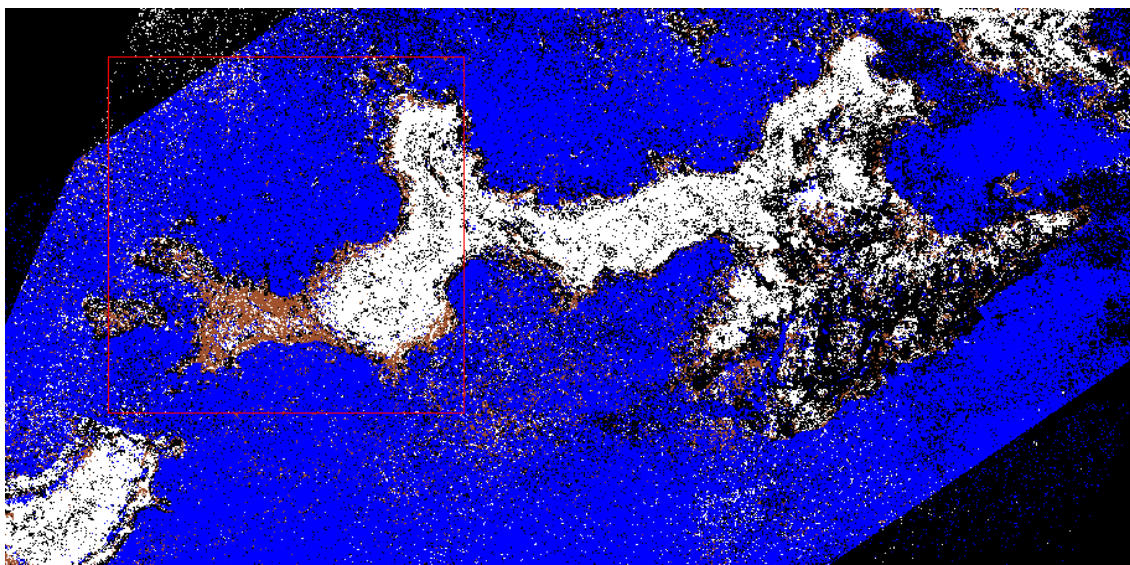


Figura 112. Resultados de la reclasificación basada en colores de la clasificación SAM final. Las clases finales son: mar (azul), afloramientos rocosos (siena), hielo (blanco) y píxeles sin clasificar (negro).

5.2.5. Clasificación del archivo multitemporal con información auxiliar del mapa geomorfológico

En la clasificación final de los tipos de cubiertas y su posible evolución la selección de ROIs está basada, además de en la información visual de las imágenes sueltas y composiciones RGB, en un **mapa geomorfológico** a escala 1:25.000 de la Península de Byers al que se tuvo acceso durante la última etapa del estudio.

El mapa digitalizado, con un tamaño de píxel de 5 m (establecido de acuerdo con la escala y los parámetros de percepción visual mínima), fue usado como base para georreferenciar a su vez las imágenes ASAR, que están proyectadas en coordenadas del satélite, a coordenadas geográficas. Una vez hecho esto las imágenes ASAR fueron superpuestas al mapa para poder comparar los valores digitales con la geomorfología del terreno usando un tamaño de píxel de 5 m.

Los primeros intentos de clasificación demostraron que la mayoría de las superficies se caracterizaban por la gran variabilidad de valores, de forma que la distribución de las clases era bastante heterogénea y distinta a la distribución de las formas geomorfológicas sobre las que habían sido definidas. Por ello se optó por usar las estadísticas de las ROIs para seleccionar superficies con valores más o menos uniformes para una misma fecha y crear varias clases de entrenamiento en las superficies que no hubiesen quedado bien definidas, las cuales serían posteriormente unidas.

Finalmente fueron elegidas **19 ROIs**, con las que se probaron todos los métodos de clasificación supervisada. El resultado de la **clasificación de Mínima Distancia**, que es la que agrupa los píxeles de forma más precisa, se presenta a continuación. La imagen ha sido tratada con un filtro de mediana 3x3 aplicado mediante “Enhance / Filter / Median 3x3” del menú del display para homogeneizar las clases y facilitar su estudio.

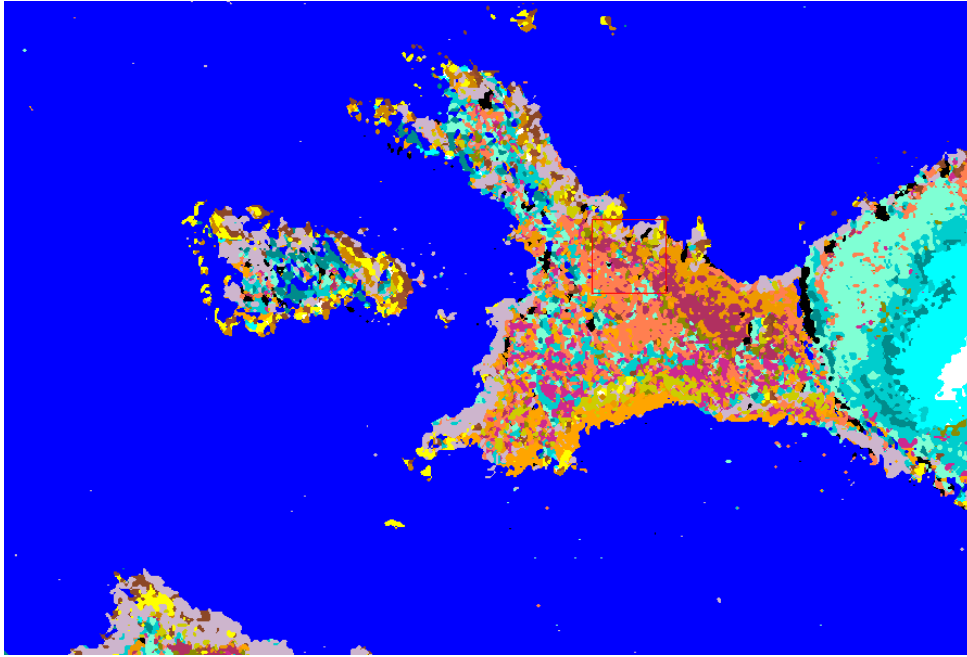


Figura 113. Resultados de la clasificación por el método de mínima distancia a partir de 19 ROIs y con las clases sin agrupar.

Las clases iniciales se nombraron de acuerdo a la superficie geomorfológica sobre la que habían sido definidas para, durante el proceso de post-clasificación, agrupar aquellas que representasen la misma cobertura y patrones semejantes de evolución (“*Classification / Post Classification / Combine Classes*”). Las clases finales agrupadas simplemente fueron numeradas en función de sus patrones de respuesta medios y designadas en base a su color, y se calcularon las estadísticas para cada una de ellas sobre el archivo multitemporal aplicando máscaras con los valores de cada clase.

A continuación se presenta una tabla con la agrupación de las clases y los valores digitales medios de las clases agrupadas para cada fecha.

En principio cabría esperar que el patrón de evolución de las distintas cubiertas tuviese un aspecto similar, con un aumento progresivo de la señal de respuesta provocado por la aparición de agua líquida a lo largo del deshielo, que aumenta la permitividad eléctrica y como consecuencia la sección eficaz de retro-dispersión del hielo. La magnitud de los valores de respuesta medios permitiría ordenar las distintas clases en función de la edad del hielo, a partir de la cual puede inferirse el espesor.

La evolución de las clases sin embargo es bastante irregular y a menudo aparecen valores máximos extremos que alteran las respuestas medias en distintas fechas. No obstante, cada clase presenta un patrón de evolución característico que hace posible la separación de las distintas cubiertas por técnicas de clasificación; la distribución de las clases en el resultado se ajusta en gran medida a las formaciones geomorfológicas subyacentes. Este hecho indica que las características del sustrato (tamaño de los materiales, grado de consolidación, absorbancia, conductividad) afectan en cierto modo a la forma en que se disponen los cristales de hielo, y en consecuencia a su compactación, e influyen en la cantidad de calor absorbido, lo que determina a su vez la tasa de deshielo.

Combinación de clases		Clases Iniciales		
Clase	Área (km ²)	Clase	Color	Área (km ²)
1. Azul	414,360	Mar 1	Azul	414,360
		Limite Glaciar	Negro	2,398
2. Aguamarina	13,274	Grietas Glaciares	Aguamarina	13,274
3. Granate	11,653	Plataforma Media Clastos	Granate	5,397
		Plataforma Media 2	Granate2	6,256
4. Coral	10,519	Plataforma Superior	Coral	10,519
5. Cyan 2	12,450	Till ²⁴ Glaciar	Cyan2	12,450
		Escarpe Glaciar	Cyan3	4,716
6. Naranja	32,451	Playas 1	Naranja1	7,167
		Playas 2	Naranja2	5,097
		Playas 3	Thistle2	20,186
7. Amarillo	414,360	Escarpe Inferior	Amarillo	4,142
		Escarpe Inferior 2	Amarillo2	5,492
		Escarpe Superior	Amarillo3	3,8608
8. Siena	6,450	Cerros	Siena3	3,692
		Cerros 2	Siena	0,714
		Cerros 3	Naranja3	2,044
9. Cyan	7,166	Glaciar 2	Cyan	7,166
10. Blanco	1,334	Glaciar 1	Blanco	1,334

Tabla 14. Agrupación de las clases iniciales.

Clases	22.11.07	25.11.07	29.11.07	01.12.07	05.12.07	08.12.07	11.12.07	15.12.07
1. Azul	507,40	749,69	1142,78	929,61	470,89	503,74	688,10	1794,51
2. Aguamarina	697,50	602,72	1071,39	492,87	379,19	397,53	410,88	759,33
3. Granate	891,21	588,74	695,64	548,73	376,15	487,16	474,03	741,26
4. Coral	703,67	617,26	737,66	645,32	364,23	459,05	463,21	854,36
5. Cyan 2	934,40	783,31	1569,56	603,89	391,78	517,63	518,18	744,07
6. Naranja	781,75	696,33	825,77	899,87	518,61	636,72	696,67	889,81
7. Amarillo	1102,48	913,75	759,97	959,62	422,52	718,92	712,17	794,92
8. Siena	869,24	1008,00	936,64	1854,56	499,08	924,59	1232,89	1116,40
9. Cyan	1605,11	1648,14	2287,29	551,56	437,81	510,78	587,48	867,36
10. Blanco	2445,49	2268,56	2156,95	639,23	441,00	932,45	1217,38	776,91

Tabla 15. Valores medios de respuesta de las clases agrupadas para las distintas fechas

²⁴ **Till glaciar:** material arrastrado por el hielo glaciar que se acumula posteriormente en sus márgenes dando lugar a sedimentos con formas características llamadas morrenas.

Descripción de las clases

A continuación se presenta el resultado final con las clases agrupadas y un análisis detallado de cada una junto con un histograma de evolución de los valores máximo, mínimo y medio de las clases agrupadas:

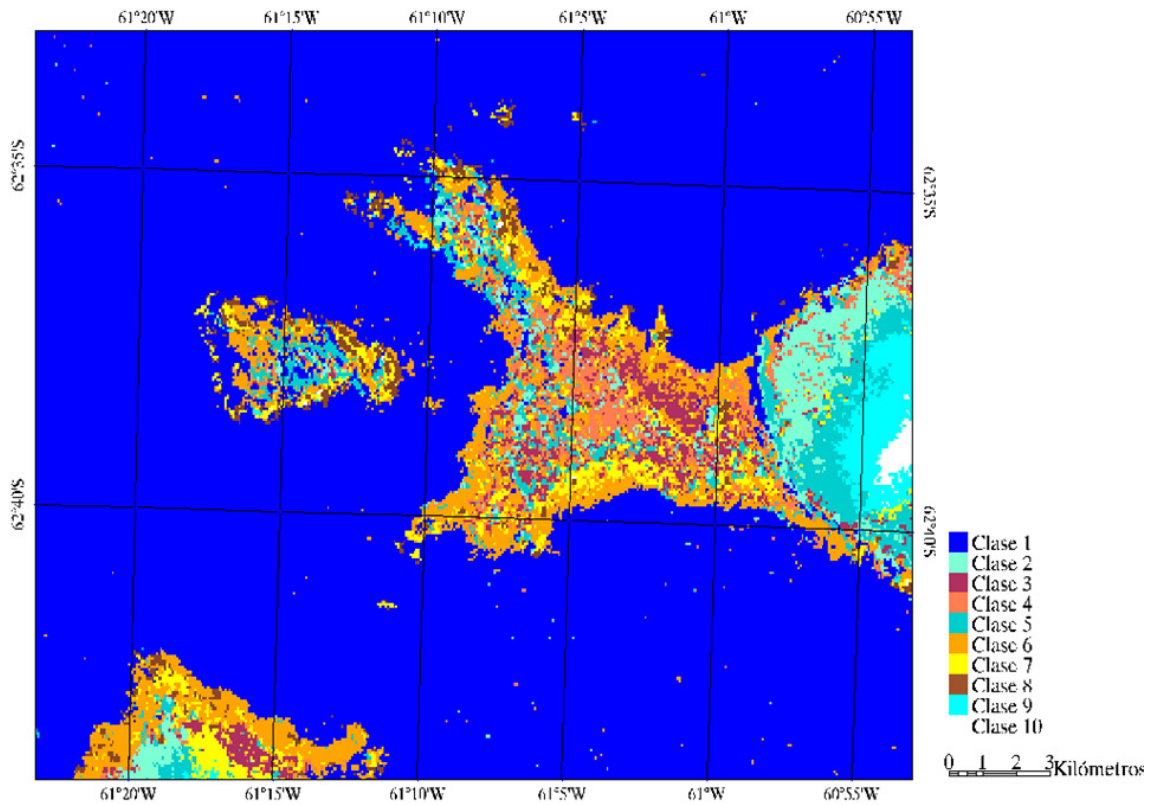
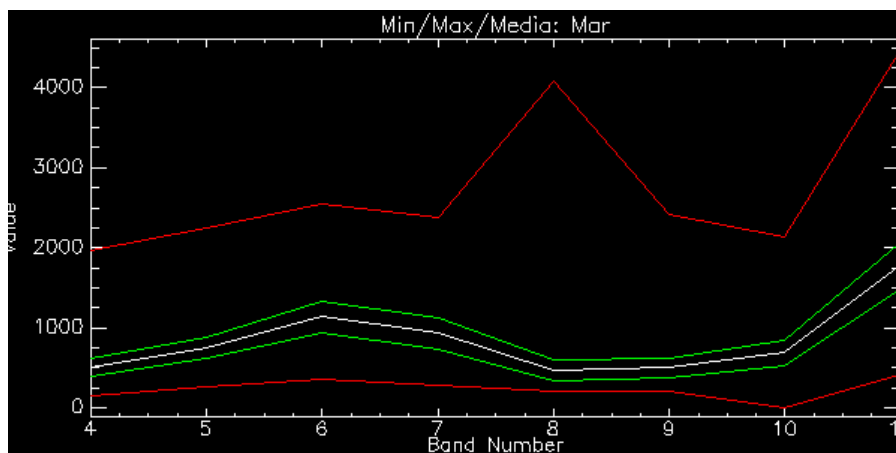


Figura 114. Clasificación final con 10 clases agrupadas.

Clase 1 (Azul)

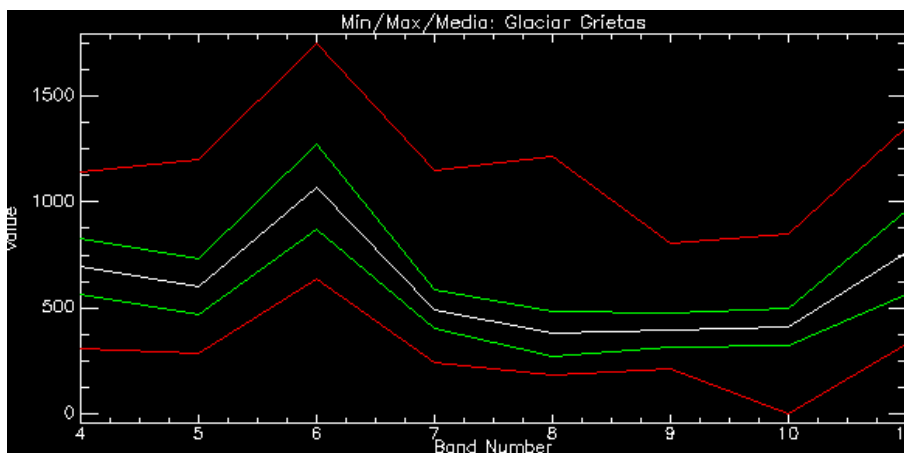


La clase 1 cubre el 78 % de la imagen, principalmente los píxeles correspondientes al mar, y no presenta problemas de separabilidad con ninguna otra. La elevada rugosidad de su superficie se refleja en la gran variabilidad de respuestas dentro de una misma imagen y entre las distintas fechas, pero sigue un patrón característico que permite discriminar de forma bastante precisa las zonas de agua líquida. Casi toda la superficie marina aparece de color azul, y los pocos píxeles aislados pertenecientes a otras clases posiblemente correspondan a bloques de icebergs que, al estar formados por hielo, presentan características emisivas distintas a las del agua del mar.

Su extensión ha quedado bastante bien delimitada, aunque en algunas zonas se producen pequeños desajustes, que en parte pueden deberse a cambios en la línea de costa por acción de las mareas. Concretamente, esta clase se adentra ligeramente en las playas del norte del glaciar, en la zona oriental de las playas del sur, y en casi toda la franja costera del oeste y suroeste de la península.

Esta clase se corresponde también con las zonas de sombra que se crean detrás de grandes relieves en las zonas no iluminadas por el radar. En el interior de la península aparece delimitando el frente del glaciar por la parte norte, pero hacia el sur desaparece y su límite queda reflejado por la separación entre las clases azuladas de hielo glaciar y las anaranjadas de la península. También se desarrolla en las aristas y fallas al noroeste de la península, y en pequeños grupos, generalmente al sur de algunos pitones volcánicos que conforman los cerros (Pence, Varadero, Presidente, Villard, Lair y Chester) o en algunos puntos del límite norte del glaciar, coincidiendo con el sustrato rocoso que aflora cuando el glaciar alcanza la costa.

Clase 2 (Aguamarina)

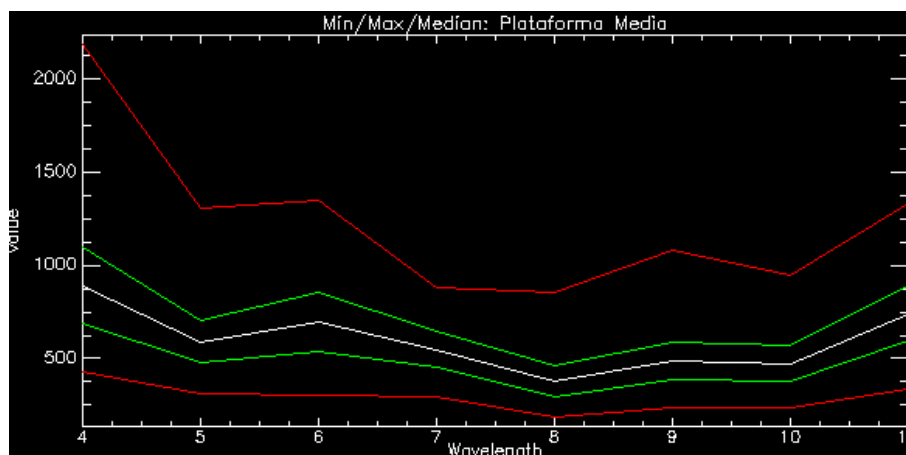


La clase 2 representa las zonas de baja señal de respuesta que se extienden por la mayor parte del glaciar, principalmente en la mitad norte, más allá de la franja que ocupan las grietas. En su extremo septentrional se extiende desde los 170 m de altura hasta las morrenas de till y afloramientos rocosos, donde es sustituida por las clases coral y naranja. Después comienza a ascender en altura, alcanzando los 220 m y en su límite meridional desciende hasta una altura de 130 m, donde es desplazada por la clase 5 y queda restringida a una línea al este del límite glaciar. También aparece en algunos puntos de la península coincidiendo principalmente con lagunas, cubetas de sobrexcaución y corrientes estacionales.

Los valores medios de esta clase son de los más bajos que aparecen en las superficies emergidas de la península. Generalmente sus valores digitales oscilan entre

400 y 600 ND, aunque presentan un pico el día 29 de noviembre y aumentan considerablemente en la última fecha disponible. Seguramente se trata de hielo de poca edad y espesor, lo que hace que su grado de compactación y en consecuencia, su señal de respuesta, sean más bajas.

Clase 3 (Granate)

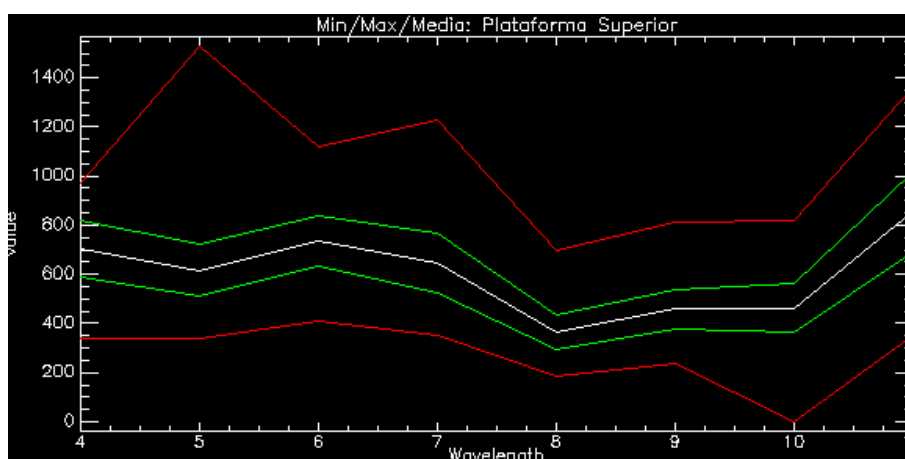


Corresponde a zonas llanas en las que la señal de respuesta es más baja. Esto se debe, además de a la reflexión especular que caracteriza a las superficies lisas, a la baja compactación de la nieve, que procede por completo de las precipitaciones sufridas después del anterior periodo de deshielo, ya que su área cubre la mayor parte de las superficies libres de hielo en verano.

En concreto se extiende sobre la plataforma media de clastos que se aparece al norte de la plataforma superior y otras zonas de clastos a otras alturas, gran parte de los valles de fondo plano que se forman a partir de 30m de altura, algunas fallas (entre los cerros Presidente y Varadero y algunas del sur de la península) y parte de las cubetas de sobrecavación glaciaria del Promontorio Ray, las próximas al cerro Presidente y las del suroeste. Se presenta también sobre algunos suelos estriados que se desarrollan en las rocas ígneas del suroeste de la península, y al sur de algunos cerros, ya sea en suelos estriados (Villard y Varadero), o en sus derrubios (Chester Cone) aunque otras regiones con el mismo tipo de sustrato no han quedado tan bien representadas. Por último, también está asociada a fenómenos de soliflucción laminar de algunos lagos.

Sus valores medios no varían mucho a lo largo de las distintas fechas, aunque a partir del 5 de diciembre muestran un aumento progresivo en la señal de retorno.

Clase 4 (Coral)

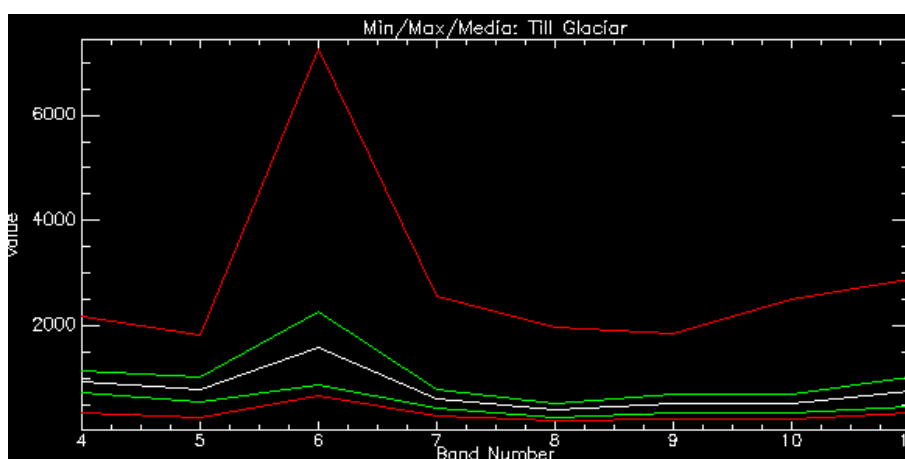


La clase 4 presenta valores de respuesta ligeramente superiores a la anterior y cubre principalmente las zonas llanas más elevadas, en las que las temperaturas ligeramente inferiores habrán permitido conservar parches de nieve de años anteriores, de forma que el espesor de la capa helada será ligeramente superior al de la clase anterior.

Aparece también en muchos puntos de la costa, entre los que se incluye la colonia de elefantes de la playa del norte, algunos bloques erráticos cercanos al Chester Cone, franjas de till glaciar, y forma una línea junto al límite del glaciar, que coincide en parte con la presencia de un río. Por último, se desarrolla también en algunas cubetas de sobrecavación y pitones de las zonas más elevadas.

Sus valores medios muestran una relativa tendencia al descenso hasta el 5 de diciembre, momento en que alcanzan su valor mínimo, y a partir de ese momento vuelven a aumentar. En contraste con otras clases, que presentan valores máximos extremos, ésta presenta un valor mínimo extremo el día 11 de diciembre.

Clase 5 (Cyan 2)



El patrón de evolución de la clase 5 seguramente corresponde a hielo de profundidad media, con un grado de compactación moderado, y con cierta inclinación de su superficie. Cubre gran parte del till glaciar que forman las morrenas y algunas grietas que se desarrollan en la cara sur del glaciar. También aparece en las zonas de

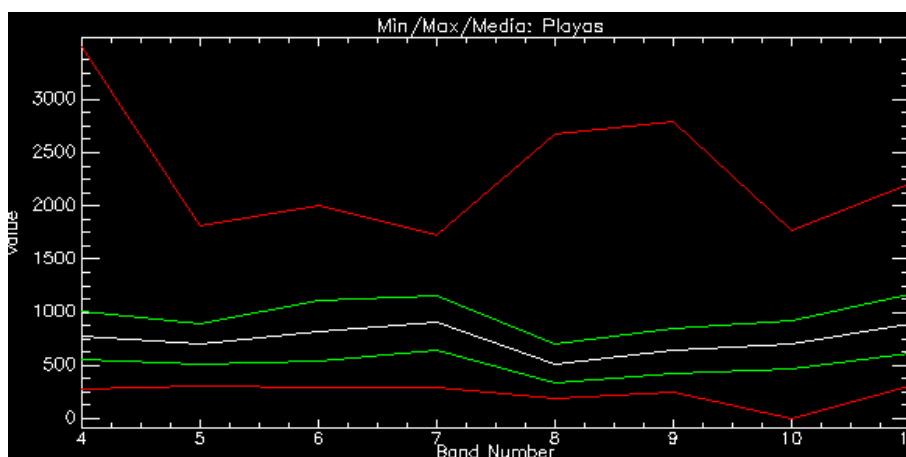
mayor pendiente del glaciar, aunque la altura sobre la que se dispone va variando a lo largo del frente: al sur se distribuye entre los 100 m y 160 m de altura, después asciende ocupando una franja entre 160 m y 240 m, alcanza su cota máxima hacia la mitad norte, y finalmente vuelve a descender abarcando una superficie comprendida entre los 170 m y 220m.

Esta clase también está representada en el interior de la península, a menudo asociada a formas glaciares (circos glaciares y bordes de las cubetas de sobreexcavación del Promontorio Ray y del cerro Negro, nichos de nivación del Chester Cone y cerro Smellie y bloques erráticos) y cerca de la clase 2, que también se desarrolla en el glaciar. De forma más aislada abarca pequeños grupos de píxeles en los polígonos de la plataforma superior, en algunos valles de fondo plano, y en zonas con soliflucción laminar asociadas a valles o lagos.

Finalmente, en el mar aparecen varios píxeles dispersos de esta clase, que podrían corresponder a icebergs con elevado grado de compactación y edad.

Sin tener en cuenta el pico que aparece el día 29 de noviembre, sus valores medios van disminuyendo hasta el 5 de diciembre, momento a partir del cual vuelven a aumentar pero a un ritmo más lento.

Clase 6 (Naranja)



La clase 6 está asociada principalmente a nieve reciente de zonas bajas y poca pendiente, cuyos valores medios presentan respuestas superiores a las que cabría esperar de acuerdo a su bajo grado de compactación y que seguramente se deban a las impurezas que contiene la nieve.

Se localiza en las zonas costeras, tanto de Byers como de las islas Snow, y en algunas regiones de la isla Rugged, aunque algunas corrientes estacionales que se forman en esta franja han quedado excluidas. En las playas del norte y oeste de la isla esta clase se prolonga hacia el interior, abarcando parte de los escarpes que separan las playas de la plataforma media y algunas zonas llanas de esta plataforma ocupadas por clastos. Aparece también en algunos de los pitones volcánicos que dan lugar a cerros (Sealer, Devils Point, Smellie, Campamento, Pence, Varadero, Villard y Lair) y en sus derrubios de ladera asociados (Start, Sealer, Negro), además de los derrubios del escarpe superior del norte y oeste de la península, y en una línea que corresponde a till glaciar.

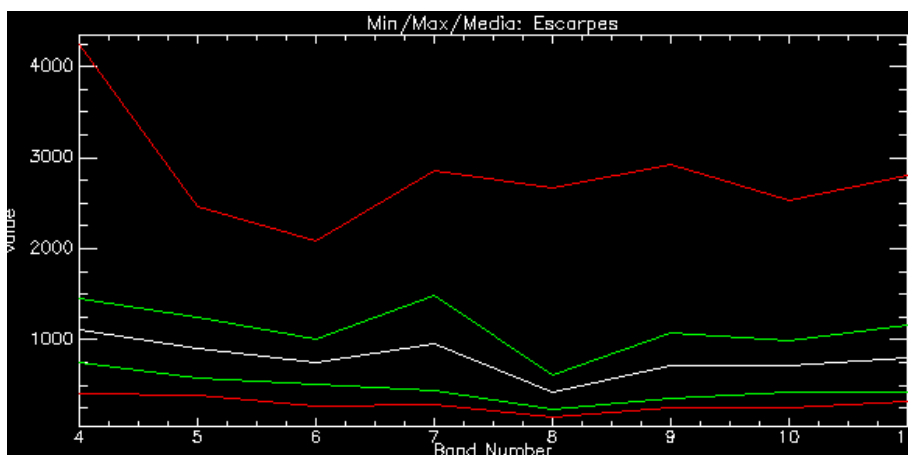
Sus valores medios no varían mucho a lo largo del tiempo, aunque sus máximos están muy desplazados respecto a la media.

Clase 7 (Amarillo)

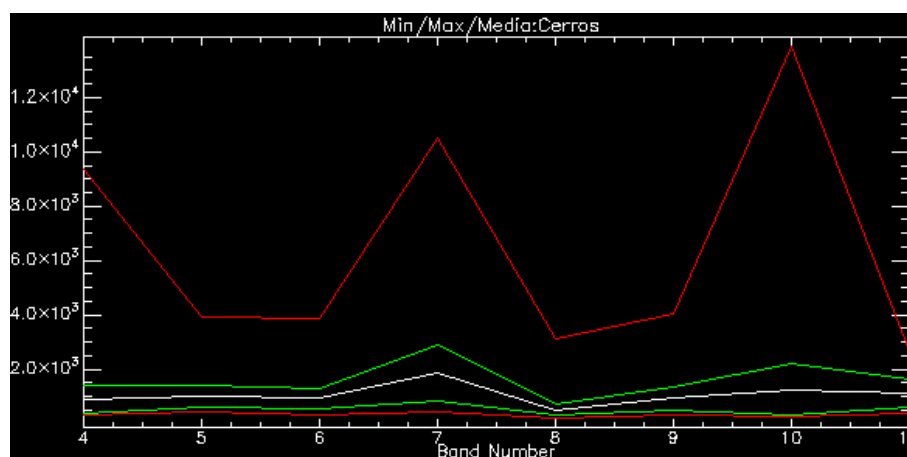
La clase 7 está asociada a regiones de elevada pendiente que muestran valores de respuesta relativamente altos debido a la dispersión que tiene lugar en este tipo de superficies.

En la imagen clasificada se aprecian claramente los escarpes que separan las playas del sur de la plataforma media y los que delimitan la plataforma media y superior por el norte. Abarca también la base y los derrubios que se acumulan al final de estas pendientes, como los del escarpe al norte del Chester Cone y el escarpe inferior del sur, donde se extiende hasta los cauces estacionales que se forman en las playas, o hasta los derrubios en su límite este. Esta clase se presenta al este de muchos cerros (Varadero, Villard, Lair y Negro), generalmente junto a la clase Siena; a veces cubre terreno correspondiente al mar por el efecto de desplazamiento del relieve, y en algunos casos los derrubios (Pence, Lair), así como los de las aristas glaciares de los cabos Essax y Start. Finalmente, se incluyen en esta clase parte de las cubetas de sobrecavación que se alinean a lo largo del Promontorio Ray y algunas zonas de clastos de las plataformas (al suroeste, al norte cerca del límite con el glaciar, y junto al escarpe norte en la plataforma superior).

Sus valores muestran un descenso en las 3 primeras fechas, después presentan picos, y se estabilizan en las 3 últimas imágenes.



Clase 8 (Siena)

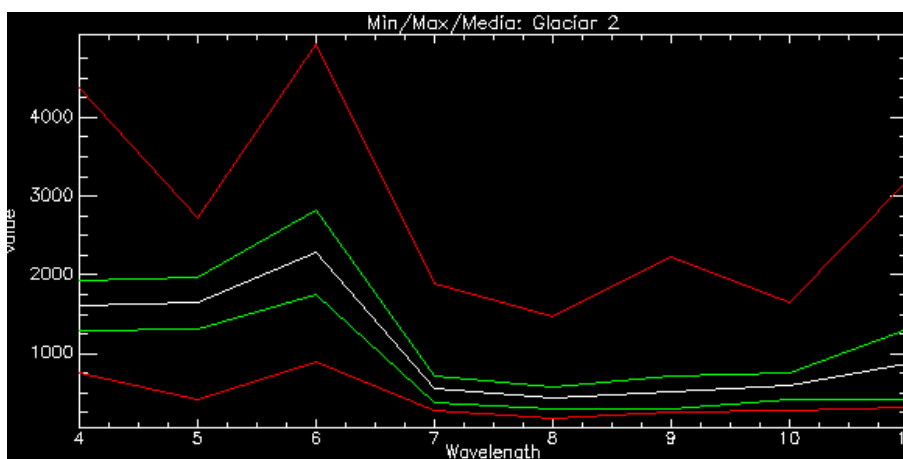


La clase 8 está asociada a los elevados valores de respuesta de la nieve más compacta y de mayor edad de los cerros que emergen en algunos puntos de la península.

Se encuentra generalmente desplazada hacia el oeste de estas formaciones, debido a las distorsiones que crea el relieve en las imágenes radar, a menudo junto a la clase amarilla. Se distribuye principalmente por el norte de la península y a lo largo de toda la costa de la isla Rugged debido a su relieve más pronunciado. También cubre algunos píxeles del till glaciar, de las pequeñas formaciones glaciares que persisten en el Promontorio Ray, y de algunos escarpes inferiores.

El área cubierta por esta clase no es muy grande debido en parte a la gran variabilidad de valores que muestran este tipo de superficies por efecto de la dispersión. Este hecho se refleja en las estadísticas, que en general muestran valores medios elevados y picos de valores máximos que se alejan bastante de la media.

Clase 9 (Cyan)



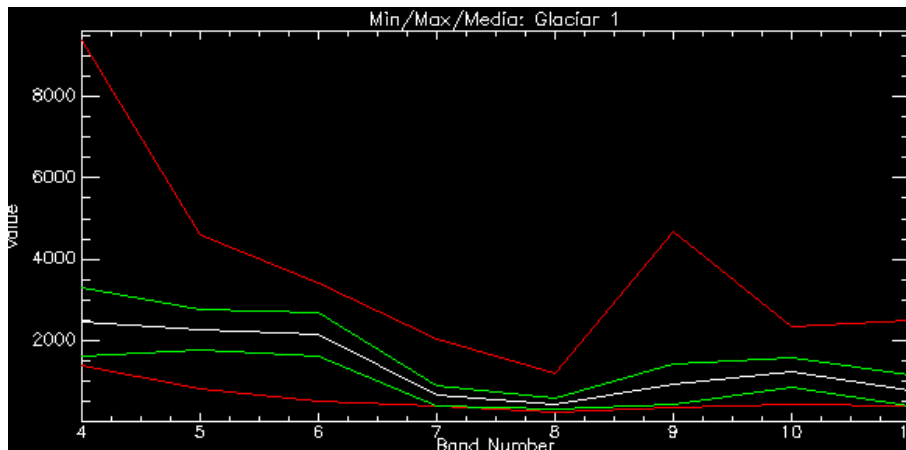
La clase 9, que prácticamente sólo se desarrolla en las superficies más lisas del glaciar, corresponde a hielo permanente de bastante profundidad y espesor, ya que su patrón de respuesta es totalmente distinto al del resto de la península, donde la nieve acaba derritiéndose a lo largo del verano o formando neveros aislados que no alcanzan gran profundidad.

Al sur del glaciar se extiende entre los 180 m y 230 m, aunque luego desciende entre los 140 m y 180 m. Hacia el norte vuelve a ascender en altura, alcanzando la cota máxima del glaciar, y termina sobre los 210 m en su extremo septentrional.

En la región rocosa de la Península sólo aparece en píxeles dispersos correspondientes a los glaciares del Promontorio Ray y en algunos de sus fallas y acantilados, tanto al norte como al sur.

Sus valores medios son bastante elevados durante las 3 primeras fechas, alcanzando valores superiores a 1600 ND, pero a partir del día 1 descienden bruscamente.

Clase 10 (Blanco)



La clase 10 corresponde al hielo glaciar con mayor grado de compactación y edad y con cierta inclinación de su superficie.

Abarca una pequeña área en la región central del glaciar, que se extiende desde la cota máxima hasta los 190 m, y está desplazada hacia la mitad sur de éste.

Al igual que la clase anterior, los valores medios son bastante elevados durante las 3 primeras fechas, aunque este hecho queda distorsionado por el valor máximo de 9000 ND que aparece en la primera fecha. A partir del día 29 de noviembre la señal de respuesta desciende bruscamente y sólo se vuelve a recuperar parcialmente los días 5 y 8 de diciembre.

5.2.6. Conclusiones del análisis

El análisis visual preliminar permite observar la gran diferencia existente en la apariencia de las imágenes de las distintas fechas, y la presencia de ruido, patente en su aspecto moteado, que hace que los valores de las cubiertas sean bastante heterogéneos.

El uso de filtros sin embargo no resuelve este problema ya que, dada la escala de trabajo y resolución espacial de las imágenes, la reducción del ruido no compensa la pérdida de nitidez y de información que se produce como consecuencia del filtrado. Sólo resulta útil la aplicación de un filtro de mediana 5x5 para facilitar la separación de las zonas emergidas respecto al mar usando una máscara de bits. También es conveniente aplicar un filtro de paso bajo 3x3 a los resultados de la clasificación en los que el ruido hace que la distribución de clases sea bastante heterogénea, pero únicamente como tratamiento posterior para no alterar los datos que van a ser usados en la clasificación.

En cuanto a la elección del método para analizar la evolución temporal del deshielo, la clasificación de las imágenes individuales para agrupar los píxeles en clases representativas de las distintas cubiertas para comparar posteriormente los resultados y detectar los cambios que han tenido lugar a lo largo del tiempo no resulta un método eficaz, independientemente del tipo de clasificación (supervisada o no supervisada). Las grandes diferencias existentes entre los valores de las distintas fechas hacen que los resultados sean igualmente variados, lo que impide comparar las clasificaciones y

deducir patrones de evolución temporal a partir de los cambios de clase que sufren los píxeles.

Tal y como demuestran los resultados de la clasificación no supervisada, la mayor parte de la variabilidad de la imagen se concentra en el mar, cuyo estudio no está dentro de los objetivos del proyecto. Por esta razón sería conveniente extraerla del análisis estadístico que llevan a cabo los clasificadores creando una máscara de bits para esta zona.

La clasificación del conjunto de imágenes a través del archivo multitemporal, que agrupa los píxeles en base al tipo de cubierta y evolución que sufre, permite obtener resultados más exactos. Sin embargo, la gran selectividad del Clasificador Angular Temporal hace necesaria la definición de un elevado número de clases para poder representar todas las evoluciones temporales que muestran las distintas cubiertas dejando, a pesar de ello, una elevada proporción de píxeles sin clasificar. La post-clasificación implicaría agrupar las clases que representan la misma superficie y determinar los posibles cambios que se producen en ella, pero requeriría información auxiliar del terreno que justificase las decisiones de agrupación.

Los resultados probablemente mejorarían definiendo los patrones temporales a partir de los valores medios de las Regiones de Interés creadas sobre las distintas cubiertas.

El método más óptimo para identificar las distintas cubiertas es por tanto, la clasificación del archivo multitemporal por técnicas de mínima distancia utilizando la información del mapa geomorfológico para definir las ROIs e identificar posteriormente las cubiertas. A pesar de que las estadísticas muestran que los patrones de evolución de las clases son un tanto aleatorios, su distribución se ajusta en gran medida a la de las formas geomorfológicas, poniendo de relieve la influencia del sustrato en el aspecto y evolución que presenta la nieve.

Sin embargo, para describir de forma apropiada las características del hielo o de la superficie que representa cada clase sería conveniente disponer de datos de campo tomados sobre diferentes regiones de la Península acerca de la edad, densidad, espesor y composición química del hielo, los cuales podrían integrarse en un SIG y superponerse a los resultados de la clasificación para contrastar ambos tipos de información.

6. Conclusión

El presente trabajo ha permitido generar un Sistema de Información Geográfica de la Península de Byers en el que se integran las siguientes capas:

1. Ocho imágenes ASAR Wide Swath Mode correspondientes a varias fechas del periodo de deshielo 2007/2008.
2. Mapa topográfico a escala 1:25.000 digitalizado con un tamaño de píxel de 5 m.
3. Mapa geomorfológico a escala 1:25.000 digitalizado con un tamaño de píxel de 5 m.
4. Imagen clasificada que representa los distintos tipos de hielo presentes en la Península.

A partir del análisis llevado a cabo proponerse el siguiente método para estudiar los tipos de hielo de las regiones polares y su evolución temporal durante el deshielo por técnicas de teledetección y a una escala local:

- Material de partida:
 - Productos ASAR *Wide Swath* de nivel 1b (ASA_WSM_1P) correspondientes a distintas fechas del mismo periodo de deshielo.
 - Mapa geomorfológico del área de estudio a escala 1:25000 o cualquier otro mapa temático que aporte información auxiliar relevante para la identificación de los distintos tipos de hielo.
- Digitalización del mapa (si se encuentra en soporte impreso). Escaneo por fragmentos a 300ppp y creación de un mosaico a partir de los archivos TIFF guardados mediante el software Adobe PhotoShop CS3.
- Importación de las imágenes (“*File / Open External File / ENVISAT / ASAR*”) y el mapa en formato TIFF (“*File / Open External File / Generic Formats/ TIFF/GeoTIFF*”) al software ENVI 4.3.
- Georreferenciación del mapa usando la información de la malla de puntos (“*Map / Registration / Select GPC: Image to Map*”) y remuestreo al tamaño de píxel establecido por los límites de apreciación gráfica (5 m para una escala de 1:25000).
- Corrección del patrón de la antena de las imágenes radar (“*Radar / Antenna Pattern Correction*”) en la dirección horizontal usando el método multiplicativo y un polinomio de primer grado.
- Georreferenciación de las imágenes a partir de GPC (“*Map / Registration / Select GPC: Image to Image*”) usando el mapa como base y remuestreo al mismo tamaño de píxel que el mapa.
- Superposición de todas las imágenes y el mapa como bandas de un mismo archivo multitemporal (“*Basic Tools / Layer Stacking*”).
- Definición de Regiones de Interés (“*Basic Tools / Regions of Interest / ROI Tool*”) en superficies más o menos homogéneas usando las estadísticas y la información proporcionada por el mapa geomorfológico.
- Clasificación del conjunto de imágenes por el método de Mínima Distancia (“*Classification / Supervised / Minimum Distance*”).
- Reagrupación de las clases que representen la misma cubierta (“*Classification / Post Classification / Combine Classes*”).
- Descripción de las clases a partir de la información contenida en el mapa y contraste de los resultados con datos de campo integrados en un SIG, si se dispone de ellos.

7. Bibliografía

- Antarctica Glossary of terms.
http://www.coolantarctica.com/Antarctica%20fact%20file/antarctica_glossary_of_terms.htm
- Año Polar Internacional.
<http://www.api-spain.es/default.html>
- Australian Antarctic Division.
<http://www.aad.gov.au/default.asp>
- Avalanche Center Glossary Index.
<http://www.avalanche-center.org/Education/glossary/>
- Brockmann Consult, BEAM.
<http://www.brockmann-consult.de/bc-web/flyer/pdf/lores/BEAM-Product-Information.pdf>
- BROWN I. A., JACKSON M., BRAUN M., ENGESET R. “*The Correlation of Glacier Mass Balance and SAR Backscatter on Svartisen, Norway*”. Envisat Symposium, 2007 (Montreux, Suiza).
<http://envisat.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/4F1/423487br.pdf>
- BUTLER M.; MOUCHOT M., BARALE V. y LEBLANC C. “*Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio*”. FAO, 1990.
www.fao.org/docrep/003/T0355S/T0355S02.HTM
- BUTT M. Y FURRUKH B. “*Satellite Snow Monitoring in Northern Pakistan*”
- CALVET J., GARCÍA SELLÉS D., CORBERA J. “*Fluctuaciones de la Extensión del Casquete Glacial de la Isla Livingston (Shetland del Sur) desde 1956 hasta 1996*”. Acta Geologica hispanica, v. 34, Nº 4, 1999.
<http://www.raco.cat/index.php/ActaGeologica/article/viewFile/75658/107172>
- CCRS (Canada Centre for Remote Sensing), Natural Resources Canada.
http://ccrs.nrcan.gc.ca/index_e.php
 - “Fundamentals of Remote Sensing”
http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
 - “Aplicaciones del SAR en aspectos del hielo en el océano”:
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/pdf/ap_ice_s.pdf
 - Material educativo para teledetección mediante radares, índice:
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/pdf/intro_s.pdf
 - Introducción a la percepción remota mediante radar:
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/pdf/bas_intro_s.pdf
 - Formación de imágenes SAR:
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/pdf/int1_s.pdf
- Centre for Polar Observation and Modelling.
<http://www.cpom.org/index.html>
- Centro Nacional de Datos Polares.
http://hielo.igme.es/index.php?option=com_wrapper&Itemid=35
- CHUVIECO E. “*Fundamentos de Teledetección Espacial*”. Ed. Rialp, 1996.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), “*Teoría del RADAR*”, 2001.
<http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/principal.htm>
- CREMONA G. y PHILIPS J. “*Limites gráficos y temáticos, un problema de todos los días*”. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário.
http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2004/165.pdf

- COLBECK, S., AKITAYA E., ARMSTRONG R., GUBLER H., LAFEUILLE J., LIED K., MCCLUNG D. y MORRIS E. “*The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*”, 1990.
http://www.crrel.usace.army.mil/library/booksnongovernment/Seasonal_Snow.pdf
- Comité de Investigación Antártica Científica Nacional del SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research).
<http://www.uam.es/otros/cn-scar/presen.htm>
- CSIC, Base Antártica Española Juan Carlos I.
<http://www.utm.csic.es/bae.asp>
- DEROIN J.P., DAI M., HUMBERT L., BARUSSEAU L., GIRONDE A., LAGARRIGUE M., WANG Z., LIU C., MA L., CHEN W. “*Using Ers And Envisat Data To Study The Glacier Changes In Tibet, The Nyainqentanglha Example (ESA Project No 2401)*”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/4A5_deroin_378.pdf
- El liceo digital, física. “*Velocidades de la luz en distintos medios*”.
http://www.liceodigital.com/fisica/la_luz2.htm
- ESA (European Space Agency).
<http://www.esa.int/esaCP/index.html>
- Aclaraciones de la calidad de los datos de ASAR (Servicio de Control de los Productos).
<http://earth.esa.int/pcs/envisat/asar/disclaimer/>
- ASAR.
<http://envisat.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=3772>
- Datos auxiliares ASAR.
http://earth.esa.int/services/auxiliary_data/asar/
- ENVISAT.
<http://envisat.esa.int/>
- EOLI-SA.
<http://envisat.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=5225>
- EOPI
<http://eopi.esa.int/esa/esa>
- Guía de usuario de ASAR:
<http://envisat.esa.int/handbooks/asar/toc.htm>
- Informes públicos mensuales sobre el funcionamiento de ASAR.
http://earth.esa.int/pcs/envisat/asar/public_reports/
- HAUCK C., VIEIRA G., GRUBER S., BLANCO J., RAMOS M. “*Geophysical Identification of Permafrost in Livingston Island, Maritime Antarctica*”. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, 2007.
 - International Glaciological Society: <http://www.igsoc.org/>
 - http://www.geo.unizh.ch/~stgruber/pubs/Hauck_2007-JGR.pdf
 - ITT Visual Information Solutions, ENVI.
<http://rsinc.com/envi/>
- KANTO E. “*Snow Characteristics in Dronning Maud Land, Antarctica*”. *Resport Series in Geophysics* N. 49, 2006
<http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/fysik/vk/kanto/snowchar.pdf>
- LOPEZ-MARTÍNEZ J., VILAPLANA J.M., MARTÍNEZ DE PISÓN E., CALVET J., ARCHE A., SERRAT D., PALLÁS R. “*Geomorphology of Selected Areas in Livingston Island, South Shetland Islands*”. *Geología de la Antártida Occidental*, III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología, 1992 (Salamanca, España).

- LUCA R. “*Avalanchas de nieve*” Universidad de Chile.
www.plataforma.uchile.cl/fg/semestre2/_2007/tsunamis/modulo1/clase5/doc/ts0702010501.pps
- LUCKMAN A. “*Melt Extent and Pattern in Greenland and the Antarctic Peninsula from Envisat ASAR Global Monitoring Mode*”. Envisat Symposium, 2007 (Montreux, Suiza).
<http://envisat.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/4F3/463336lu.pdf>
- MALNES E. y STORVOLD R. “Near Real-time Snow Covered Area Mapping with Envisat ASAR Wide swath In Norwegian Mountainous Areas”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/4C4_malnes_468.pdf
- MARTINEZ DE PISÓN E., LOPEZ-MARTÍNEZ J. y ARCHE A. “Relieve, Unidades y Tipos Glaciares de la Isla Livingston, Islas Shetland del Sur”. Geología de la Antártida Occidental, III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología, 1992 (Salamanca, España).
- MASES M. “*La Nieve y los Aludes*”, Terceres Jornades del CRECIT (Centre de Recerca en Ciències de la Terra), 2005.
http://www.iea.ad/crecit/3jornades/Actes_Actas/8-Allaus_Aludes/2_Castellano/Nieveyaludes.pdf
- MASLANIK J.A., BARRY R.G. “*Remote Sensing in Antarctica and the Southern Ocean: Applications and Developments*”. Antarctic Science 2, 1990.
- NAGLER T., ROTT H. “*Snow Classification Algorithm for Envisat ASAR*”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/4C4_nagler_169.pdf
- NEYT X., PETTIAUX P., MANISE N., ACHEROY M. “*Neural-Network Based Stateless Ice Detection In ERS Scatterometer Data*”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/3A5_neyt-566.pdf
- NIANG M., DEDIEU J. P., DURAND Y., MÉRINDOL L., BERNIER M., DUMONT M. “*New Inversion Method for Snow Density and Snow Liquid Water Content Retrieval Using C-Band Data from Envisat/ASAR Alternating Polarization in Alpine Environment*”. Envisat Symposium, 2007 (Montreux, Suiza).
<http://envisat.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/4D2/459889de.pdf>
- PALÀ COMELLAS V., CALVET J., CORBERA J. “*Estudio por Teledetección de la Dinámica del Glaciar de Bahía Falsa Isla Livingston (Antártida)*”. Revista de la Asociación Española de Teledetección, Nº 6, 1996.
- PÄLLI A. “*Polythermal Glacier Studies in Svalbard Determined by Groundpenetrating Radar*”. Department of Geosciences, University of Oulu, 2003.
- PEREZ C., MUÑOZ A. L. “*Teledetección: Nociones y Aplicaciones*”, 2006.
- PEREZ M. “*Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*”. Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- PÉREZ M., CALVET J., CORBERA J. “*Estudio de la Dinámica de la Línea de Nieve, en Península Hurd (Isla Livingston-Antártida) a partir de Imágenes ERS-1 y LANDSAT-TM*”. Revista de la Asociación Española de Teledetección, Nº 4, 1995.
- PETTINATO S., POGGI P., MACELLONI G., PALOSCIA S., PAMPALONI P., CREPA A. “*Mapping Snow Cover in Alpine Areas with Envisat/SAR Images*”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/4C4_petti_349.pdf




- PINILLA C. “*Qué es la teledetección*” Universidad de Jaén.
<http://personal.telefonica.terra.es/web/pinillaweb/lateledeteccion.htm>
- Proyecto Limnopolar.
<http://www.uam.es/proyectosinv/antartid/>
- RAMOS M. “*Modelización y Seguimiento Térmico de la Capa Activa y del Permafrost en las Islas Livingston y Decepción. Antártida- Permamodel*”. Ejército de tierra español, Nº 793, 2007.
- RAMOS M., G. T. VIEIRA. “*Variabilidad térmica de la capa activa y evaluación de la energía perdida por el suelo, durante el proceso de congelación en la Isla Livingston (Antártida). Inviernos 2000,2001y 2002*”. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica, Tomo 99, Nº 1-4, 2004.
http://www.fl.ul.pt/pessoais/gtvieira/ficheiros_download/Ramos_Vieira_RS.pdf
- ROTT H., NAGLER T., MALCHER P., BIPPUS G. “*Modelling Mass Balance of Glaciers Using Satellite Data*”. Envisat Symposium, 2007 (Montreux, Suiza).
<http://envisat.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/4F1/452961ro.pdf>
- ROTT H., STUEFER M., NAGLER T., RIEDL C. “*Recent Fluctuations and Damming of Glaciar Perito Moreno, Patagonia, Observed by Means of ERS and Envisat Imagery*”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/4A5_rott_117.pdf
- SCHARRER K., MAYER CH., MARTINIS S., MÜNZER U., GÜDMUNDSSON Á. “*Ice Dam Fluctuations at the Marginal Lake Grænalón (Iceland) Before and During a Glop*”. Envisat Symposium, 2007 (Montreux, Suiza).
<http://envisat.esa.int/workshops/envisatsymposium/proceedings/sessions/4F3/461337sc.pdf>
- SCHUBERT E., “*Light-Emitting Diodes*”, Cambridge University Press, 2006.
<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap18/F18-02%20Planck%20black%20body.jpg>
<http://img.photobucket.com/albums/v511/Ocelaris/Lighting/F18-0220Planck20black20body.jpg>
- SERRANO CAÑADAS E. “*Glaciares, permafrost y cambio climático*”, Departamento de Geografía, Universidad de Valladolid.
<http://www.ame-web.org/AulaMoran/Serrano.pdf>
- SERRANO CAÑADAS E. “*Paisaje Natural y Pisos Geoecológicos en las Áreas Libres de Hielo de la Antártida Marítima (Islas Shetland del Sur)*”. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, Nº 35, 2003.
<http://age.ieg.csic.es/boletin/35/3501.PDF>
- SMALL D., SCHUBERT A., ROSICH B., MEIER E. “*Geometric and Radiometric Correction of ESA SAR Products*”. Envisat Symposium, 2007 (Montreux, Suiza).
http://www.geo.unizh.ch/publications/daves/2007/Small_Montreux_2007.pdf
- SOLBERG R., AMLIEN J., KOREN H., EIKVIL L., MALNES E., STORVOLD R. “*Multi-Sensor/Multi-Temporal Analysis of Envisat Data for Snow Monitoring*”. Envisat & ERS Symposium, 2004 (Salzburg, Austria).
http://earth.esa.int/workshops/salzburg04/papers_posters/4C4_solberg_306.pdf
- STORVOLD R.; KJELL ARILD HOGDA; MALNES E. “*SAR Remote Sensing of Snow Parameters in Norwegian Areas — Current Status and Future Perspective*”. International Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2004.
<http://piers.mit.edu/piersonline/piers.php?volume=2&number=2&year=2006>











- TORO M., CAMACHO A., RICO E., ROCHERA C., VELAZQUEZ D. DOMINGUEZ J.A., QUESADA A. “*Implicaciones del Cambio Climático en el Funcionamiento de los Ecosistemas Antárticos: los Lagos como Centinelas de la Variación Ambiental*”. Ingeniería Civil, N° 194, 2008.
- TORO M., QUESADA A. “*Proyecto Limnopolar. Ecosistemas Acuáticos Antárticos No Marinos Como Sensores Del Cambio Climático*”. Ambienta, Abril 2007. http://www.uam.es/proyectosinv/antartid/prensa/Proyecto_Limnopolar_Ambienta_N65.pdf
- VAN LEEUWEN B., VARGAS R. “*Sensores. Sistemas de teledetección. Introducción*”. UNESCO RAPCA <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Presentaciones%20Powerpoint/02%20Introduccion%20Sensores%20Remotos/Introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf>
- VIEIRA G., LOPEZ-MARTÍNEZ J., SERRANO E., RAMOS M., GRUBER S., HAUCK C., BLANCO J.J. “*Geomorphological Observations of Permafrost and Ground-Ice Degradation on Deception and Livingston Islands, Maritime Antarctica*”. Ninth International Conference on Permafrost.
- United Nations Environmental Programme:
 - “*Snow*” http://www.unep.org/geo/geo_ice/PDF/GEO_C4_LowRes.pdf
 - “*Ice Sheet*” http://www.unep.org/geo/geo_ice/PDF/GEO_C6_A_LowRes.pdf
 - “*Frozen Ground*” http://www.unep.org/geo/geo_ice/PDF/GEO_C7_LowRes.pdf
 - “*Snow and ice highlights*” http://www.unep.org/geo/geo_ice/PDF/highlights/Highlights-spanish.pdf
- Wikipedia:
 - Constante dieléctrica http://es.wikipedia.org/wiki/Constante_diel%C3%A9ctrica
 - Espectro electromagnético http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico
 - Permitividad eléctrica <http://es.wikipedia.org/wiki/Permitividad>
 - Permeabilidad magnética http://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad_magn%C3%A9tica
 - Permafrost <http://en.wikipedia.org/wiki/Permafrost>
 - Tipos de hielo http://es.wikipedia.org/wiki/Hielo#Tipos_de_hielo










Anexo I. Clasificación Internacional de la Nieve Estacional en el Suelo basada en la Forma del Grano



TABLE 2 GRAIN SHAPE CLASSIFICATION

MORPHOLOGICAL CLASSIFICATION				PROCESS-ORIENTATED CLASSIFICATION		ADDITIONAL INFORMATION ON PHYSICAL PROCESSES AND STRENGTH			
BASIC CLASSIFICATION	SYMB	SUBCLASS	SYMB	SHAPE	PLACE OF FORMATION	CLASSIFICATION	PHYSICAL PROCESSES	DEPENDENCE ON MOST IMPORTANT PARAMETERS	COMMON EFFECT ON STRENGTH
PRECIPITATION PARTICLES 	1				Cloud				
	a	Columns	cl	Short prismatic crystal, solid or hollow			Growth at high supersaturation at -3° to -8°C and below -22°C		
	b	Needles	nd	Needle-like, approx. cylindrical			Growth at high supersaturation at -3° to -5°C		
	c	Plates	pl	Plate-like, mostly hexagonal			Growth at high supersaturation at 0° to -3°C and -8° to -25°C		
	d	Stellars Dendrites	sd	Six-fold star-like, planar or spacial			Growth at high supersaturation at temperatures between -12° to -16°C.		
	e	Irregular crystals	ir	Clusters of very small crystals			Polycrystals growing at varying environmental conditions		
	f	Graupel	gp	Heavily rimed particles			Heavy riming of particles by accretion of supercooled water		
	g	Hail	hl	Laminar internal structure, translucent or milky, glazed surface			Growth by accretion of supercooled water		
	h	Ice pellets	ip	Transparent, mostly small spheroids			Frozen rain		

DECOMPOSING AND FRAGMENTED PRECIPITATION PARTICLES 	2								
	a	Partly decomposed precip. particles	dc	Partly rounded particles, characteristic shapes of precip. particles still recognizable	Recently deposited snow	Initial rounding and separation	Decrease of surface area to reduce surface free energy at low temperature gradients	Speed of decomposition decreases with decreasing snow temperature and decreasing temperature gradient	Strength decreases with time; felt-like arrangement of dendrites has modest initial strength
	b	Highly broken particles	bk	Packed, shards or rounded fragments of precipitation particles	Saltation layer	Wind-broken particles; initially fractured then rapid rounding due to small size	Fragmented particles are closely packed by wind; fragmentation followed by rounding and growth	Fragmentation and packing increase with wind speed	Quick sintering results in rapid strength increase
ROUNDED GRAINS (MONOCRYSTALS) 	3				Dry snow				
	a	Small rounded particles	sr	Well-rounded; particles of size <0.5 mm often well bonded		Small equilibrium form	Decrease of specific surface area by slow decrease of number of grains and increase of mean grain diameter; equilibrium form may be partly faceted at lower temperatures	Growth rate increases with increasing temperature and temperature gradient; growth slower in high density snow with smaller pores	Strength increases with time, density and decreasing grain size
	b	Large rounded particles	lr	Well-rounded particles of size >0.5 mm		Large equilibrium form	Grain-to-grain vapor diffusion due to low to medium temperature gradients; mean excess vapor density remains below critical value for kinetic growth	Same as above	Strength increases with time and density and decreasing grain size
	c	Mixed forms	mx	Rounded particles with few facets which are developing		Transitional form as temperature gradient increases	Growth regime changes if temperature gradient increases above critical value of about 10°C/m	Grains are changing in response to an increasing temperature gradient	Desintering could decrease strength
FACETED CRYSTALS 	4				Dry Snow				
	a	Solid faceted particles	fa	Solid faceted crystals; usually hexagonal prisms		Solid kinetic growth form	Strong grain-to-grain vapor diffusion driven by large temperature gradient; excess vapor density above critical value for kinetic growth	Growth rate increases with temperature, temperature gradient, and decreasing density; may not occur in high density snow because of small pores	Strength decreases with increasing growth rate and grain size
	b	Small faceted particles	sf	Small faceted crystals in surface layer; <0.5mm in size	Near surface	Kinetic growth form at early stage of development	May develop directly from 1 or 2a due to large, near-surface temperature gradients	Temperature gradient may periodically change sign but remains at a high absolute value	Low-strength snow
	c	Mixed forms	mx	Faceted particles with recent rounding of facets		Transitional form as temperature gradient decreases	Faceted grains are rounding due to decrease in temperature gradient		

CUP-SHAPED AND CRYSTALS; DEPTH HOAR 	5			Dry Snow				
	a	Cup crystal 	cp	Cup-shaped, striated crystal; usually hollow	Hollow or partly solid cup-shaped kinetic growth crystals	Very fast growth at large temperature gradient	Formation increases with increasing vapor flux	Usually fragile but strength increases with density
	b	Columns of depth hoar 	ch	Large, cup-shaped striated hollow crystals arranged in columns (<10 mm)	Large cup-shaped kinetic growth forms arranged in columns	Intergranular arrangement in columns; most of the lateral bonds between columns have disappeared during crystal growth	Snow has almost completely recrystallized; high recrystallization rate for long period at low snow density and high external temperature gradient facilitates formation	Very fragile snow
	c	Columnar crystals 	cl	Very large, columnar crystals with c-axis horizontal (10-20 mm)	Final growth stage of depth hoar at high temperature gradient in low-density snow	Evolves from earlier stage described above; some bonding occurs and new crystals are initiated	Longer time required than for any other snow crystal	Some strength returns
WET GRAINS 	6			Wet Snow				
	a	Clustered rounded crystals held by grains 	cl	Clustered rounded crystals held by large ice-to-ice bonds; water in internal veins among three crystals or two-grain boundaries	Grain clusters without melt-freeze cycles	Wet snow at low water content; pendular regime; clusters form to minimize surface free energy.	Meltwater can drain; too much water leads to slush; freezing leads to melt-freeze particles	Ice-to-ice bonds give strength.
	b	Rounded polycrystals 	mf	Individual crystals are frozen into a solid polycrystalline grain; may be seen either wet or refrozen	Melt-freeze polycrystals	Wet snow at low water content; melt-freeze cycles form polycrystals when water in veins freezes	Particle size increases with number of melt-freeze cycles; radiation penetration over time restores size; excess water leads to	High strength in the frozen state; lower strength in the wet state; strength increases with number of melt-freeze cycles
c	Slush 	sl	Separate rounded crystals completely immersed in water	Poorly bonded, rounded single crystals	High liquid content; equilibrium form of ice in water	Water drainage blocked by impermeable layer (or ground; high energy) input to snow cover by solar radiation, high air temperature or water input	Little strength due to decaying bonds	
FEATHERY CRYSTALS 	7							
a	Surface hoar crystals 	sh	Striated, usually feathery crystal; aligned, usually flat, sometimes needle-like	Cold snow surface Kinetic growth form in air	Rapid kinetic growth of crystals at the snow surface by rapid transfer of water vapor toward the snow surface; snow surface cooled below ambient air temperature by radiational cooling	Increasing growth rate with increased cooling of the snow surface below air temperature and increasing relative humidity of the air	Fragile, extremely low shear strength; strength may remain low for extended periods when buried in cold snow	

	b	Cavity (hoar) 	ch	(Striated, planar or feathery crystals grown in same form cavities; random orientation)	(Cavities in snow; might grow in very low density snow with extreme temperature gradient)	(Kinetic growth form in cavities)	(Plate or feathery crystals may grow in high-temperature gradient fields in large voids in the snow, e.g., in the vicinity of tree trunks, buried bushes or below sun crusts)		
ICE MASSES 	0								
	a	Ice layer 	il	(Horizontal ice layer)	(Buried layers in snow being melted and refrozen)	(Ice layer from refreezing of draining meltwater; usually retains some degree of permeability)	(Rain or meltwater from the surface percolates into cold snow where it refreezes; water may be preferentially held by fine-grained layer such as a buried wind crust)	(Depends on timing of percolating water and cycles of melting and refreezing; more likely to occur if snow is highly stratified)	(Ice layers are strong but strength decays once snow is completely wetted)
	b	Ice column 	ic	(Vertical ice body)	(Within layers)	(Ice column from refreezing of draining meltwater)	(Water within flow fingers freezes due to heat conduction into surrounding snow at T<0°C)	(Flow fingers more likely to occur if snow is highly strati- fied; freezing greater if snow is very cold)	
c	Basal ice 	bi	(Basal ice layer)	(Base of snow cover)	(Ice forms from freezing of ponded meltwater)	(Water ponds above sub- strate and freezes by heat conduction into cold substrate)	(Formation enhanced if substrate is imperme- able and very cold, e.g., permafrost)	(Weak slush layer may form on top)	
SURFACE DEPOSITS AND CRUSTS 	0								
	a	Rime 	rh	(Soft rime: irregular deposit; Hard rime: small supercooled water droplets frozen in place)	(Surface)	(Surface rime)	(Accretion of small, supercooled fog droplets onto surface grains)	(Increases with fog density and exposure to wind)	(Thin breakable crust forms if process continues long enough)
	b	Rain crust 	rc	(Thin, transparent glaze or clear surface layer)	(Surface)	(Frozen rain water at snow surface)	(Results from freezing rain on snow; forms a surface glaze)	(Droplets have to be supercooled but coal- lesce before freezing)	(Thin breakable crust)
c	Sun crust, firm- spiegel 	sc	(Thin, transparent glaze or surface film)	(Surface)	(Refrozen meltwater at snow surface)	(Refrozen surface layer partially melted by solar radiation; short- wave absorption in the glaze is decreased; cooling of the glaze by long-wave radiation and evaporation; greenhouse effect for the under- lying snow; water vapor condenses below the glaze; may develop into smooth, shiny layer of clear ice at surface)	(Builds during clear weather (long-wave cooling), air tempera- tures below freezing and strong irradia- tion (not to be con- fused with melt-freeze crusts); melting can occur below the crust in clean snow)	(Thin, often breakable ice crust)	

d	Wind crust 	wc	Small, broken or abraded, closely- packed particles; well sintered	Surface	Wind crust	Fragmentation and packing of wind trans- ported snow particles; high number of contact points and small size causes rapid strength increase through sinter- ing	Hardness of crust increases with wind speed, decreasing particle size and moderate temperature	Hard, sometimes breakable crust
e	Melt- freeze crust 	mfc	Crust of recog- nizable melt- freeze poly- crystals	Near surface	Crust of melt-freeze particles	Refrozen layer (e.g. wind crust) which was wetted with water at least once	Particle size and density increases with number of melt-freeze cycles	Hardness increases with number of melt-freeze cycles